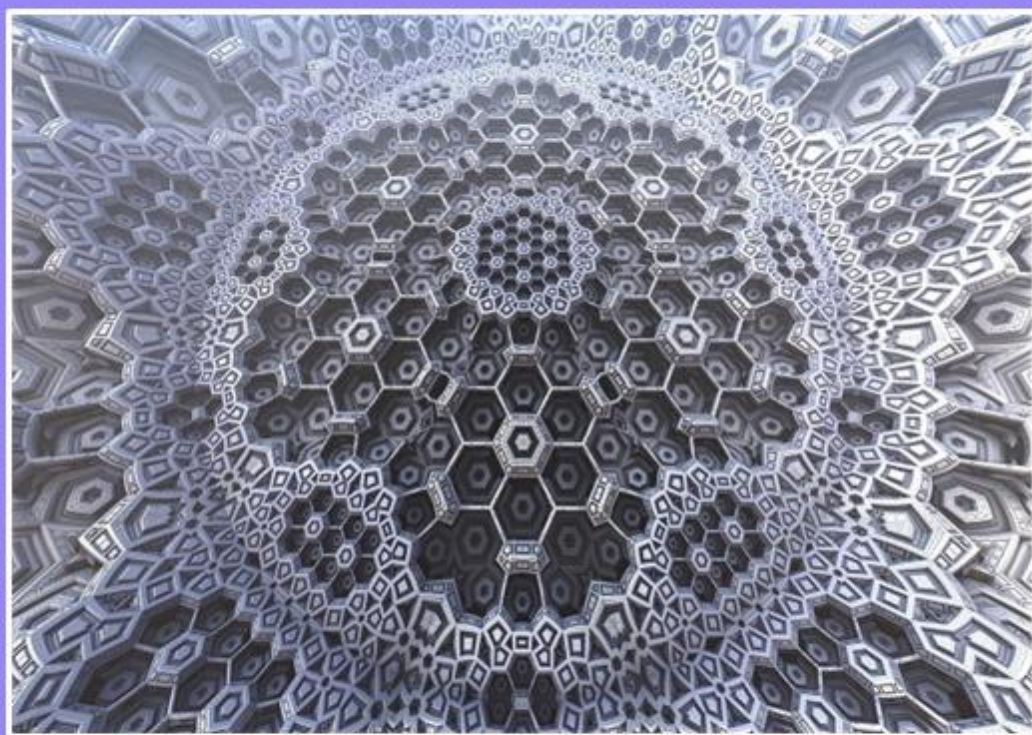


DOĞA BİLİMLERİ VE MATEMATİKTE ÖNCÜ VE YENİLİKÇİ ÇALIŞMALAR



All Sciences Academy

DOĞA BİLİMLERİ VE MATEMATİKTE ÖNCÜ VE YENİLİKÇİ ÇALIŞMALAR

Editör
Doç. Dr. ALİ ÖZDEMİR





Doğa Bilimleri ve Matematikte Öncü ve Yenilikçi Çalışmalar
Editör: Doç. Dr. ALİ ÖZDEMİR

Dizayn: All Sciences Academy Design

Basım Tarihi: Aralık 2024

Yayıncı Sertifika Numarası: 72273

ISBN: 978-625-5954-45-9

© All Sciences Academy

www.allsciencesacademy.com

allsciencesacademy@gmail.com

İÇERİK

1. Bölüm	8
Yeni Biyoaktif Doğal Ürünlerin Keşfi İçin Genom Madenciliği <i>Dilara Hande BARLIK, Erdal ÖĞÜN</i>	
2. Bölüm	17
Fotokatalizin Temelleri <i>Halil Zeki GÖK, Yaşar GÖK</i>	
3. Bölüm	27
Parçalı Polinom Yaklaşımı Hermite Kübik Spline <i>Ahmet BOZ</i>	
4. Bölüm	35
Nonlineer Diferansiyel Denklemlerin Subdomain Yöntemiyle Çözümü <i>Birkan DURAK, Erol UZAL</i>	
5. Bölüm	47
Ciğerotlarının (Marchantiophyta) İnsektisit Potansiyeli <i>Özcan ŞİMŞEK</i>	
6. Bölüm	59
Maleik Hidrazitin Tautomerik Yapıları <i>Cumali ÇELİK</i>	
7. Bölüm	71
Uşak Üniversitesi'nde Radon Gazı ve Elektromanyetik Alan Değerlerinin Belirlenmesi <i>Engin TEKİN, İrem YILMAZ, Hanife BULUT</i>	
8. Bölüm	83
Çok Aralıklı Diferansiyel Denklemlerin Genelleştirilmiş DDY ile Çözümü <i>Merve YÜCEL, Kadriye AYDEMİR</i>	

9. Bölüm	105
Projektif Düzlemde Kuadratik Bézier Eğrileri <i>Muhsin İNCESU, Mücahit ŞİMŞEK</i>	
10.Bölüm	119
Dual Bézier Eğrilerinde Frenet Çatısı <i>Muhsin İNCESU, Fadime TEKGÜL</i>	
11.Bölüm	132
Kumarin ve Türevleri: Kimyasal Yapıları ve Biyolojik Etkileri <i>Nesibe ARSLAN BURNAZ, Tuba Eda ARPA ZEMZEMOĞLU</i>	
12.Bölüm	153
Kaz Dağları ve Yakın Çevresinin Ciğerotları (Marchantiophyta) Biyçeşitliliği <i>Özcan ŞİMŞEK</i>	
13.Bölüm	167
Alpin Habitatlardaki Karbon Döngü Süreçleri <i>Sevda TÜRKİŞ</i>	
14.Bölüm	178
Antrakınonlar ve Kinizarin Türevlerinin Biyoaktif Özellikleri <i>Ülkü YILMAZ</i>	
15.Bölüm	192
Ajuga orientalis L., Lamiaceae (Ballıbabagiller) Bitkisinin Morfolojik, Ekolojik Ve Ekonomik Önemi <i>Derviş ÖZTÜRK</i>	
16.Bölüm	204
Vinca major L. Bitkisinin Morfolojik ve Ekonomik Önemi <i>Derviş ÖZTÜRK</i>	

17. Bölüm**213**

İşletmelerin Sürdürülebilirlik Raporlarının Türkiye Sürdürülebilirlik Raporlama Standartları (TSRS)'na Uyum Düzeyinin Değerlendirilmesi
İncilay SAVAŞ, Ahmet Eren YILDIRIM

18.Bölüm**231**

Yeni Biyoaktif Doğal Ürünlerin Keşfi İçin Genom Madenciliği
Dilara Hande BARLIK, Erdal ÖĞÜN

Yeni Biyoaktif Doğal Ürünlerin Keşfi İçin Genom Madenciliği

Dilara Hande BARLIK¹
Erdal ÖĞÜN²

- 1- Moleküler Mikrobiyolog; Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Moleküler Biyoloji ve Genetik AD. dilarahandebarik@hotmail.com ORCID No: 0000-0003-1668-1413
- 2- Doç. Dr.; Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Moleküler Biyoloji ve Genetik AD. eogun@yyu.edu.tr ORCID No: 0000-0001-8280-4245

ÖZET

Mikroorganizmalar çevrelerindeki diğer canlılarla etkileşime geçmek ve zorlu şartlara uyum sağlamak için kimyasal, karmaşık bileşikler olan değerli doğal ürünler üretirler. Bu da mikroorganizmaları antimikrobiyal, antitümöral, antiviral, antioksidan gibi biyoaktif doğal ürünlerin en önemli kaynağı yapar. Günümüzde kullanılan birçok antibiyotik sentetik dolayısıyla da toksiktir. Ayrıca bazı dirençli mikroorganizmaların neden olduğu enfeksiyonlar kullanılmakta olan antibiyotiklere cevap vermemekte ve bu da her yıl dünya çapında artan ölümlerle sonuçlanmaktadır. Kanser ilaçlarının ise neredeyse tamamı yaşamı tehdit edecek kadar ciddi yan etkilere sahiptir, hatta birçoğu hastalığa karşı etkisizdir. Artan kanser vakaları ve küresel bir sorun haline gelmiş bakteriyel patojenlerdeki antimikrobiyal direnç etkili ve en güvenli çözüm yeni biyoaktif doğal ürünlerin (sekonder metabolitler) keşfidir. Daha önce keşfedilmemiş sekonder metabolitleri ortaya çıkarmak için geleneksel yöntemlerden çok daha etkili ve hızlı olan genom madenciliği mikroorganizmaların biyosentetik gen kümelerini (BGC) ve işlevlerini saptamak için doğmuş bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım tamamen bilgi işlem teknolojisine ve biyoinformatik araçlara bağlıdır. Bunun için kullanılan en önemli web aracı “Antibiotics and Secondary Metabolite Analysis SHell” (antiSMASH)’dir. Genom madenciliği sadece biyoaktif doğal ürünlerin biyosentetik yolunu değil aynı zamanda bunların olası fonksiyonel ve kimyasal etkileşimlerini saptamak için de kullanılır. Genom madenciliği yaklaşımıyla birlikte mikrobiyal dünyada şimdiye kadar keşfedilmemiş bir biyosentetik potansiyel ortaya çıkmıştır ve hala keşfedilmeyi bekleyen çok fazla sekonder metabolit mevcuttur.

Anahtar Kelimeler – Genom Madenciliği, Sekonder Metabolit, Antibiyotik Direnci, Kanser, Biyosentetik Gen Kümeleri.

GİRİŞ

Doğal dünyada iletişim büyük ölçüde kimyasaldır. Mikroorganizmalar, çevrelerindeki biyolojik ve fiziksel dünyayla etkileşime geçmek için doğal ürünler dediğimiz küçük kimyasal ve karmaşık bileşikler üretirler (Bauman ve ark., 2021). Bu da doğayı, klinik alanda yaygın olarak kullanılan önemli ilaçların bir parçasını oluşturan biyoaktif ürünlerin ve türevlerinin (sekonder metabolitler) önemli bir kaynağı haline getirir.

Doğal ürünler alanındaki ilk çalışmalar bakteriyel kaynaklıdır ve antibiyotik keşif döneminin başlangıcı olan 1940’lara kadar uzanmaktadır (Sekurova ve ark., 2019). Bu dönemde Gram-pozitif bakteriler arasında en büyük bakteri filumlarından birini temsil eden ve birçok habitatta bulunan aktinomisetlere büyük önem verilmiştir. (Meij ve ark., 2017). Çünkü tüberküloza

(Mycobacterium tuberculosis) neden olan ajana karşı etkili olduğu kanıtlanan ilk antibiyotik streptomisin, aktinomiset filumuna ait bir toprak bakterisi olan Streptomyces griseus'tan keşfedilmiştir (Smith ve Waksman, 1947). Daha sonra antifungal nistatin, antibakteriyel eritromisin, vankomisin, novobiosin, oleandomisin ve antikanser ajanı doksorubisin, actinomisin dahil olmak üzere ilaçlara dönüştürülen çok sayıda çeşitli biyoaktif bileşik, aktinomisetlerden keşfedilmiştir (Harir ve ark., 2018). Bu keşiflerin büyük çoğunluğu, ilaç şirketlerinin dünyanın dört bir yanından toplanan toprak örneklerinden izole edilen çok sayıda aktinomisetleri taradığı 1950'ler ve 1970'lerde yapılmıştır (Sekurova ve ark., 2019). Son 30 yılda bakterilerden çok sayıda elde edilen ve büyük önem taşıyan antikanser, antibakteriyel, antikolesterol, antienfektif ajanlar ilaç endüstrisinde kullanılmıştır (Albarano ve ark., 2020) ancak halihazırda bilinen bileşiklerin tekrar tekrar yeniden keşfedilmesi, daha sonraki araştırma çabalarında cesaret kırıcı bir faktör haline gelmiştir (Sekurova ve ark., 2019).

Doğal ürünlerin keşfi alanı, ilk Streptomyces bakterisi genomlarının dizilindiği 2000'li yılların başında temel bir değişime uğramıştır. Bu genom dizileri, daha önce keşfedilmemiş sekonder metabolit biyosentetik gen kümelerini (BGC) ortaya çıkarmış ve böylece genom madenciliği yaklaşımı doğmuştur (Baltz, 2019; Bauman ve ark., 2021).

“Genom madenciliği” terimi, yalnızca biyoaktif doğal ürünlerin biyosentetik yolunu değil aynı zamanda bunların olası fonksiyonel ve kimyasal etkileşimlerini saptamak için kullanılan her biyoinformatik araştırmayla ilişkilidir (Ziemert ve ark., 2016). Spesifik olarak genom madenciliği, organizmaların sekanslanmış genomları içindeki önceden karakterize edilmemiş BGC'lerin tanımlanmasını, bu gen kümeleri tarafından kodlanan enzimlerin dizi analizini ve gen kümelerinin ürünlerinin deneysel tanımlanmasını içerir (Trivella ve Felicio, 2018). Bu yaklaşımla beraber birçok mikrobiyal türde benzeri görülmemiş bir biyosentetik potansiyel ortaya çıkmıştır ve genom madenciliği sekonder metabolit üretiminde yer alan genlerin, bir metabolitin peptid montajını, düzenlenmesini, direncini, sentezinde yer alan enzimleri kodladığını ve fiziksel olarak BGC'lerin gruplar halinde kümelendiğini göstermiştir (Belknap ve ark., 2020). Bu ilk bilgiler ileri genetik yaklaşımlardan (fenotipten dizileme) doğarken, yeni nesil dizileme teknolojilerinin ve genomik yaklaşımların ortaya çıkışı, BGC keşfi, sentezi ve karakterizasyonu üzerine ters genetik yaklaşımlar (diziden fenotipe ilerleme) için fırsatlar sağlamıştır (Hannigan ve ark., 2019).

Genom madenciliği tamamen bilgi işlem teknolojisine ve biyoinformatik araçlara bağlıdır. Yeni bir genomdaki tüm genler tanımlandıktan sonra, bunlar kamuya açık veri tabanlarında işlevi bilinen genlerle karşılaştırılabilir. Doğal ürün biyosentezinde yer alan enzimleri kodlayan birçok proteinin sekansının bu veri tabanlarında mevcut olması durumunda, bunların dahil olduğu yolları sekans karşılaştırmaları ile belirlemek daha kolaydır

(Albarano ve ark., 2020). İlk yaklaşımlar, BLAST (Altschul ve ark 1990) gibi programları kullanarak basit BGC referans hizalama tekniklerini uygulamak ve sıklıkla manuel iyileştirmeyle eşleştirmekten ibaretti. Genom madenciliği yaklaşımının performansını artırmak için son on yılda web araçları ve veri tabanları geliştirilmiştir. Geliştirilen en önemli web araçlarından biri “Antibiotics and Secondary Metabolite Analysis SHell” (antiSMASH)’dir (Medema ve ark., 2011). İlk versiyonu 2011 yılında yayınlanan bu yaklaşım günümüzde kullanılan CLUSEAN, SMURF ve PRISM gibi hesaplama araçlarına öncülük etmiştir ve altın standart olarak kabul edilmektedir (Khaldi ve ark., 2010; Blin ve ark., 2019). AntiSMASH, biyosentetik gen kümeleri içeren genom bölgelerini tespit etmek için mikrobiyal genomları teker teker analiz eder, dizilerin tahminini gerçekleştirir ve tanımlanan gen kümelerinin daha ayrıntılı bir analizini sunarak bilinen BGC’leri, MIBiG (Terlouw ve ark., 2022) veri tabanıyla karşılaştırır (Blin ve ark., 2024).

Yapılan çalışmalar *Streptomyces* genomlarının 25-70 BGC’ye sahip olduğunu göstermiştir ve bu, diğer aktinobakteriyel cinslerden çok daha fazladır (Belknap ve ark., 2020). Ancak genomik bazlı yaklaşımlardaki son gelişmeler, streptomisetlerin sekonder metabolit biyosentetik gen kümelerinin (smBGC’ler) çoğunun laboratuvar fermantasyon koşulları altında aktif olmadığını ortaya çıkarmıştır (Rebets ve ark., 2014). Bu da streptomisetlerin sekonder metabolit üretme yeteneğinin eksik tahmin edildiğini ortaya koymaktadır. SmBGC’lerin, sık tekrarlı yapılara sahip çok modüler enzimleri kodlayan işlevsel, olağanüstü uzun genlerden (>5 kb) oluştuğunu (Lee ve ark., 2020) ve *Streptomyces*’in şu ana kadar karakterize edilen yaklaşık 1240 türüyle (Anonim, 2024) aktinobakterilerin en büyük cinsi olduğu göz önüne bulundurulduğunda, streptomycetes yeni sekonder metabolitlerin keşfi için çok değerli bir kaynaktır.

Yeni sekonder metabolitlerin keşfinin önemi, bakteriyel patojenlerdeki antimikrobiyal direncin bir halk sağlığı sorunu olmasına dayanmaktadır. Antibiyotik direnci, bakterilerin onları öldürmek veya büyümelerini inhibe etmek için tasarlanmış antibiyotiklere maruz kalmaya direnme yeteneğidir (Mancuso ve ark., 2021). Antimikrobiyal direncin (AMR) doğal bir süreç olmasına rağmen, bir küresel sorun haline gelmesinin başlıca sebebi antibiyotiklerin aşırı kullanımudur (Coculescu, 2009). Bununla birlikte, prevalansındaki artışın sebebi olan diğer faktörler de "sosyoekonomik belirleyiciler" olarak adlandırılan zayıf toplum hijyeni, koruyuculu gıdalar, hastane ve kliniklerde zayıf enfeksiyon kontrolü, çevrede antibiyotik birikimi ve bunların hayvan ve gıda endüstrilerinde kullanımudur (Collignon ve Beggs, 2019). Bu da Gram-pozitif ve negatif bakterilerdeki çoklu ilaca dirençli türlere, geleneksel antimikrobiyal ilaçlarla tedavi edilmesi zor, hatta tedavi edilemeyen enfeksiyonlara yol açmıştır. Ortaya çıkan dirençte çarpıcı artışlar meydana gelmekte ve bu durum zayıf enfeksiyon kontrol uygulamalarıyla birleştğinde dirençli bakteriler diğer hastalara ve çevreye

kolayca yayılmaktadır (Frieri ve ark., 2017). Antibiyotik direncinin gelişmesine karşı stratejiler bulmak, yaşam bilimleri camiası ve halk sağlığı için büyük bir küresel zorluktur. Geçtiğimiz on yılda, bir veya daha fazla antibiyotiğe dirençli insan patojenik bakterilerde, dünya çapında çarpıcı bir artış görülmektedir (Chellat ve ark., 2016). Dirençli mikroorganizmaların neden olduğu enfeksiyonlar geleneksel tedaviye yanıt vermemekte, son çare olarak kullanılan antibiyotikler bile etkisini yitirmektedir. Bakteriyel dirençle mücadele için acil çözüm bulunmasına ihtiyaç duyulmaktadır (Frieri ve ark., 2017).

Şu anda dünya çapında her yıl en az 700.000 kişi AMR nedeniyle ölmektedir. Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ), yeni ve daha iyi tedaviler olmazsa bu sayının 2050 yılına kadar 10 milyona çıkabileceğini öngörmektedir. 2017'de, artan antibiyotik direncinin ışığında, DSÖ, insan sağlığına en büyük tehdidi oluşturan patojenleri ESKAPE (Enterococcus faecium, Staphylococcus aureus, Acinetobacter baumannii, Pseudomonas aeruginosa, Klebsiella pneumoniae ve Enterobacter türleri) kısaltmasıyla yayınlamıştır (Mancuso ve ark., 2021). Hastalık Kontrol ve Önleme Merkezlerine göre, yalnızca Amerika Birleşik Devletleri'nde her yıl 3 milyona yakın insan, antibiyotiğe dirençli bakteri veya mantarların çeşitli türleri veya suşları ile enfekte olmakta ve bu hastalığa yakalananların 35.000'den fazlası ölmektedir (Church ve McKillip, 2021).

Dünya çapında önemli diğer bir halk sağlığı sorunu da kanserdir. Kanser, 2018'de tahminen 18,1 milyon yeni vaka ve 9,6 milyon ölümle dünya çapında morbidite ve mortalitenin ana nedenidir (Cotas ve ark., 2020). 200'den fazla kanser türü vardır ve bazıları vücuttaki diğer dokulara yayılarak metastazlara ve ölüme yol açmaktadır (Hussein ve Abdullah, 2020). Dünya Sağlık Örgütü'nün raporuna göre kanser vakalarının 2030 yılında küresel olarak yaklaşık %68 oranında artacağı ve bu hastalık nedeniyle 13 milyon ölüm yaşanacağı öngörülmektedir (Mondal ve ark., 2020). Şu anda Amerika Birleşik Devletleri'nde ikinci önde gelen ölüm nedeni kanserdir (Siegel ve ark., 2022). Özellikle erkeklerde akciğer/bronş kanseri ve kadınlarda meme kanseri gibi yaygın vakalar için yeni kemoterapi keşfetmeye yönelik ortak çabalar gerektirmektedir (Samarakoon ve ark., 2014). Kemoterapiler, kanser hücrelerini yok edebilen veya büyümesini önleyebilen ilk tedavi yöntemidir. Bununla birlikte, kemoterapötik ilaçların neredeyse tümünün, yaşamı tehdit edecek kadar ciddi yan etkileri vardır (Hussein ve Abdullah, 2020). Bu nedenle yeni ve daha güvenli antikanser ilaçlara ihtiyaç vardır. Yakın geçmişte ilaç endüstrisinin doğal ürünlere olan ilgisinde bir azalma olmasına rağmen, bu ürünler kanseri tedavi etme ve önleme konusundaki önemli potansiyeli gereği yeni, etkili ve güvenilir ilaçlar elde etmek için en iyi platformdur. Doğa, biyoaktif ve çeşitli antikanser metabolitler açısından zengin bir kaynak olmaya devam etmektedir ancak çıkarılan doğal ürünlerin nispeten çok azı kendi başlarına klinik açıdan faydalı ilaçlara dönüştürülmektedir (Mondal ve ark., 2020).

Günümüzde yeni antikarsinojenik farmasötik ilaçların tanımlanması ve geliştirilmesinde doğal ürünlerin temel önceliği ve doğal ürün kaynaklarından yeni moleküler işlevselliklerin çıkarılmasında disiplinler arası iş birliğinin değeri kapsamlı bir şekilde araştırılmaktadır ve araştırılmaya devam edilmelidir (Banerjee ve ark., 2019).

SONUÇ

Kanser gibi ciddi hastalıkların görülme sıklığının artması, antibiyotik direncinin artık küresel bir sorun olması ve mevcut ilaçların etkinliğinin azalması nedeniyle yeni ilaç varlıklarının keşfedilmesine yönelik acil ihtiyaç vardır. Bu noktada genom madenciliği yaklaşımıyla biyoteknolojik açıdan ilgi çekici yeni doğal bileşikler kodlayan genleri tahmin etmek büyük bir önem arz etmektedir.

REFERANSLAR

- Albarano, L., Esposito, R., Ruocco, N., & Costantini, M. (2020). Genome mining as new challenge in natural products discovery. *Marine drugs*, 18(4), 199.
- Almeida, E. L., Kaur, N., Jennings, L. K., Carrillo Rincón, A. F., Jackson, S. A., Thomas, O. P., Dobson, A. D. (2019). Genome mining coupled with OSMAC-based cultivation reveal differential production of surugamide A by the marine sponge isolate *Streptomyces* sp. SM17 when compared to its terrestrial relative *S. albidoflavus* J1074. *Microorganisms*, 7(10), 394.
- Altschul, S. F., Gish, W., Miller, W., Myers, E. W., Lipman, D. J. (1990). Basic local alignment search tool. *Journal of molecular biology*, 215(3), 403-410.
- Anonim, (2024). <http://www.bacterio.net/streptomyces> adresinden 15 Kasım 2024 tarihinde alınmıştır.
- Baltz, R. H. (2019). Natural product drug discovery in the genomic era: realities, conjectures, misconceptions, and opportunities. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 46(3-4), 281-299.
- Banerjee, S., Bose, S., Mandal, S. C., Dawn, S., Sahoo, U., A Ramadan, M., Mandal, S. K. (2019). Pharmacological property of pentacyclic triterpenoids. *Egyptian Journal of Chemistry*, 13-35.
- Bauman, K. D., Butler, K. S., Moore, B. S., Chekan, J. R. (2021). Genome mining methods to discover bioactive natural products. *Natural Product Reports*, 38(11), 2100-2129.
- Belknap, K. C., Park, C. J., Barth, B. M., Andam, C. P. (2020). Genome mining of biosynthetic and chemotherapeutic gene clusters in *Streptomyces* bacteria. *Scientific Reports*, 10(1), 2003.
- Blin, K., Shaw, S., Medema, M. H., Weber, T. (2024). The antiSMASH database version 4: additional genomes and BGCs, new sequence-based searches and more. *Nucleic acids research*, 52(D1), D586-D589.
- Blin, K., Shaw, S., Steinke, K., Villebro, R., Ziemert, N., Lee, S. Y., Weber, T. (2019). antiSMASH 5.0: updates to the secondary metabolite genome mining pipeline. *Nucleic acids research*, 47(W1), W81-W87.

- Coculescu, B. I. (2009). Antimicrobial resistance induced by genetic changes. *Journal of medicine and life*, 2(2), 114.
- Collignon, P., Beggs, J. J. (2019). Socioeconomic enablers for contagion: factors impelling the antimicrobial resistance epidemic. *Antibiotics*, 8(3), 86.
- Cotas, J., Marques, V., Afonso, M. B., Rodrigues, C. M., Pereira, L. (2020). Antitumour potential of *Gigartina pistillata* carrageenans against colorectal cancer stem cell-enriched tumourspheres. *Marine drugs*, 18(1), 50.
- Frieri, M., Kumar, K., Boutin, A. (2017). Antibiotic resistance. *Journal of infection and public health*, 10(4), 369-378.
- Hannigan, G. D., Prihoda, D., Palicka, A., Soukup, J., Klempir, O., Rampula, L., Bitton, D. A. (2019). A deep learning genome-mining strategy for biosynthetic gene cluster prediction. *Nucleic acids research*, 47(18), e110-e110.
- Harir, M., Bendif, H., Bellahcene, M., Fortas, Z., Pogni, R. (2018). Streptomyces secondary metabolites. *Basic biology and applications of actinobacteria*, 6, 99-122.
- Hussein, H. A., Abdullah, M. A. (2020). Anticancer compounds derived from marine diatoms. *Marine Drugs*, 18(7), 356.
- Khaldi, N., Seifuddin, F. T., Turner, G., Haft, D., Nierman, W. C., Wolfe, K. H., Fedorova, N. D. (2010). SMURF: genomic mapping of fungal secondary metabolite clusters. *Fungal Genetics and Biology*, 47(9), 736-741.
- Larsson, D. G., Flach, C. F. (2022). Antibiotic resistance in the environment. *Nature Reviews Microbiology*, 20(5), 257-269.
- Lee, N., Kim, W., Hwang, S., Lee, Y., Cho, S., Palsson, B., Cho, B. K. (2020). Thirty complete Streptomyces genome sequences for mining novel secondary metabolite biosynthetic gene clusters. *Scientific data*, 7(1), 55.
- MacGowan, A., Macnaughton, E. (2017). Antibiotic resistance. *Medicine*, 45(10), 622-628.
- Mancuso, G., Midiri, A., Gerace, E., Biondo, C. (2021). Bacterial antibiotic resistance: The most critical pathogens. *Pathogens*, 10(10), 1310.
- Medema, M. H., Blin, K., Cimermanic, P., De Jager, V., Zakrzewski, P., Fischbach, M. A., Breitling, R. (2011). antiSMASH: rapid identification, annotation and analysis of secondary metabolite biosynthesis gene clusters in bacterial and fungal genome sequences. *Nucleic acids research*, 39(suppl_2), W339-W346.
- Mondal, A., Bose, S., Banerjee, S., Patra, J. K., Malik, J., Mandal, S. K., Bishayee, A. (2020). Marine cyanobacteria and microalgae metabolites-A rich source of potential anticancer drugs. *Marine Drugs*, 18(9), 476.
- Newman, D. J., Cragg, G. M. (2014). Marine-sourced anti-cancer and cancer pain control agents in clinical and late preclinical development. *Marine drugs*, 12(1), 255-278.
- Rebets, Y., Brötz, E., Tokovenko, B., Luzhetskyy, A. (2014). Actinomycetes biosynthetic potential: how to bridge in silico and in vivo?. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 41(2), 387-402.
- Samarakoon, K. W., Ko, J. Y., Lee, J. H., Kwon, O. N., Kim, S. W., Jeon, Y. J. (2014). Apoptotic anticancer activity of a novel fatty alcohol ester isolated from cultured marine diatom, *Phaeodactylum tricornutum*. *Journal of functional foods*, 6, 231-240.

- Sekurova, O. N., Schneider, O., Zotchev, S. B. (2019). Novel bioactive natural products from bacteria via bioprospecting, genome mining and metabolic engineering. *Microbial biotechnology*, 12(5), 828-844.
- Siegel, R. L., Miller, K. D., Wagle, N. S., Jemal, A. (2023). Cancer statistics, 2023. *Ca Cancer J Clin*, 73(1), 17-48.
- Smith, D. G., Waksman, S. A. (1947). Tuberculostatic and tuberculocidal properties of streptomycin. *Journal of Bacteriology*, 54(2), 253-261.
- Terlouw, B. R., Blin, K., Navarro-Muñoz, J. C., Avalon, N. E., Chevrette, M. G., Egbert, S., Medema, M. H. (2023). MIBiG 3.0: a community-driven effort to annotate experimentally validated biosynthetic gene clusters. *Nucleic acids research*, 51(D1), D603-D610.
- Trivella, D. B., de Felicio, R. (2018). The tripod for bacterial natural product discovery: genome mining, silent pathway induction, and mass spectrometry-based molecular networking. *MSystems*, 3(2), 10-1128.
- Van der Meij, A., Worsley, S. F., Hutchings, M. I., van Wezel, G. P. (2017). Chemical ecology of antibiotic production by actinomycetes. *FEMS microbiology reviews*, 41(3), 392-416.
- Ziemert, N., Alanjary, M., Weber, T. (2016). The evolution of genome mining in microbes—a review. *Natural product reports*, 33(8), 988-1005.

Fotokatalizin Temelleri

Halil Zeki GÖK¹
Yaşar GÖK²

- 1- Prof. Dr.; Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü.
zekigok@mehmetakif.edu.tr ORCID No: 0000-0001-7641-2683
- 2- Prof. Dr.; Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü.
yasargok@mehmetakif.edu.tr ORCID No: 0000-0003-3134-7560

ÖZET

İnsanoğlu tarihsel gelişimi sürecinde günlük yaşamında karşılaştığı sorunlara etkili çözümleri doğadan ilham alarak yönlendirmiştir. Bunun en güzel örneği doğanın güneş enerjisi ile yaptığı fotosentezden esinlenilerek zorlu sentez basamaklarını mümkün kılmak için güneş enerjisinin toplandığı ve dönüştürüldüğü fotokimya yaklaşımının ortaya çıkmasıdır. Fotokimya, ışık enerjisi kullanılarak kimyasal reaksiyonların başlatıldığı veya hızlandırıldığı bir kimya dalıdır. Bu alanda ışık, genellikle bir kimyasal bağın kopması, yeni bağların oluşması veya moleküler bir dönüşümün gerçekleşmesi için gereken enerji kaynağıdır. Fotokimya başlığı altında fotokataliz ise ışık enerjisi (genellikle güneş veya UV ışığı) kullanılarak bir katalizör yardımıyla kimyasal reaksiyonların hızlandırıldığı bir süreçtir. Fotokatalizör ise ışık enerjisini absorbe ederek kimyasal reaksiyonları başlatan veya hızlandıran bir malzemedir. Fotokatalizörler, ışık absorpsiyon yetenekleri, kimyasal kararlılıkları ve reaktivite seviyelerine göre seçilir ve ışıkla etkilere girerek reaktif ara ürünler oluşturur. Fotokataliz, güneş enerjisi gibi yenilenebilir kaynakların kullanılması, zararlı kimyasalların kullanımının azaltılması ve karbonsuz enerji üretiminde rol oynaması sebebiyle hem çevresel hem de endüstriyel uygulamalarda önemli bir yere sahiptir.

Anahtar Kelimeler – Fotokimya, Fotokataliz, Fotokatalizör, Işık, Kimyasal Dönüşüm.

GİRİŞ

Fotokataliz kavramı fotovoltaiik etkinin gösterildiği Bacquerel tarafından yapılan bir bilimsel çalışma ile 1839 yılına dayanmaktadır. Bu çalışmada, güneş ışığı ışınımının gümüş halojen elektrotlar üzerinde etkisinin gözlemlendiği potansiyel farkı ve elektrik akımı oluşumu incelenmiştir (Becquerel, 1839:145:561). ZnO'in fotokatalizör olarak kullanılması ile ilgili çalışmada ise boyaların ağartılması yapılmış ve böylece fotokataliz anahtar kelimesi ilk defa 1911'de literatüre girerek kullanılmaya başlanmıştır (Bruner, 1911: 354, Eibner, 1911:753). Fotokataliz alanında öncü olan bu çalışmalar heyecanlı birer gelişme olmalarına karşın hak ettiği değeri görememişlerdir. Yarı iletken bir elektrotta suyun elektrokimyasal fotolizi ile ilgili yapılan çalışmalar 1960'ların sonunda tekrar fotokatalizi bilim camiasında üst sıralara taşımıştır. Honda ve Fujishima'nın yapmış olduğu çalışmalar ile fotokataliz çok hızlı bir şekilde değer kazanarak su parçalama, CO₂ indirgeme, fotovoltaiik hücreler ve kirletici bozunumu gibi çok çeşitli uygulamalar kapsamında yerini almıştır (Fujishima ve Honda, 1972: 37). Organik sentezdeki katalitik uygulamaları ise ilk defa güneş ışınımı altında C–C bağı oluşumunu indüklemek için bir fotokatalizör olarak TiO₂ kullanımı ile başlamıştır (Cermanati vd., 1998:805). Sadece yirmi beş yıl öncesinde homojen geçiş metal fotokatalizörlerinin sentetik organik kimya için ne derece

önem arz ettiği gösterilmiştir. Yapılan çalışmalar fotokataliz esaslı çok sayıda sentetik metodolojinin geliştirilmesiyle sonuçlanan alanı ateşleyen kıvılcım olmuştur (Nicewicz ve MacMillan., 2008:77; Ischay vd., 2008:12886; Narayanam, 2009:8756; Bottecchia ve Noël, 2019:26) Ancak, heterojen fotokatalizörler görünür ışık fotoredoks katalizi için daha yeşil alternatifler sunulması anlamında daha dikkat çekerek ilgi görmüştür (Hao ve Lang, 2019:1378; Silvi vd., 2015:6120). Daha spesifik olarak, metal oksit esaslı yarı iletkenler, pahalı ve toksik geçiş metal esaslı komplekslerin ve organik boyaların yerini alabilecek umut verici adaylar olarak ortaya çıkmıştır (Riente ve Noël, 2019:5186). Heterojen fotokatalizörler, bu homojen varyantlara göre (i) yüksek geri dönüştürülebilirlik ve yeniden kullanılabilirlik; (ii) yüksek bolluk (çoğu dünyada bol miktarda bulunur) ve dolayısıyla düşük maliyet; (iii) düşük toksisite; (iv) yüksek kimyasal kararlılık ve (v) elektronik ve optik özelliklerin ayarlanabilirliği gibi çeşitli avantajlar sunmaktadır.

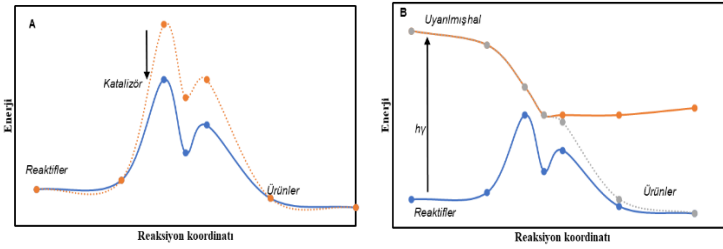
Organik sentetik kimyanın gelişimi, tarım, gıda ve ilaç gibi sektörlerin ihtiyaç duydukları yapı özelliklerine sahip moleküler blokların elde edilmesi ile paralellik göstermektedir. Sentez kimyasında birçok gelişme olmakla beraber istenilen kimyasal yapının doğru şekilde sentezi en çok zaman harcanan adımdır. İstenilen kimyasalların sentezinin daha hızlı ve verimli bir şekilde gerçekleştirilmesi için bilim camiası oldukça yoğun çaba harcamaktadır. Ayrıca kimyasalların sentezi için gerekli süreçlerin bazıları çevre dostu olmayan işlemleri içermektedir. Çevresel zararların azaltılması için, bilim dallarının çoğu araştırmalarını sürdürülebilir yöntemlerin bulunması üzerine yönlendirmeye başlamıştır. Özellikle kimya bilimi, diğer bilim dallarının da katkısı ile, sentez adımlarını daha hızlı ve verimli yapacak yeni yöntemler üzerine çalışmalarını yoğunlaştırarak ve çeşitlendirerek devam ettirmektedir (Noël ve Zysman-Colman, 2022:1). Sentez adımının hızlandırılması ve verimliliğin artırılması, bu adıma bağımlı diğer alanlarda da benzer bir etkiyi yaratarak hızlı gelişmelerin meydana gelmesine katkı sağlayacaktır.

GELİŞME

Kimyasal bir reaksiyonun gerçekleştirilmesi veya hızlandırılması amaçlı en çok kullanılan yöntemlerden biri reaksiyon sıcaklığını artırmaktır. Sentez laboratuvarlarında sıklıkla kullanılan reaksiyon sıcaklık artışı gerçekleştirilmesi hedeflenen reaksiyon sürelerinin ciddi anlamda azalmasına neden olmaktadır. Arrhenius denklemi (Eşitlik 1) ile reaksiyon hızı ve reaksiyon sıcaklığı arasında doğrudan bir ilişkinin olduğu ve reaksiyon kinetiğinin temellerini oluşturduğu bilinmektedir. (Petrucchi vd, 2016:1).

$$k = A \times e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (\text{Eşitlik 1})$$

Bu denklem, reaksiyon hızı sabitinin (k) doğal logaritmasının alınmasından sonra tekrar sıcaklığa ($1/T$) karşı grafiğe geçirilmesi ile doğrusallaştırılabilmektedir. Hız sabiti Arrhenius denklemine uyduğunda, grafikte elde edilecek düz çizginin doğru denkleminin eğimi, moleküllerin kimyasal reaksiyona girmesi için gereken enerjiye karşılık gelen aktivasyon enerjisini (E_a) vermektedir. Reaksiyonun gerçekleşmesi için hesaplanan sıcaklık çoğu zaman o kadar yüksek çıkmaktadır ki, bu sıcaklık başlangıç reaktiflerinin reaksiyona girmeden önce bozunmasına neden olmaktadır. Bu noktada bozunmanın olmasını engellemek ve istenilen reaksiyonların gerçekleşmesini sağlamak için çeşitli yöntemler geliştirilmeye başlanmıştır. Reaksiyonların gerçekleşmesini sağlamak için üzerinde en çok çalışılan yöntem, reaksiyon için gerekli aktivasyon enerjisinin düşürülmesi olarak öne çıkmıştır. Bunun için de reaksiyon ortamına asit/baz, indirgeyici/yükseltgeyici veya farklı tip katalizörlerin ilavesi gibi denemeler yapılmıştır. Bu tip katalizörlerin ilavesi ile reaksiyon için gerekli olan aktivasyon enerjisi bariyeri daha aşağı çekilmekte ve reaksiyonun daha ılıman şartlarda ve hızlı ilerlemesi sağlanabilmektedir (Şekil 1A).



Şekil 1. A) Termokimyasal B) Fotokimyasal reaksiyon aktivasyon eğrileri

Reaksiyonun gerçekleşmesi için gerekli enerji engelini aşılmasının başka bir yolu da fotonların seçici absorpsiyonudur (Şekil 1B). Foton güdümlü dönüşümlerin kinetiği, birim zamanda gözlenen foton sayısına (foton akısına) (eşitlik 2) bağlıdır (Buglioni vd., 2022:2752). Düşük ışık yoğunlukları için ($< \text{yaklaşık } 200\text{--}250 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$), β 'a 1.0'a eşittir ve artan ışık yoğunlukları ile reaksiyon hızı sabitinin lineer artışını ifade eder (Şekil 2) (Bloh vd., 2019:128).

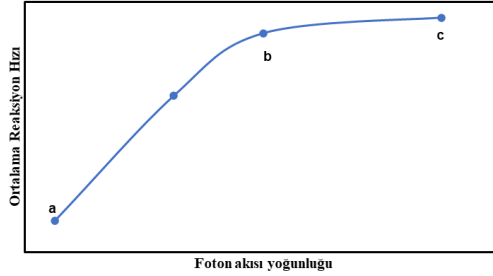
$$k = \alpha \cdot I^\beta \quad (\text{Eşitlik 2})$$

k = hız sabiti, α = fotokimyanın türüne bağlı olarak değer alan bir sabit, I = ışık şiddeti ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) ve β = foton

Eşitlik 2'de, sıcaklık ile ilgili bir terim bulunmamaktadır. Bu da bize fotokimyasal bir reaksiyonun oda sıcaklığında kolaylıkla gerçekleştirilebileceğini ve hızının ise ışığın şiddetinin ayarlanması ile

kolayca ayarlanabileceğini ifade etmektedir. Fotokimyasal reaksiyonlar güvenlik açısından ele alınacak olursa, çoğu fotokimyasal reaksiyon ışık kaynağını kapatmak gibi kolay bir yolla sonlandırılabilir.

Belirli bir anda, ışık yoğunluğunda daha fazla artış reaksiyon hızında bir artışa neden olmaz (Şekil 2).



Şekil 2. Ortalama reaksiyon hızına karşılık foton akışı grafiği

Reaksiyon nihai olarak foton akısından ($\beta = 0$) bağımsız hale gelir. Bu noktada fotokatalizör sürekli aktiftir ve reaksiyon ortamı fotonlarla tamamen doyurulmuştur. Gönderilen fazla fotonlar artık emilemeyecektir. Grafikteki lineer artışın devam edebilmesi için foton soğuran türlerin derişiminin artırılması gerekmektedir ki bu da katalizör miktarının artırılması ile sağlanabilir. Fotokimyasal sürecin enerji verimliliğinin doğru ayarlanabilmesi için, ışık yoğunluğu ile uygun miktarda katalizör yüklemesinin yapılması oldukça önemlidir. Bir reaksiyon karışımı ışık demeti ile uyarıldığında, gönderilen ışık demetinin önemli bir miktarı dağılmaya, saçılmaya, olduğu gibi geçmeye ya da yansımaya uğrar. Işığın yalnızca bir kısmı soğurulabilmektedir. Bir fotokimyasal dönüşümü başlatacak olan yalnızca soğurulan ışıktır. Bu, fotokimyanın birinci yasası olarak bilinir (Grothüs-Draper yasası olarak da bilinir) (Bonfield vd., 2020:804). Örneğin, bir reaksiyon karışımı görünür ışıkla uyarıldığında hiçbir reaksiyon meydana gelmeyebilir. Bilindiği üzere organik moleküllerin çoğu şeffaf olduğu için görünür ışık ile uyarıldıklarında hiçbir reaksiyon meydana gelmez. Eğer organik moleküllerin şeffaf olduğu bir reaksiyon karışımına organik boya ve/veya bazı geçiş metal kompleksleri eklenirse, eklenen bu renkli moleküller görünür ışığı absorplar ve uyarılmış hale geçerler. Bu uyarılmış haldeki enerjilerinin aktarımını, tek elektron transferi (SET, fotoredoks kataliz), hidrojen atom transferi (HAT), proton-bağılı elektron transferi (PCET) veya enerji transferi (ET) yollarından biri ile gerçekleştirir (Cheung vd., 2022:1543).

Fotokimya dalga boyu duyarlı olduğundan, ışık kaynağından yayılan ışığın dalga boyu ile foton emici moleküllerin absorpsiyon özellikleri arasındaki örtüşmeyi maksimize etmek çok önemlidir. Genellikle ışık absorpsiyonu yapan türün maksimum absorbans gösterdiği dalga boyu ($\lambda_{\max}$)

seçilir veya alternatif olarak rekabetçi fotokimyasal yan reaksiyonların meydana gelmediği bir dalga boyu bölgesi seçilir. Sonuç olarak, hedeflenmemiş fonksiyonel grupların veya bileşenlerin uyarılması ile reaksiyon karışımlarında istenmeyen yan ürün oluşumuna veya reaksiyon çözücüsünün ısınmasına yol açabilecek durumları önlemek için yeterince dar spektrumlu ışık kaynakları (LED'ler gibi) tercih edilir. Dalga boyu seçici ışık kaynakların kullanılması durumunda daha seçici fotokimyasal reaksiyonların gerçekleştirildiği bilinmektedir (Tastan vd., 2021:90).

Fotokimyasal bir reaksiyon için kullanılacak ışık kaynağının konumlandırılması da oldukça önemlidir. Işığın uzaklık ile değişimini ifade eden eşitlik 3'e göre, ışık şiddeti uzaklığın karesi ile ters orantılıdır (Eşitlik 3).

$$I = \frac{S}{4\pi r^2} \quad (\text{Eşitlik 3})$$

S = kullanılan ışın kaynağının gücü (W), r = ışın kaynağının reaktöre uzaklığı ve I = birim alandan geçen ışık yoğunluğu ($W.m^{-2}$).

Başka bir deyişle, ışık kaynağı reaktörden ne kadar uzağa yerleştirilirse, o kadar fazla ışık kaybolur ve reaksiyon ortamında yoğunluk o kadar düşük olur. Yine Lambert-Beer yasasına göre, bir ışık demeti bir çözelti içerisinden geçerken, fotonlar emilecek ve bu da ışık yoğunluğunda kademeli bir azalmaya yol açacaktır. Lambert-Beer yasası (Eşitlik 4) ışık ile çözelti arasındaki bu etkileşimi, ışık absorpsiyonu yapan türün molar absorptivite katsayısı, derişimi ve ışığın aldığı yol ile açıklar (Petrucchi vd, 2016:1).

$$A = -\log_{10} T = -\log_{10} \frac{I}{I_0} = \epsilon l C \quad (\text{Eşitlik 4})$$

Kuhn ve arkadaşları yaptıkları çalışmada bir mikroakışkan kanal için, mikrokanal ve LED'ler arasındaki mesafe 1 ile 1,5 cm arasında olduğunda reaksiyon karışımında optimal ve düzgün bir ışımanın (~%90) elde edilebileceğini göstermişlerdir (Roibu vd., 2018:849). Bu nedenle, sıg boyutlu reaktörler tüm reaksiyon ortamı boyunca eşit reaksiyon koşulları sağlayabilmesinden dolayı fotokimyasal dönüşümleri ölçeklendirmek için tercih edilen kaplardır.

Fotokatalizde fotonları oluşturan ışık kaynağının seçimi de diğer önemli bir parametredir. Bir fotonun enerjisi, Planck-Einstein yasasına göre ışığın dalga boyu (veya frekansı) ile ilişkilendirilebilir. Organik kimyacıları ilgilendiren dalga boyu aralığı genellikle 200 ile 1000 nm arasındadır ve kullanılacak dalga boyu aralığı uygulamaya göre belirlenir. Çoğu fotokimyasal süreç çevre dostudur ve yukarıda açıklandığı üzere temel kanunlara sıkıca bağlıdır. Organik molekülleri aktive etmek için ışığı kullanmak, sentetik süreçlerin oda sıcaklığında gerçekleştirilmesini sağlayarak sert reaksiyon koşulları ve yüksek sıcaklığa olan ihtiyacı ortadan

kaldırmaktadır (Buglioni vd., 2022:2752;Tucker vd., 2012:4144;Cheung vd., 2022:1543). Organik moleküllerin çoğu yalnızca UV ışıması ile elektronik uyarılmış duruma ulaşabilirken, fotokataliz daha düşük enerjili fotonların (örneğin UV-A, görünür ışık ve hatta NIR) emilmesini ve verimli kullanılmasını sağlar. Fotokatalitik reaksiyonlarda fotokatalizör dışında, reaksiyona girecek diğer reaktifler genellikle renksizdir ve ışık ile uyarılamayacağından reaksiyonda yan ürün oluşumu en aza indirgenmiş olmaktadır. Fotokimyasal reaksiyonların basit koşullar altında gerçekleştirilebiliyor olması sayesinde, saflaştırma işlemlerine ve daha yüksek aktiviteye sahip fonksiyonel grupların koruma grubu ile korunması gibi işlemlere daha az ihtiyaç duyulur. Reaksiyonlar genellikle daha kısa sürelerde ve yüksek miktarda hedeflenen ürün oluşumu ile sonuçlanmaktadır (Wang vd., 2013:7860;Wei vd., 2017:7136;Sap vd., 2020:9181).

Organik kimyada yeni bir bileşiğin oluşumu için bir kimyasal bağın kırılması yüksek enerji gerektiğinden sentetik organik kimyada daha yüksek enerjili dalga boyunda absorpsiyon yapan fotokatalizörün kullanımı oldukça yaygındır (Cheung vd., 2022:1543;Buglioni vd., 2022:2752;Capaldo vd., 2021:1875;Xu vd., 2019:3868). Diğer yandan, malzeme biliminde gerçekleşen dönüşümler ile kimyasal biyolojide derin doku koşulları altında meydana gelen reaksiyonlar için görünür ışığı absorplayabilen malzemelerin kullanılması şarttır. Rutenyum veya iridyum içeren bileşiklerin çoğu görünür alan fotokatalizörlerinden olup oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır (Walter vd., 2010:759;Straathof vd., 2014:1612). Ancak, reaksiyon sonrası rutenyum, iridyum ya da paladyum gibi değerli metallerin geri kazanılma problemleri ve çevresel etkilerinden dolayı bu katalizörlerle yarışabilecek, bol bulunabilen ve çevresel etkileri daha az olan kobalt, nikel, demir, çinko vb metalleri içeren fotokatalizörler ya da metalsiz organokatalizörlerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

SONUÇ

Fotokataliz, organik maddelerin dönüştürülmesi veya sentezi başta olmak üzere hava kirliliğinin giderilmesi ve su arıtma gibi çevre temizliğinde, fotokatalitik su ayrışmasıyla hidrojen üretiminde ve gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Işık enerjisi kullanılmasıyla çevre dostu olması, kimyasal reaksiyonlar için yüksek sıcaklık gerektiren ek enerjiye ihtiyaç duymaması ve toksik ürün oluşumunu en aza indirmesi fotokatalizin avantajları arasında yer almaktadır. Fotokatalizörlerin çoğu UV ışığı gerektirir, bu da güneş ışığının sadece küçük bir kısmını kullanabilmeleri anlamına gelir ve bu doğrultuda yenilikçi malzemelerin geliştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca fotokimyasal reaksiyonları büyük ölçekli olarak gerçekleştirmek oldukça meşakkatli bir işlemdir. Daha büyük yarıçaplı reaksiyon balonları ya da reaktörleri kullanıldığında en yüksek ışık yoğunluğu balon cidarlarında

gözlenirken reaksiyon balonun merkezi çok az ışık görecektir veya hiç ışık görmeyecektir. Bu kapsamda bilim insanları yeni yöntemler geliştirmektedir.

REFERANSLAR

- Becquerel, A. E. (1839). Memoire sur les Effects d'Electriques Produits Sous l'Influence des Rayons Solaires. *Comptes Rendus de L'Academie des Sciences*, 9, 561–567
- Becquerel, A. E. (1839). Recherche sur les effets de la radiation chimique de la lumière solaire, au moyen des courants électriques. *Comptes Rendus de L'Academie des Sciences*, 9, 145–149.
- Bloh, J. Z. A. (2019). Holistic Approach to Model the Kinetics of Photocatalytic Reactions. *Frontier Chemistry*, 7, 128.
- Bonfield, H. E.; Knauber, T.; Lévesque, F.; Moschetta, E. G.; Susanne, F.; Edwards, L. J. (2020). Photons as a 21st Century Reagent. *Nat. Communucation*, 11, 804.
- Bottecchia, C., Noël, T. (2019), Photocatalytic modification of amino acids, peptides, and proteins. *Chem. – Eur. J.*, 25, 26–42.
- Bruner, L., Kozak, J. (1911). he Light Reaction in Uranium Salt Plus Oxalic Acid Mixtures. *Z. Elektrochem. Angew. Phys. Chem.*, 17, 354–360.
- Buglioni, L., Raymenants, F., Slattery, A., Zondag, S. D. A., & Noël, T. (2022). Technological Innovations in Photochemistry for Organic Synthesis: Flow Chemistry, High-Throughput Experimentation, Scale-up, and Photoelectrochemistry. *Chemical Reviews*, 122(2), 2752–2906.
- Capaldo, L., Ravelli, D., & Fagnoni, M. (2021). Direct Photocatalyzed Hydrogen Atom Transfer (HAT) for Aliphatic C-H Bonds Elaboration. *Chemical Reviews*, 122, 1875–1924.
- Cermenati, L., Richter, C., Albini, A. (1998). Solar light induced carbon–carbon bond formation via TiO₂ photocatalysis. *Chemical Communucations*, 805–806.
- Cheung, K. P. S., Sarkar, S., & Gevorgyan, V. (2022). Visible Light-Induced Transition Metal Catalysis. *Chemical Reviews*, 122(2), 1543–1625.
- Eibner, A. (1911). Action of Light on Pigments I. *Chem.-Ztg.* 35, 753–788.
- Fujishima, A., Honda, K. (1972). Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode. *Nature*, 238, 37–38.
- Hao, H., Lang, X. (2019). Metal Sulfide Photocatalysis: Visible-Light-Induced Organic Transformations. *ChemCatChem*, 11, 1378–1393.
- Ischay, M. A., Anzovino, M. E., Yoon, T. P. (2008). Efficient Visible Light Photocatalysis of [2+2] Enone Cycloadditions. *Journal of the American Chemical Society*, 130, 12886–12887.
- Narayanam, J. M. R., Tucker, J. W., Stephenson, C. R. J. (2009). Electron-Transfer Photoredox Catalysis: Development of a Tin-Free Reductive Dehalogenation Reaction. *Journal of the American Chemical Society*, 131, 8756–8757.
- Nicewicz, D. A., MacMillan, D. W. C. (2008). Merging photoredox catalysis with organocatalysis: the direct asymmetric alkylation of aldehydes. *Science*, 322, 77–80.
- Noël, T., & Zysman-Colman, E. (2022). The promise and pitfalls of photocatalysis for organic synthesis. *Chem Catalysis*, 2021, 1–9.

- Petrucci, R., Herring, F., Madura, J., Bissonnette, C. (2016). General Chemistry: Principles and Modern Applications, Loose Leaf Version 11th Edition.
- Riente, P., Noël, T. (2019), Application of metal oxide semiconductors in light-driven organic transformations. *Catalysis Science Technology*, 9, 5186-5232.
- Roibu, A.; Morthala, R. B.; Leblebici, M. E.; Koziej, D.; Van Gerven, T.; Kuhn, S. (2018). Design and Characterization of Visible-Light LED Sources for Microstructured Photoreactors. *React. Chem. Engineering*, 3, 849–865.
- Sap, J. B. I., Straathof, N. J. W., Knauber, T., Meyer, C. F., Meyer, C. F., Médebielle, M., Buglioni, L., Genicot, C., Trabanco, A. A., Noël, T., Am Ende, C. W., & Gouverneur, V. (2020). Organophotoredox Hydrodefluorination of Trifluoromethylarenes with Translational Applicability to Drug Discovery. *Journal of the American Chemical Society*, 142(20), 9181–9187.
- Silvi, M., Arceo, E., Jurberg, I. D., Cassani, C., Melchiorre, P. (2015). Enantioselective Organocatalytic Alkylation of Aldehydes and Enals Driven by the Direct Photoexcitation of Enamines. *Journal of the American Chemical Society*, 137, 6120–6123.
- Straathof, N. J. W., Gemoets, H. P. L., Wang, X., Schouten, J. C., Hessel, V., & Noël, T. (2014). Rapid trifluoromethylation and perfluoroalkylation of five-membered heterocycles by photoredox catalysis in continuous flow. *ChemSusChem*, 7(6), 1612–1617.
- Tastan, U.; Seeber, P.; Kupfer, S.; Ziegenbalg, D. (2021). Photo- chlorination of Toluene-the Thin Line between Intensification and Selectivity. Part 2: Selectivity. *React. Chem. Eng.* 6, 90–99.
- Tucker, J. W., Zhang, Y., Jamison, T. F., & Stephenson, C. R. J. (2012). Visible-light photoredox catalysis in flow. *Angewandte Chemie - International Edition*, 51(17), 4144–4147.
- Walter, M. G., Rudine, A. B., & Wamser, C. C. (2010). Porphyrins and phthalocyanines in solar photovoltaic cells. *Journal of Porphyrins and Phthalocyanines*, 14(9), 759–792.
- Wang, X., Cuny, G. D., & Noël, T. (2013). A mild, one-pot Stadler-Ziegler synthesis of arylsulfides facilitated by photoredox catalysis in batch and continuous-flow. *Angewandte Chemie - International Edition*, 52(30), 7860–7864.
- Wei, X. J., Boon, W., Hessel, V., & Noël, T. (2017). Visible-light photocatalytic decarboxylation of α,β -unsaturated carboxylic acids: Facile access to stereoselective difluoromethylated styrenes in batch and flow. *ACS Catalysis*, 7(10), 7136–7140.
- Xu, C., Ravi Anusuyadevi, P., Aymonier, C., Luque, R., & Marre, S. (2019). Nanostructured materials for photocatalysis. *Chemical Society Reviews*, 48(14), 3868–3902.

Parçalı Polinom Yaklaşımı Hermite Kübik Spline

Ahmet BOZ¹

1- Prof. Dr., Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi, ahmet.boz@dpu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1438-2391.

ÖZET

Bu çalışmada, sayısal hesaplamalarda önemli konulardan biri olan interpolasyon çeşitlerinden parçalı polinom yaklaşımı ele alınacaktır. İnterpolasyonda parçalı polinom kullanmanın sağladığı avantaj Hermite kübik spline fonksiyonlar yardımıyla ifade edilecektir (Schumaker, 1981; Hildebrand, 1956).

Anahtar Kelimeler – Parçalı Polinom, Yaklaşımlar, Spline Fonksiyonlar, Hermite Polinomları, Sayısal Yöntemler.

GİRİŞ

Daha önceki çalışmalarda (Powell, 1996; Rabinowitz, 1978) $f \in [a, b]$ ve $s, C^2[a, b]$ sınıfından kabul edilerek işlem yapılmıştır. Burada yapılacak işlemlerde ise interpolasyon yapılmak istenilen fonksiyonun düzgünlüğü üzerindeki gereklilik şartları güçlendirilecek ve $f \in C^3[a, b]$ olduğu kabul edilecektir (Iserles, 1996). Bu kabullerin yanı sıra s spline fonksiyonunun düzgünlük gereksinimleri gevşetilecek ve $s \in C^1[a, b]$ olduğu kabul edilecektir.

Şimdi Hermite kübik spline fonksiyonların tanımını ve matematiksel ifadesini verelim (Ahlberg, Nilson, & Walsh, 1967):

$K = \{x_0, x_1, \dots, x_m\}$ bir $[a, b]$ aralığında tanımlı düğüm noktalarının kümesi olsun. $m \geq 2$ olmak üzere düğüm noktaları

$$a = x_0 < x_1 < \dots < x_m = b$$

şeklinde sıralansın. $s \in C^1[a, b]$ olmak üzere Hermite kübik spline fonksiyonu aşağıdaki özelliklere sahiptir:

- i) $s(x_i) = f(x_i), s'(x_i) = f'(x_i), i = 0, 1, \dots, m$
- ii) s , her $[x_{i-1}, x_i]$ aralığında bir kübik polinomdur.
 $i = 0, 1, \dots, m$

Bu tanımlara göre $[x_{i-1}, x_i]$ aralığında s spline fonksiyonu ,

$$s(x) = c_0 + c_1(x - x_{i-1}) + c_2(x - x_{i-1})^2 + c_3(x - x_{i-1})^3,$$

$x \in [x_{i-1}, x_i]$ şeklinde tanımlanır. Buradaki c_0, c_1, c_2, c_3 katsayıları spline özelliklerini sağlayacak şekilde aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\begin{aligned} c_0 &= f(x_{i-1}), \\ c_1 &= f'(x_{i-1}), \\ c_2 &= \frac{3[f(x_i) - f(x_{i-1})]}{h_i^2} - \frac{[f'(x_i) + 2f'(x_{i-1})]}{h_i}, \\ c_3 &= \frac{[f'(x_i) + f'(x_{i-1})]}{h_i^2} - \frac{2[f(x_i) - f(x_{i-1})]}{h_i^3}. \end{aligned}$$

Burada $h_i = x_i - x_{i-1}$ iki düğüm noktası arasındaki mesafedir. Hermite kübik spline yalnızca düğüm noktalarında sürekli birinci türeve sahiptir. Doğal kübik spline fonksiyonların aksine Hermite kübik spline fonksiyonların her alt aralıktaki katsayıları, bir üçköşegensel sistemi çözmeye gerek kalmadan açıkça yazılabilir. İnterpolasyon hatasının büyüklüğü ile ilgili olarak aşağıdaki sonuca varılabilir.

Teorem : $f \in C^4[a, b]$ olsun ve s, f fonksiyonunu $a = x_0 < x_1 < \dots < x_m = b$ düğüm noktalarında interpolate eden Hermite kübik spline olsun. O zaman aşağıdaki hata sınırı geçerlidir:

$$\|f - s\|_{\infty} \leq \frac{1}{384} h^4 \|f^{(4)}\|_{\infty}$$

şeklindedir. Burada $f^{(4)} = f^{(4)}(x)$, f fonksiyonunun x ' e göre dördüncü mertebeden türevi ifade eder. $h = \max h_i = \max(x_i - x_{i-1})$ düğüm noktaları arasındaki maksimum aralığı ve $\|\cdot\|_{\infty}$, $[a, b]$ aralığında sonsuz normu belirtir.

Hem lineer hem de Hermite kübik spline fonksiyonların her ikisi de yerel yaklaşımlardır. Bir düğüm noktası x_{i-1} ile x_i arasındaki bir x noktasındaki spline değeri, yalnızca bu iki düğümdeki fonksiyonun ve ve türevlerinin değerlerine bağlıdır. Öte yandan, doğal kübik spline interpolasyonu bir global yaklaşım olup daha genel bir spline türüne aittir. Düğüm noktalarından birinde $f(x_k)$ değerindeki bir değişiklik denklem sistemini değiştirecektir. Bu durum $[x_0, x_m]$ aralığı boyunca spline fonksiyonların değişmesine neden olur.

KÜBİK SPLINE FONKSİYONLAR İÇİN TABAN FONKSİYONLARI

Bu bölümde, kübik spline fonksiyonlar için temel fonksiyonlar kümesinin nasıl oluşturulacağını ifade edeceğiz. Spline fonksiyonlar için kullanılan temel fonksiyonlar genellikle B-spline fonksiyonlar olarak bilinir(de Boor, 2001). Bu anlamda, temel spline fonksiyonlar lineer B-spline fonksiyonlar ile başlar. Burada kübik B-spline fonksiyonlara odaklanılacaktır. İşlemlerin daha kolay anlaşılabilmesi için düğüm noktalarının eşit aralıklarla yerleştirildiği varsayılacaktır.

Buna göre, $h > 0$ için

$$x_k = kh, k = 0, 1, \dots, n+1$$

şeklinde düğüm noktaları oluşturulacaktır.

Tanım : $n \geq 1$ olsun. $f(x) = (x - a)^n$ fonksiyonunun pozitif parçası aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$(x - a)_+^n = \begin{cases} (x - a)^n, & x \geq a, \\ 0, & x < a. \end{cases}$$

Açıkça görülmektedir ki $(x - x_k)_+^n$ fonksiyonu n -inci dereceden bir spline fonksiyondur. Bu fonksiyonun x_k düğüm noktalarında $n-1$ -inci mertebeye kadar türevleri sıfırdır. Fakat n -inci mertebeden türevi $x = x_k$ noktasında süreksizdir.

Önerme : Kabul edelim ki $P, n \geq 1$ derecesinde $x \in R$ değişkenine bağlı bir polinom olsun. Her $r = 1, 2, \dots, n$ için $Q_{(r)}$ fonksiyonu aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$Q_{(r)}(x) = \sum_{k=0}^r (-1)^k \binom{r}{k} P(x - kh)$$

bu ise $n - r$ inci dereceden bir polinom olup $Q_{(n+1)}(x) \equiv 0$ 'dır.

İspat : $Q_{(1)}(x) = P(x) - P(x - h)$ olduğundan $Q_{(1)}$, $n - 1$ inci dereceden bir polinomdur. Şimdi kabul edelim ki bazı $r > 0$ için $Q_{(r)}$, $n - r$ inci dereceden bir polinom olduğundan $Q_{(r)}(x) - Q_{(r)}(x - h)$ ifadesi $n - r - 1$ inci dereceden bir polinomdur. Fakat;

$$\begin{aligned} Q_{(r)}(x) - Q_{(r)}(x - h) &= \sum_{k=0}^r (-1)^k \binom{r}{k} [P(x - kh) - P(x - (k + 1)h)] \\ &= P(x) + (-1)^{r+1} P(x - (r + 1)h) + \\ &\quad \sum_{k=1}^r (-1)^k \left[\binom{r}{k} + \binom{r}{k-1} \right] P(x - kh) \\ Q_{(r)}(x) - Q_{(r)}(x - h) &= \sum_{k=0}^{r+1} (-1)^k \binom{r+1}{k} P(x - kh) \\ &= Q_{(r+1)}(x) \end{aligned}$$

Binom katsayılarının standart özelliklerinden dolayı, $Q_{(r+1)}$ $n - r - 1$ inci dereceden bir polinomdur. Sonuç olarak $Q_{(n)}$ 'in sıfırıncı dereceden bir polinom olduğu ve bu yüzden R üzerinde sabit olduğu söylenebilir. Aynı mantık ile hareket edilerek $Q_{(n+1)}$ 'in de R üzerinde sıfıra özdeş olduğu gösterilebilir.

Teorem: Her $n \geq 1$ için $S_{(n)}$ fonksiyonu

$$S_{(n)}(x) = \sum_{k=0}^{n+1} (-1)^k \binom{n+1}{k} (x - kh)_+^n$$

şeklinde tanımlı olup eşit aralıklı düğüm noktaları üzerinde n-inci dereceden spline fonksiyon olarak tanımlanır. kh düğüm noktaları uzunluğu olarak alınmaktadır. Burada $k = 0, 1, \dots, n+1$ alınır. $S_{(n)}(x)$ fonksiyonunun $n-1$ inci mertebeden türevleri süreklidir ve $(0, (n+1)h)$ aralığı dışında bu değerler sıfıra eşittir (Süli & Mayers, 2003).

İspat : $S_{(n)}$ fonksiyonu spline fonksiyondur. $S_{(n)}(x)$, $x \leq 0$ için sıfıra özdeşdir. $x \geq (n+1)h$ olduğunda ise tüm negatif olmayan kısımlar $x - kh$ değerine göre belirlenir. ($k = 0, 1, \dots, n+1$) Bu durumda

$$S_{(n)}(x) = \sum_{k=0}^{n+1} (-1)^k \binom{n+1}{k} (x - kh)_+^n$$

ifadesi özdeş olarak sıfıra eşit olur. Burada $n=1$ alınırsa, $S_{(1)}(x) = x_+ - 2(x-h)_+ + (x-2h)_+$ elde edilir. $1/h$ ile normalleştirdikten sonra maksimum değeri 1 olur ve $x=0$ noktasını $x = x_{k-1}$ noktasına kaydırır. Bu durumda φ_k lineer şapka fonksiyonu aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\varphi_k(x) = \frac{1}{h} S_{(1)}(x - x_{k-1})$$

$1 \leq k \leq n$ için bu şapka fonksiyonu iki ardışık aralık olan $(x_{k-1} - x_k]$ ve $[x_k - x_{k+1})$ aralıkları üzerinde sıfırdan farklı değer alır. Benzer şekilde $n=3$ alınarak kübik spline baz fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilir:

$$S_{(3)}(x) = x_+^3 - 4(x-h)_+^3 + 6(x-2h)_+^3 - 4(x-3h)_+^3 + (x-4h)_+^3$$

Normalleştirdikten sonra maksimum değeri 1 olur ve $x = 0$ noktasını $x = x_{k-2}$ noktasına kaydırır. Bu durumda φ_k lineer şapka fonksiyonu aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\vartheta_k(x) = \frac{1}{4h^3} S_{(3)}(x - x_{k-2})$$

$2 \leq k \leq n-1$ için bu şapka fonksiyonu dört ardışık aralık olan $(x_{k-2}, x_{k-1}]$, $[x_{k-1}, x_k]$, $[x_k, x_{k+1}]$, $[x_{k+1}, x_{k+2})$ aralıkları üzerinde sıfırdan farklı değer alır.

φ_k ve ϑ_k şapka fonksiyonlarının her ikisi de her x için negative olmamaktadır. $n \geq 1$ olacak şekilde dereceye sahip her spline taban fonksiyonu için aynı durum geçerlidir.

$[a, b]$ kapalı ve sınırlı bölgesi üzerinde sonlu düğüm noktalarının $a = x_0 < x_1 < \dots < x_m = b$ şeklinde tanımlı kümesi için normalleştirilmiş lineer taban spline fonksiyonları $[a, b]$ üzerindeki her x değeri için $S_{(n)}(x) = \varphi_0(x)$ ve $S_{(n)}(x) = \varphi_{n+1}(x)$ şeklinde düşünülebilir.

SONUÇ

Bu bölümde Hermite kübik spline fonksiyonlar yardımıyla parçalı polinom yaklaşımı yapılarak interpolasyon işlemlerinin nasıl ilerleyeceği hususunda genel bilgiler verilmiştir (Axelson, 1996; Braess, 2001). Bu konuda daha başarılı ilerleyebilmek için sayısal yöntemlerde ifade edilen interpolasyon konusunun detaylı ele alınarak özellikle spline fonksiyonlar üzerine çalışmaların incelenmesi yararlı olacaktır. Günümüzde yapılmakta olan çalışmalar incelendiğinde Hermite polinomları ile birçok başarılı çalışmanın gerçekleştirildiği de görülebilir.

REFERANSLAR

- Ahlberg, J. H., Nilson, E. N., & Walsh, J. L. (1967). The theory of splines and their applications. Mathematics in Science and Engineering (Vol. 38). Academic Press.
- Axelson, O. (1996). Iterative solution methods. Cambridge University Press.
- Braess, D. (2001). Finite elements. Cambridge University Press.

de Boor, C. (2001). A practical guide to splines (Revised ed.). Springer Applied Mathematical Sciences (Vol. 27). Springer.

Hildebrand, F. B. (1956). Introduction to numerical analysis. McGraw–Hill.

Iserles, A. (1996). A first course in the numerical analysis of differential equations. Cambridge University Press.

Powell, M. J. D. (1996). Approximation theory and methods. Cambridge University Press.

Rabinowitz, P. (1978). A first course in numerical analysis. McGraw–Hill.

Schumaker, L. L. (1981). Spline functions: Basic theory. John Wiley & Sons.

Süli, E., & Mayers, D. F. (2003). An introduction to numerical analysis. Cambridge University Press.

Nonlinear Diferansiyel Denklemlerin Subdomain Yöntemiyle Çözümü

Birkan DURAK^{1*}

Erol UZAL²

¹ İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Uçak Teknolojisi Programı, birkand@iuc.edu.tr, ORCID No: 0000-0002-8196-5407

² İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, euzal@iuc.edu.tr, ORCID No: 0000-0003-0008-1376

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Birkan DURAK , birkand@iuc.edu.tr

ÖZET

Mühendislik ve doğa bilimlerindeki kaotik süreçler ve bazı problemler lineer olmayan diferansiyel denklemlerle ifade edilirler. Her ne kadar bazı değişken değiştirmeler veya çeşitli kabuller sayesinde nonlinear denklemler lineer hale getirilerek çözülebilsen de bu tekniklerin her tür probleme uygulanmasında önemli sorunlarla karşılaşılabilir. Bu noktada sayısal yöntemlerle çözümler bulmak gerekecektir.

Bu çalışmada lineer olmayan başlangıç ve sınır değer problemlerinin yaklaşık çözümleri ağırlıklı kalanlar yöntemlerinden birisi olan subdomain (alt bölge) yöntemiyle bulunmuştur. Test problemlerinde verilmiş olan diferansiyel denklemler homojen ve lineer olmayan bir denklem sistemine dönüştürülmüş ve ardından bu sistemin çözümü ile yaklaşık çözüm katsayılarının hesaplanmıştır.

İncelenen test problemlerine göre alt bölge yöntemiyle bulunan çözümlerde nokta bazında yapılan mutlak hatalar yeterince küçük olmaktadır. Alt bölge sayısının artırılması bu hataları azaltmaktadır. Yöntem sayesinde bir problemin analitik çözümü bulunabilmiştir. Subdomain yönteminde kullanılan integraller simgesel matematik yazılımları ile hesaplanmıştır. Polinomları yaklaşık çözüm olarak seçmek bu yöntemde işlem kolaylığı sağlamaktadır. Bu sayede basit algoritmalar ile yaklaşık çözümler elde edilmiştir.

Problemlerin lineer olmaması yaklaşık çözüm katsayılarının değerlerinin birden fazla olması durumuna sebep olmaktadır. En küçük reel katsayılar kullanılarak oluşturulan yaklaşık çözümdeki mutlak hatalar daha azdır.

Lineer olmayan diferansiyel denklemi göz önüne alınan alt bölgelerde yararlanarak sadece önerilen yaklaşık çözümün katsayılarına bağlı nonlinear bir denklem sistemine dönüştürerek çözmeye yarayan yöntem ile uygun çözümler elde edilebilmiştir. Subdomain (Alt bölge) yöntemi ilerleyen çalışmalarda kesir türevli lineer, nonlinear diferansiyel denklem ya da denklem sistemlerine uygulanabilir.

Anahtar Kelimeler – Subdomain, Ağırlıklı Kalanlar, Yaklaşık Çözüm, Sayısal Analiz, Nonlinear Diferansiyel Denklem.

GİRİŞ

Lineer olmayan diferansiyel denklemlerle mühendislik, fizik, kimya biyoloji vb. çeşitli bilim dallarındaki problemlerin incelenmesi sırasında karşılaşılır. Örneğin akışkanlar mekaniğinde Blasius denklemi sabit tek yönlü bir akışa paralel tutulan yarı sonsuz bir plaka üzerindeki oluşan kararlı iki boyutlu laminar sınır tabakayı tanımlar. Bu problemin çözümü için çeşitli

sayısal yöntemler geliştirilmiştir. Mevcut çalışmada öncelikle Subdomain (Alt bölge) yöntemi tanıtılmıştır. Ardından yöntem literatürden alınan çeşitli nonlinear diferansiyel denklemlerin yaklaşık çözümünü bulmakta kullanılmıştır.

1- Subdomain (Alt bölge) Yöntemi

Homojen olmayan nonlinear bir sınır değer problemi x' e bağlı değişken y olmak üzere

$$\begin{aligned} y^{(m)} + y^k + f(x, y, y', \dots, y^{(m-1)}) &= 0 \\ y(x_1) &= a \\ y(x_2) &= b \end{aligned} \quad (1)$$

şeklinde gösterilebilir. Bu denklemde $y^{(m)}$ bağımlı değişkenin x' e göre m . türevini gösterirken y^k terimi ise değişkenin k . kuvvetini göstermektedir. (1) numaralı denkleme subdomain (alt bölge) yöntemi uygulanırken problemin yaklaşık çözümünün

$$y_{yaklaşık} = \sum_{n=0}^N C_n x^n \quad (2)$$

olduğu kabul edilerek denklem (1)'e yazılır ve kalan

$$R(x) = y_{yaklaşık}^{(m)}(x) + y_{yaklaşık}^k(x) + g(x) \quad (3)$$

şeklinde bulunur. Denklem (3)'teki $C_0, C_1, C_2, C_3, \dots, C_N$ katsayılarının bulunması için aşağıdaki eşitliğin meydana getireceği homojen denklem sistemi kurularak çözümlenmelidir.

$$\int_{x_i}^{x_{i+1}} R(x) dx = 0 \quad , \quad x_i, x_{i+1} \in (x_1, x_2) \quad (4)$$

Denklem (4)'te bilinmeyen C_N katsayısı kadar denklem vardır ve kurulan bu nonlinear denklem sistemi bilinen yöntemlerden birisiyle çözümlenmelidir.

2- Yöntemin Diferansiyel Denklemlerin Çözümüne Uygulanması

Yöntemi aşağıda verilen başlangıç değer problemine uygulayalım (Hermann ve Saravi, 2016)

$$\begin{aligned} y''(x) + y^2 &= 0 \\ y(0) &= 1 \end{aligned} \quad (5)$$

Bu problemin gerçek çözümü $y(x) = \frac{1}{(1+x)}$ dir. Yaklaşık çözümün

$$y = \sum_{n=0}^5 C_n x^n \quad (6)$$

şeklinde olduğu kabul edilsin. Denklem (5) daki başlangıç değer şartı uygulanırsa denklem (6) ile verilen yaklaşık çözümün

$$y = 1 + \sum_{n=1}^2 C_n x^n \quad (7)$$

olacağı sonucuna ulaşılır. Denklem (7) daki bilinmeyen C_1, C_2, C_3 ve C_4 katsayılarının bulunması için dört adet denkleme ihtiyaç vardır. Bunun için öncelikle problemdeki bağımsız değişken için $0 < x < 1$ olduğu kabul edilir. Ardından bu aralık beş alt bölgeye bölünür. Bu problem için kalan denklem (8) deki gibidir.

$$R(x) = C_1 + 2xC_2 + 3x^2C_3 + 4x^3C_4 + 5x^4C_5 + (1 + xC_1 + x^2C_2 + x^3C_3 + x^4C_4 + x^5C_5)^2 \quad (8)$$

Böylece yöntemde kullanılacak olan integraller sırasıyla

$$\begin{aligned} &\int_0^{0.2} R(x)dx \\ &\int_{0.2}^{0.4} R(x)dx \\ &\int_{0.4}^{0.6} R(x)dx \\ &\int_{0.6}^{0.8} R(x)dx \\ &\int_{0.8}^1 R(x)dx \end{aligned} \quad (9)$$

olacaktır. Denklem (9) daki her bir ifade sıfıra eşitlenerek oluşturulan denklem sisteminin çözümü ile yaklaşık çözümdeki katsayılar aşağıdaki gibi bulunur.

$$\begin{array}{ll} C_1 = -24.609 & C_1 = -0.996 \\ C_2 = 257.491 & C_2 = 0.952 \\ C_3 = -920.459 & C_3 = -0.770 \\ C_4 = 1336.347 & C_4 = 0.418 \\ C_5 = -676.799 & C_5 = -0.105 \end{array} \quad (10)$$

Bu katsayılardan en küçük olanlarının bulunduğu ikinci grup problem için uygun yaklaşık çözümü verecektir. O halde çözüm

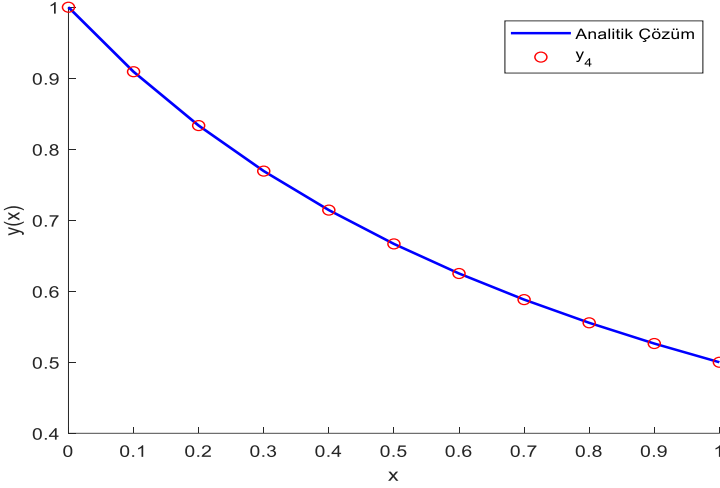
$$y_5(x) = -0.105x^5 + 0.418x^4 - 0.770x^3 + 0.952x^2 - 0.996x + 1 \quad (11)$$

olmaktadır. Ayrıca altıncı ve yedinci dereceden polinomlar kullanılarak elde edilen yaklaşık çözümler sırasıyla

$$y_6(x) = 0.07x^6 - 0.31x^5 + 0.66x^4 - 0.89x^3 + 0.98x^2 - 0.99x + 1 \quad (12)$$

$$y_7(x) = -0.04x^7 + 0.24x^6 - 0.55x^5 + 0.82x^4 - 0.95x^3 + 0.99x^2 - 0.99x + 1 \quad (13)$$

şeklindedir. Şekil 1 de kesin çözüm ve önerilen beşinci dereceden yaklaşık çözüm karşılaştırılmıştır.



Şekil 1: Birinci başlangıç değeri problemi için kesin ve yaklaşık çözümler

Tablo 1 de ise yaklaşık çözümde yapılan mutlak hatalar farklı x değerleri ve çeşitli alt bölgeler için verilmiştir. Tablodaki N çözüm için kullanılan alt bölge sayısını göstermektedir.

Tablo 1: Birinci başlangıç değeri problemi için yaklaşık çözümde yapılan mutlak

x	hatalar		
	Mutlak Hatalar		
	N=5	N=6	N=7
0.0	0.000000	0.000000	0.000000
0.1	7.01x10 ⁻⁵	1.11x10 ⁻⁵	1.50x10 ⁻⁶
0.2	1.76x10 ⁻⁵	6.57x10 ⁻⁶	1.39x10 ⁻⁶
0.3	3.71x10 ⁻⁵	3.94x10 ⁻⁵	2.48x10 ⁻⁷
0.4	8.66x10 ⁻⁶	3.82x10 ⁻⁷	2.01x10 ⁻⁷
0.5	7.13x10 ⁻⁶	1.76x10 ⁻⁶	5.54x10 ⁻⁷
0.6	9.06x10 ⁻⁶	3.35x10 ⁻⁶	1.10x10 ⁻⁷
0.7	2.71x10 ⁻⁵	4.32x10 ⁻⁷	1.49x10 ⁻⁷
0.8	4.34x10 ⁻⁶	1.27x10 ⁻⁶	8.30x10 ⁻⁷
0.9	4.96x10 ⁻⁵	1.02x10 ⁻⁵	1.20x10 ⁻⁶
1.0	1.09x10 ⁻⁵	1.57x10 ⁻⁷	3.77x10 ⁻⁷

Subdomain yöntemi yüksek mertebeden başlangıç değer problemlerine de uygulanabilir (Hosseini, vd., 2015).

$$y''(x) + \frac{2}{x} y'(x) + y^5$$

$$y(0) = 1 \quad y'(0) = 0 \quad (14)$$

Bu problem için çözüm

$$y_{gerçek} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{x^2}{3}}} \quad (15)$$

şeklinde dir. Bu problemin başlangıç değerlerini de sağlayan yaklaşık çözümü üçüncü dereceden bir polinom olarak aşağıdaki gibi olsun

$$y(x) = 1 + \sum_{n=2}^3 C_n x^n \quad (16)$$

Buna göre kalan

$$R(x) = 2C_2 + 6xC_3 + \frac{2(2xC_2 + 3x^2C_3)}{x} + (1 + x^2C_2 + x^3C_3)^5 \quad (17)$$

olacaktır. C_2 ve C_3 katsayılarını verecek olan denklem sistemi ise iki alt bölge kullanılarak kurulur ve çözülürse yaklaşık çözüm

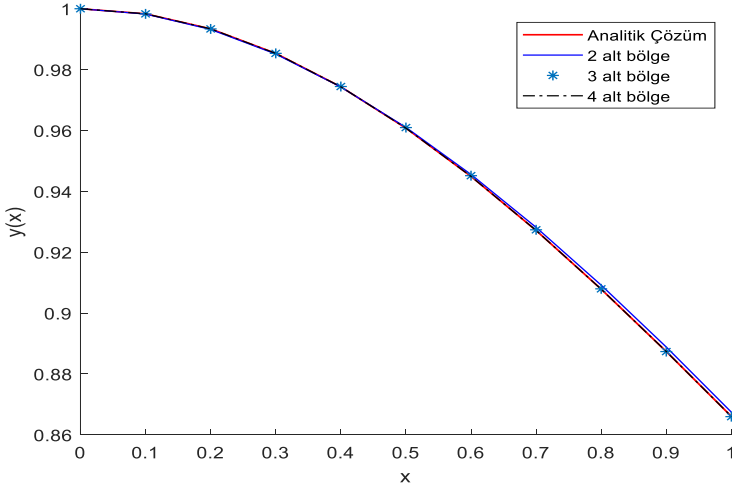
$$y_2(x) = 0.0467493689764375x^3 - 0.179323576897046x^2 + 1 \quad (18)$$

şeklinde bulunur. Bu problemde integraller üç ve dört altbölge kullanılarak hesaplanırsa bulunacak yaklaşık çözümler sırasıyla

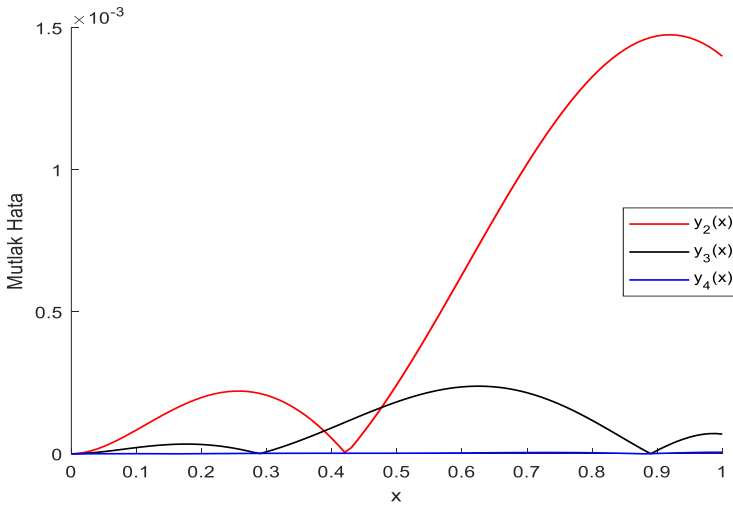
$$y_3(x) = 0.01517229x^4 + 0.0215385721x^3 - 0.17075520x^2 + 1 \quad (19)$$

$$y_4(x) = -0.015867x^5 + 0.050645x^4 - 0.0022x^3 - 0.16647x^2 + 1 \quad (20)$$

olacaktır. Şekil 2 de iki alt bölge için bulunan yaklaşık çözüm kesin çözümle karşılaştırılmıştır. Şekil 3 ise farklı alt bölgeler için yapılan mutlak hataları göstermektedir.



Şekil 2: İkinci başlangıç değer problemi için kesin ve yaklaşık çözümler



Şekil 3: İkinci başlangıç değer problemindeki mutlak hatalar

Subdomain yöntemi sınır değer problemlerine de uygulanabilir. Bunun için aşağıda verilen nonlinear diferansiyel denklemini inceleyelim (Yarcı, 2008).

$$y''(x) - \frac{1}{2}y^3(x) = 0$$

$$y(1) = \frac{2}{3} \quad , \quad y(3) = \frac{2}{5}$$

(21)

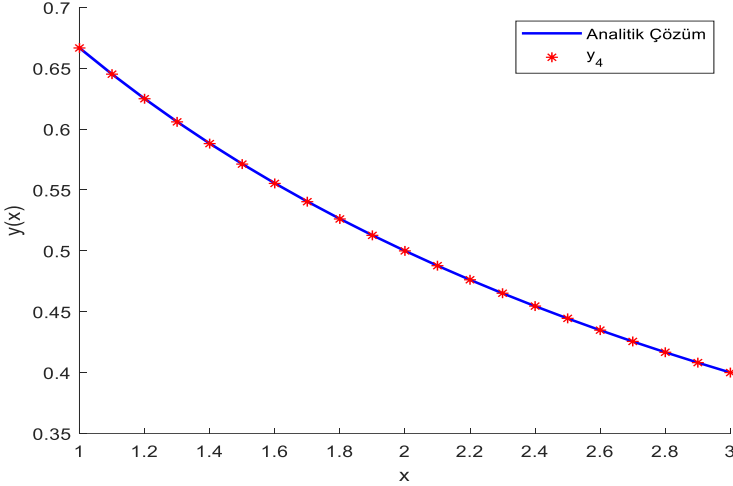
Bu problemin analitik çözümü $\frac{2}{2+x}$ dir. Problemin yaklaşık çözümü dördüncü dereceden bir polinom olarak kabul edilir ve ardından sınır değer şartları uygulanırsa

$$y(x) = \left(\frac{4}{5} + 3C_2 + 12C_3 + 39C_4\right) + \left(-\frac{2}{15} - 4C_2 - 13C_3 - 40C_4\right)x + \sum_{n=2}^4 C_n x^n \quad (22)$$

çözümüne ulaşılır. Bu denklemdeki C_2, C_3, C_4 katsayılarının bulunması için 3 alt bölge seçilir ve gerekli işlemler yapılarak yaklaşık çözüm

$$y_4(x) = 0.0021751894511698x^4 - 0.026197357845716x^3 + 0.13617593227665x^2 - 0.4244789884924x + 0.9789918912769 \quad (23)$$

olarak bulunur. Bu problem için çözümlerin karşılaştırılması Şekil 4 ile verilirken yaklaşık çözümdeki mutlak hatalar Tablo 2 de verilmiştir.



Şekil 4: Üçüncü problem için analitik ve yaklaşık çözümler

Tablo 2: Birinci Sınır değer problemi için yaklaşık çözümde yapılan mutlak hatalar

x	$y_{Analitik}$	$y_{yaklaşık}$	Mutlak Hata
1.0	0.666667	0.666667	1.11×10^{-16}
1.2	0.625000	0.624952	4.81×10^{-5}
1.4	0.588235	0.588097	1.38×10^{-4}
1.6	0.555556	0.555387	1.68×10^{-4}
1.8	0.526316	0.526191	1.24×10^{-4}
2.0	0.500000	0.499962	3.81×10^{-4}
2.2	0.47619	0.476235	4.48×10^{-5}
2.4	0.454545	0.454631	8.55×10^{-5}
2.6	0.434783	0.434852	6.93×10^{-5}
2.8	0.416667	0.416685	1.82×10^{-5}
3.0	0.400000	0.400000	1.11×10^{-16}

Başka bir örnek için farklı araştırmacılarca çalışılan aşağıdaki problem incelensin (Jafari ve Daftardar-Gejji, 2006; Ertürk ve Momani, 2007).

$$\begin{aligned} y''(x) + y^2(x) &= x^4 + 2, & 0 < x < 1 \\ y(0) &= 0, \quad y(1) = 1 \end{aligned} \quad (24)$$

verilen denklemin analitik çözümü x^2 dir. Yöntem uygulanırken beşinci dereceden bir polinom yaklaşık çözüm olarak kabul edilirse, integraller üç alt bölgeye ayrılarak hesaplanır ve ardından bulunan denklem sisteminin çözülmesiyle yaklaşık çözümdeki katsayılar bulunacaktır. Buna göre subdomain yöntemiyle yaklaşık çözüm x^2 olarak bulunur ki bu aynı zamanda analitik çözümdür.

Subdomain yöntemi nonlinear ve değişken katsayılı diferansiyel denklemlere de uygulanabilir. Aşağıdaki problem bu yöntemle çözülsün. (Yanfei vd., 2020).

$$\begin{aligned} y''(x) - \frac{y^3 - 2y^2}{2x^2} &= 0 \\ y(1) &= 1, \quad y(2) = \frac{4}{3} \end{aligned} \quad (25)$$

Problemin analitik çözümü $\frac{2x}{x+1}$ dir. Bu problemin yaklaşık çözümü

$$y(x) = \sum_{n=0}^4 C_n x^n \quad (26)$$

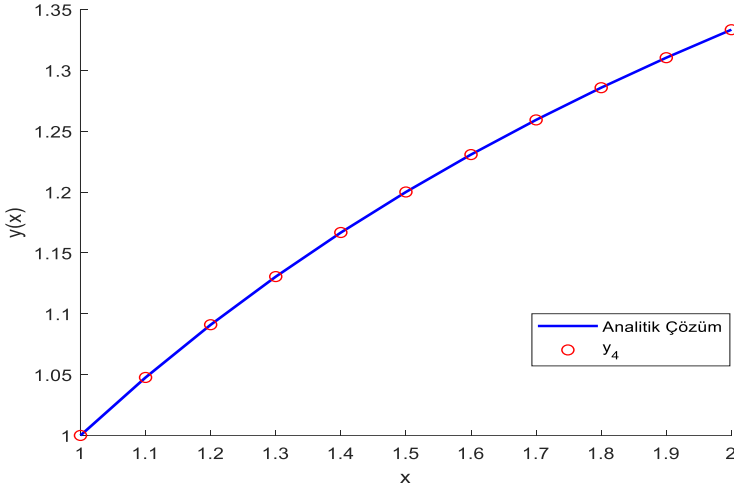
olsun bu çözüme denklem (25) ile verilen sınır şartları uygulanırsa çözüm

$$y(x) = \left(\frac{2}{3} + 2C_2 + 6C_3 + 14C_4\right) + \left(\frac{1}{3} - 3C_2 - 7C_3 - 15C_4\right)x + \sum_{n=2}^4 C_n x^n \quad (27)$$

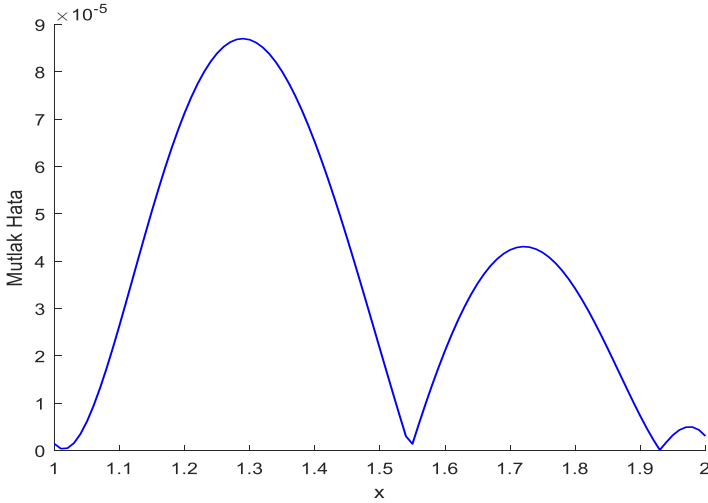
haline gelir. Bu çözüm denklem (25) te yerine yazılıp üç alt bölge kullanılması durumunda bulunan yaklaşık çözüm

$$y_4(x) = -0.0219245698848x^4 + 0.1867697891883x^3 - 0.6724115401238x^2 + 1.3720479776594x + 0.13551834316 \quad (28)$$

olmaktadır. Şekil 5 ve Şekil 6 sırasıyla çözümleri ve yapılan mutlak hataları göstermektedir.



Şekil 5: Son problem için analitik ve yaklaşık çözümler



Şekil 6: Son problemde meydana gelen mutlak hatalar

SONUÇ

Bu çalışmada lineer olmayan başlangıç ve sınır değer problemlerine Subdomain (alt bölge) yöntemiyle uygun yaklaşık çözümler bulunmuştur. Seçilen test problemleri göz önüne alındığında yöntemle problemler için nokta bazında yapılan mutlak hatalar yeterince küçük olmaktadır. Yöntem göz önüne alınan bir problemin analitik çözümünün bulunmasını da sağlamıştır. Subdomain yönteminde kullanılan integrallerin hesabı simgesel matematik yazılımlarıyla yapılmıştır. Alt bölge yöntemi süreksizliğe sahip malzeme titreşimlerini incelemekte ve ayrıca nonlinear denklem veya denklem sistemlerinin yaklaşık çözümlerini bulmakta da kullanılabilir.

REFERANSLAR

- Ertürk, V.S. and Momani, S. (2007). Differential transform method for obtaining positive solutions for two-point nonlinear boundary value problems, *International Journal: Mathematical Manuscripts*, 1(1). 65-72.
- Hermann, M. and Saravi, H. (2016). *Nonlinear ordinary differential equations : Analytical Approximation and Numerical Methods*. 1st ed.. India : Springer. ISBN: 8132238451
- Hosseini, S.Gh. and Abbasbandy, S. (2015). Solution of lane-emden type equations by combination of the spectral method and adomian decomposition method. *Mathematical Problems in Engineering*, Volume 2015, Article ID 534754
- Jafari, H. and Daftardar-Gejji, V. (2006). Positive solutions of nonlinear fractional boundary value problems using Adomian decomposition method, *Applied Mathematics and Computation*, 180(2), 700-706.
- Yanfei, L., Qingfei, Y., Hongyi, L., Hongli, S., Yunlei, Y. and Muzhou, H. (2020) Solving higher order nonlinear ordinary differential equations with least squares support vector machines, *Journal of Industrial And Management Optimization*, 16(3), 1481- 1502.
- Yarçı, H., (2008), On the Solutions of Non-Linear Boundary Value Problems , Yüksek Lisans Tezi, İzmir: Dokuz Eylül University Graduate School of Natural and Applied Sciences.

Ciğerotlarının (Marchantiophyta) İnsektisit Potansiyeli

Özcan ŞİMŞEK¹

1- Dr.Öğr.Üyesi.; Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Yenice MYO Ormancılık Bölümü.
ozcan.simsek@gmail.com ORCID No: 0000-0002-3210-7641

ÖZET

Böcekler (Insecta) 1 milyondan fazla tür ile doğada önemli bir biyolojik zenginlik kaynağı ve ekolojik dengenin vazgeçilmez bileşenleridirler. Tozlaşma, organik madde döngüsü, besin piramidindeki yerleri gibi önemli faydaları olmasının yanında tarım alanları ve ormanlarda ciddi ekonomik ve ekolojik zararlara sebep olabilmektedirler. Böcek zararlarına karşı kullanılan sentetik insektisitlerin ise birçok olumsuz etkisi bulunması nedeniyle biyolojik kökenli insektisit madde araştırmaları son yıllarda artış göstermektedir. İçerdikleri sekonder metabolitler sayesinde bitkiler alternatif çevreci insektisit potansiyeli taşıyan canlılardır. Bunlardan en eski ve basit yapılı karasal tohumlu bitkiler olan ciğerotları, içerdikleri yağ tanecikleri ve çeşitli sekonder metabolitler sayesinde böceklere karşı insektisit olarak kullanılabilecek ciddi bir potansiyele sahiptirler. Hazırlanan bu çalışma ile ciğerotları ile yapılan insektisit aktivite çalışmaları araştırılmış ve bu bitkilerin insektisit olarak kullanılma potansiyelleri ortaya konmuştur. Sonuç olarak ciğerotlarının insektisit aktiviteleri üzerine oldukça kısıtlı miktarda araştırma olduğu, buna rağmen mevcut araştırmaların neticelerinin incelenmesiyle ciğerotlarının önemli bir insektisit aktivite potansiyelinin bulunduğu görülmüştür. Bu konudaki araştırmaların ise artmasına ihtiyaç duyulduğu anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler – Ciğerotları, Marchantiophyta, Böcekler, Insecta, İnsektisit, Sekonder Metabolitler.

GİRİŞ

Böcekler (Insecta) yüksek tür çeşitliliği ve güçlü üreme potansiyelleri ile ekosistemlerin önemli bileşenleridirler. Her ne kadar böceklerin dünyadaki toplam tür sayısı kesin olarak bilinmese de taksonomistler tarafından bu rakam 750.000 ile 1.150.000 arasında olduğu kabul görmektedir. Dünyada yaklaşık 1.8 milyon tür olduğu düşünüldüğünde bunun yaklaşık 1 milyonunun böceklerden oluşuyor olması böceklerin ne derece önemli biyolojik çeşitlilik etmenleri olduğunu daha net ortaya koymaktadır (Kıyak, 2019).

Ekosistemlerin sürdürülebilirliği ve biyolojik dengenin sürekliliği için son derece kritik canlılar olan böceklerin önemli bazı özellikleri şu şekilde açıklanabilir:

1. Tozlaşma (Polinasyon)

Böcekler, özellikle arılar, kelebekler, sinekler ve böcek polinatörleri, tarımsal ürünlerin %75'inin tozlaşmasını sağlar. Bu tozlaşma hizmeti, gıda üretiminde milyarlarca dolarlık bir ekonomik değere sahiptir ve ekosistemlerin sürekliliği için kritik bir rol oynar (Klein vd, 2007).

2. Besin Zincirinin Temel Taşları

Böcekler, kuşlar, memeliler, amfibiler ve sürüngenler gibi birçok tür için ana besin kaynağıdır. Ekosistemlerdeki enerji transferinde önemli bir rol oynarlar (Wilson, 1987).

3. Organik Madde Dönüşümü

Böcekler, yaprak, odun ve diğer organik maddelerin parçalanmasını sağlayarak toprağın verimliliğini artırır. Karınca ve termitler gibi toprak böcekleri, karbon ve diğer besin maddelerinin döngüsünü hızlandırır (Lavelle vd, 1997).

4. Zararlı Kontrolü

Avcı ve parazitoit böcekler, tarım zararlılarını doğal yollarla kontrol eder. Örneğin, uğur böcekleri yaprak bitlerini tüketir, bu da pestisit kullanımını azaltabilir (Landis vd, 2000).

5. Biyoçeşitlilik ve Ekosistem Sağlığı

Böcekler, biyoçeşitliliğin en büyük bileşenlerinden biridir. Tanımlanmış 1 milyon türün yanında keşfedilmeyi bekleyen milyonlarca tür bulunmaktadır. Onların varlığı, ekosistemlerin sağlıklı işleyişi için bir gösterge olarak kabul edilir (Samways, 2005).

6. İnsanlık için Dolaylı Faydalar

Böcekler, ipek, bal, balmumu gibi ürünlerin üretilmesinde hayati öneme sahiptir. Ayrıca biyomedikal araştırmalarda (örneğin, *Drosophila* türleri genetik çalışmalarda yaygın olarak kullanılır) önemli bir yer tutar (Markow ve O'Grady, 2007).

Böcekler, ekosistemlerde önemli roller oynasalar da tarım, orman ve gıda depolama alanlarında çeşitli zararlara neden olabilirler. Akademik çalışmalardan elde edilen bulgulara göre, böceklerin başlıca zararları şunlardır:

1. Tarımsal Ürünlerde Verim ve Kalite Kaybı:

Tahıllarda ürünün depolaması esnasında hem verim hem de kalite bakımından ciddi kayıplar ortaya çıkmaktadır. Böcekler bu kayıplara neden olan etmenlerin başında gelmektedirler. Depo zararlısı olarak adlandırılan bu böcekler tahıl depolarında elverişli şartlar bulduğu zaman çok hızlı bir şekilde çoğalarak ciddi ürün kayıplarına sebep olmaktadır (Keskin ve Özkaya, 2013).

2. Orman Ekosistemlerine Zarar:

Ormanlarda zarar yapan böceklerin ekonomik etkileri üzerine yapılan değerlendirmelerde, böceklerin orman kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi üzerindeki olumsuz etkileri vurgulanmaktadır. Bu zararlılar, orman ekosistemlerinin dengesini bozarak ekonomik kayıplara yol açmaktadır (Öztürk, 2020).

3. Gıda Depolarında Ürün Kaybı:

Depolanan tahıllarda birçok böcek türü zarar yapabilmektedir. Zarar yapan bu böceklerden bazıları dünya genelinde çok yaygındır. Bu sebeple küresel pazarda ciddi ekonomik zararlara sebep olabilmektedirler. Böcek türü depolanan ürünün özelliği, depolama süresi ve depo şartlarına bağlı olarak

zarar gören ürün oranı yaklaşık %2–50, çoğunlukla da %10–30 arasında değişebilmektedir. (Keskin ve Özkaya, 2013).

Bu şekilde değerlendirildiğinde böceklerin tarım, orman ve gıda depolama alanlarında ciddi ekonomik ve ekolojik zararlara neden olabileceğini söylemek mümkündür. Örneğin toprak kökenli patojenler arasında bulunan bitki paraziti nematodlarının dünya genelindeki tarımsal üretimde yılda yaklaşık 118 milyar \$ kayba neden olduğu tahmin edilmektedir (Atkinson ve ark., 2012). Sebzelede kök-ur nematodlarının ciddi miktarda verim kayıplarına sebep olduğu ve bu kayıpların %15’ten %85’e kadar çıkabildiği bildirilmektedir (Anonim, 2008; Aydın ve Mennan, 2016). Sebzelede bu nematodların oluşturduğu zararla ilgili yapılmış olan araştırmalar hıyarda %88 oranında, domateste %60 oranında, patlıcan, karpuz, kavun, kabak, biber, marul gibi ürünlerde de %18’den %60’a kadar değişen oranlarda verim kaybı olduğu bildirilmiştir (Netscher ve Sikora, 1990).

Bir tarım ülkesi olan Türkiye’nin yüz ölçümünün 23,3 milyon hektarlık kısmı (%29,7’ si) tarım yapmaya uygun özelliktedir. Tarım alanlarımızın 15,5 milyon hektar kısmı (%66,4’ ü - nadas alanları hariç) tarla tarımına ayrılmıştır. Bu alanın da yaklaşık 11,1 milyon hektarlık kısmında (%71) hububat tarımı yapılmaktadır. Hububat ekilen alanların içinde %69 oranla buğday ilk sırada, arpa %22 oranla ikinci sırada ve mısır %6’ oranla üçüncü sırada bulunmaktadır (Toğantimur, 2019).

Bununla birlikte ülkemizin orman varlığı 2023 yılı itibari ile 23.363.071 hektar olup bunların %47’si ibreliler, %32’si geniş yapraklılar, %21’i ise karışık ormanlardan oluşmaktadır. Bu ormanlarda başta kabuk böcekleri olmak üzere çeşitli böcek zararları görülmekte ve Orman Genel Müdürlüğüne (OGM) böcek zararlarına karşı çeşitli mücadele yöntemleri kullanılmaktadır. OGM 2023 istatistiklerine göre orman zararlıları ve hastalıkları ile mücadele amacıyla Türkiye genelinde 53.961 ha alanda mekanik mücadele, 768 ha alanda kimyasal mücadele, 55.445 ha alanda biyoteknik mücadele ve 69.271 ha alanda biyolojik mücadele yöntemleri uygulanmıştır. Ayrıca 16.203 ha alana 38.116 kuş yuvası yerleştirilmiş, 74 ha alanda 60 adet karınca nakli gerçekleştirilmiş ve toplamda 824.945 adet yırtıcı üretimi yapılarak doğaya salınmıştır. Bu çalışmalar ile böceklerin popülasyonları kontrol altına alınarak zararları önlenmeye çalışılmıştır (URL 1).

Zararlı böcekleri veya diğer zararlı etmenleri öldürmek için kullanılan kimyasallara kullanıldığı canlıya göre çeşitli isimler verilmektedir. Pestisit, (Pesticide, Pest : Zararlı, Cide :Öldürmek) hastalık ve zararlıları öldürmek için kullanılan kimyasallara verilen genel bir isimdir. Tüm canlıları öldüren kimyasallar için Bitki korumada “Biocide” terimi kullanılır. Böcek öldürenlere İnsektisit, nematod öldürenlere Nematicide, kırmızı örümcek-akar öldürenlere Acaricide, mantar öldürenlere Fungisit, yabancı ot öldürenlere ise Herbisit, sümüklü böcek veya yumuşakça öldürenlere Molluscicide, bakteri öldürenlere Antibiyotik veya Bakterisit denir (Baloğlu, 2022).

Böceklerle karşı kullanılan insektisitler geniş spektrumlu etkiye sahip olmaları, insan sağlığına ve çevreye olan zararlı etkileri, toksisitelerinin yüksek olması, zor ve pahalı ilaç uygulamalarının olması, ihraç ürünlerinde kalıntıların bulunması sebebi ile geri gönderilmesi vb nedenlerden dolayı kimyasal mücadeleye alternatif yeni mücadele yöntemleri konusunda araştırmalar artmaya başlamıştır.

BRİYOFİTLER VE SEKONDER METABOLİTLER

Bitkilerin birçoğu zengin biyoaktif fitokimyasallar içermektedirler. Bu özellikleri nedeniyle insektisitlere alternatif böcek ilacı potansiyelleri olduğu düşünülmektedir. Zengin tür çeşitliliğine sahip olan bitkiler, zararlılara karşı kullanılabilecek ilaç potansiyeline sahip biyokimyasal maddelerin geniş bir yelpazesini barındıran önemli bir kaynaktır. Yapılan araştırmalar, 2000'den fazla bitki türünün biyopestisit olarak kullanılma potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymuştur (Ahmed ve Grainge, 1988; Prakash ve Rao, 1996; Öncüer, 2000). Pestisit olma özelliği taşıyan bileşikler; ham bitki materyalleri, bitkilerden elde edilen saf bileşikler ya da çeşitli çözgenler ve metotlarla elde edilen bitki ekstraktları gibi farklı biçimlerde bulunabilirler. Bitkilerdeki biyokimyasal süreçlerin bir ürünü olan sekonder metabolitler, bitkiler ile zararlılar arasındaki etkileşimlerde kritik bir role sahiptir. Shanker ve Solanki (2000), bu sekonder metabolitler arasında alkaloidler, glikozitler, terpenoidler, taninler, fenoller ve saponinlerin en önemlileri olduğunu vurgulamıştır.

Dünya üzerinde yaşayan hemen hemen tüm organizmalar için primer metabolitler hayati öneme sahiptir ve primer metabolizma süreçleri sayesinde üretilirler. Karbonhidratlar, lipidler, proteinler, nükleotidler, trikarboksilik asit fotosentetik pigmentler, döngüsü ara ürünleri ve lignin primer metabolitlere örnek olarak verilebilir. Briyofitlerin primer metabolizmaları ile damarlı bitkilerin primer metabolizmaları arasında birçok benzerlik bulunmaktadır. Her iki bitki grubunun hücre duvarlarında selüloz, esansiyel bileşikler, klorofil a ve b, lipidler, temel karotenoidler, nükleik asitler ve nişasta yer alır. Bryofitler üzerinde yapılan araştırmalar, bu bitkilerin yapılarında lignin benzeri aromatik bileşikler, karbonhidratların ve amino asitlerin bulunduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, briyofitlerin sekonder bileşenleri arasında aromatik bileşikler, terpenoidler ve yağ asitleri yer almaktadır (Serin, 2007).

Bitkilerin temel yaşamsal süreçlerine doğrudan etkisi olmayan sekonder metabolitler, primer metabolitler kadar bitkinin hayatta kalması açısından önemli bileşiklerdir. Sekonder metabolitlerin bitkilerde üstlendiği temel görevler şunlardır:

1. Bitkilerde strese neden olan kuraklık, UV ışınları, tuzluluk vb çevresel etkilere direnme.

2. Mantar ve bakteri gibi patojenlere karşı savunma.

3. Sürünge ve böcek gibi hayvanlara karşı savunma.
4. Kimi ekolojik işlevler için diğer bazı metabolik ihtiyaçları karşılama.

Sekonder metabolitler, biyosentetik olarak primer metabolitlerden türetilir ve bitkilerdeki dağılımları genellikle belirli bir taksonomik gruba özgüdür (Oskay vd. 2009). Bitkilerin önemli bir bölümü fenolik yapıdaki aromatik maddeler üretmektedir. Bu maddeler, genellikle mikroorganizmalara, böceklerle ve otçul hayvanlara karşı savunma mekanizmasının bir parçası olarak işlev görmektedir. Sentezlenen kimyasalların bir kısmı, örneğin terpenoidler, bitkilere koku kazandırırken; diğer bileşikler bitkinin tadını belirlemekte veya tıbbi amaçlarla kullanılmasına olanak sağlamaktadır (Altuner, 2008).

Karayosunları, ciğerotlarını ve boynuzotlarını kapsayan geniş bitki grubuna Briyofit denmektedir. Eğrelti otları, mantarlar, algler ve çiçekli bitkilerle karşılaştırıldığında, Briyofitlerin alglerden ve mantarlardan daha karmaşık, çiçekli bitkiler ve eğrelti otlarından ise daha ilkel yapıda oldukları kabul edilmektedir (Erdağ ve Kürschner, 2017). Ciğerotlarının bilinen ilk fosil kaydı, *Metzgeriothallus sharonae* türüne ait olup, bu fosil günümüzden yaklaşık 400 milyon yıl öncesine (Orta Devoniyen) ait tallussu bir ciğerotudur (Hernick vd. 2008). Briyofitler, karasal bitkiler arasında tohumlu bitkilerden sonra en fazla taksonu barındıran ikinci büyük grubu oluştururlar. Briyofitler üç bölüm olarak sınıflandırılırlar. Bu bölümler Bryophyta (karayosunları), Marchantiophyta (ciğerotları) ve Anthocerotophyta (boynuz otları) şeklinde adlandırılmaktadırlar.

Briyofitler, tür sayısı geniş olan ve tür çeşitliliği yüksek olan bir bitki grubudur. Tür sayılarına bakıldığında yaklaşık olarak 11.000 ila 13.000 karayosunu taksonu, 7.000 ila 9.000 ciğerotu taksonu ve 200 ila 250 boynuzotu taksonu barındıran, dünya genelinde ise toplamda 18.000 - 23.000 tanımlanmış tür olduğu tahmin edilen briyofitler tür zenginliği bakımından çiçekli bitkilerden sonra ikinci büyük bitki grubudur (Cemek ve Keçeli, 2024).

Briyofitlerin çoğunun acı bir öz ya da sıvı içerdiği tahmin edilmekte ve bu nedenle bazı türler oldukça acı bir tada sahiptirler. Muhtemelen bu özden dolayı, bazı briyofitlerin alerjik kontakt dermatite yol açabileceği bildirilmiştir (Asakawa, 2001). Briyofitler, çok çeşitli ve nadir bileşikler barındırmaktadırlar. Bu bitkilerden elde edilen ekstrelerin pek çoğunun, in-vitro koşullarda farklı seviyelerde antibakteriyel, antifungal ve antikanser etkiler gösterdiği tespit edilmiştir (Scher ve ark., 2004). Ayrıca, briyofitlerin dikkat çeken bir diğer özelliği, böcek larvaları, bakteriler, mantarlar, salyangozlar ve memeliler tarafından zarar görmemeleri olarak rapor edilmiştir (Asakawa, 2001; Asakawa ve ark., 2013).

Ciğerotları (Marchantiophyta), bryofitlerin bir grubu olarak bazı belirgin özellikleriyle diğerlerinden ayrılmaktadır. Örneğin, ciğerotlarının morfolojik olarak sınıflandırılması oldukça zordur. Bu nedenle, ciğerotlarının fitokimyasının incelenmesi, türlerin doğru şekilde ayrılmasında kritik bir

öneme sahiptir (Asakawa 2004, Asakawa 2011; Asakawa ve ark., 2013; Harinantenaina ve ark., 2006). Anatomik açıdan ise ciğerotlarında bulunan yağ taneciklerinin (oil bodies) varlığı oldukça ayırt edici bir özelliktir. Bu yağ tanecikleri yalnızca belirli lipofilik terpenik bileşiklerin sentezini gerçekleştirmekle kalmaz, aynı zamanda aromatik bileşikler ve özellikle fenolik bileşiklerin üretiminde de rol oynar (Asakawa 2004, Asakawa 2011; Asakawa ve ark., 2013a; Harinantenaina ve ark., 2006).

CİĞEROTLARININ İNSEKTİSİT ETKİSİ

Ciğerotlarının yağ tanecikleri gibi benzersiz içerikleri ve çeşitli sekonder metabolitleri nedeni ile birçok antibakteriyel, antifungal, antikanser, antioksidan araştırmaya konu olmalarına rağmen böceklerle karşı insektisidal etkileri çok az araştırılmıştır.

Ramirez vd. (2010) tarafından yapılan araştırmada Arjantin'den toplanan *Plagiochila bursata* ciğerotundan ekstraktlar elde edilerek bileşikler izole edilmiştir. Bu bileşikler de bir böcek türü olan *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) üzerinde çeşitli konsantrasyonlarda denenmiş ve %75'e varan larva ölümü ile %25'e varan pupa ölümüne neden olduğu görülmüş, ayrıca izole edilen bileşiklerden birinini kanat ve abdomen malformasyonuna neden olarak çiftleşmeyi imkansız hale getirdiği ortaya konmuştur.

Abay vd. (2013) gerçekleştirdikleri araştırma ile Türkiye'den toplanmış bazı briyofitlerin yağ asitleri içeriklerini araştırmış ve bunların böcek kovucu etkilerini incelemişlerdir. Araştırmalarında briyofitlerden elde ettikleri yağ asitlerinin *Sitophilus granarius*'a karşı insektisidal etkisini incelemişlerdir. Ekstrakt elde edilen briyofitlerden biri tallussu bir ciğerotu olan *Conocephalum conicum*'dur. Bununla birlikte araştırmanın neticesinde *Sitophilus granarius*'a karşı en yüksek insektisidal aktiviteyi *Polytrichatum formosum*'un hekzan ekstraktının (%70,33) gösterdiği belirlenmiştir. Bunların yanı sıra briyofitlerden elde ettikleri laurik, miristik ve palmitik asitlerin temas toksisitesi aktiviteleri de incelenmiştir. Test edilen saf yağ asitleri arasında en yüksek ölüm oranı (%53,34) miristik asitten elde edilmiştir. Palmitik ve laurik asitlerin aktiviteleri sırasıyla %17,75 ve %4,32 olarak belirlenmiştir.

Yine Ramirez vd. (2017) yaptıkları çalışmada, ilginç yağ tanecikleri bulunduran *Plagiochila* cinsine ait Arjantin'den topladıkları *Plagiochila diversifolia* türünden elde ettikleri ekstraktların biyoaktivitesini araştırmışlardır. Bu ekstraktlardan önceden bilinen bileşiklerin yanında üç adet de yeni bileşik izole ederek bir böcek türü olan *Spodoptera frugiperda*'nın (Lepidoptera: Noctuidae) larval büyümesine etkisini inceleyen araştırmacılar bu larvalarda besin kaynağı olarak kullanılan ekstraktların larva gelişimini %70'e varan oranlarda durdurduğunu ortaya koymuşlardır.

Mulyani ve Pangastuti (2024) tarafından yapılan araştırmada *Marchantia paleacea* ciğerotundan elde edilen etanol özütünün etil asetat fraksiyonunun *Athalia proxima*'ya karşı larvisit aktivitesini araştırmak amaçlamaktadır. Endonezya'da çiftçilerin tarım arazilerinde karşılaştıkları sorulardan biri tarım zararlılarıdır. Bunlardan biri olan *Athalia proxima*'nın larva evresi turpgillere saldırarak verimlilikte %65-80 oranında düşüşe neden olmaktadır. Sentetik larvisitlerin sürekli kullanımı bu zararlıların ilaçlara karşı direnç geliştirme, diğer canlılara zarar verme ve çevre kirliliği gibi olumsuz etkilere sebep olabilmektedir. Bu amaçla *Athalia proxima* larvalarına karşı *Marchantia paleacea* ekstraktı çeşitli konsantrasyonlarda denenerek bu ciğerotundan elde edilen etil asetat fraksiyonunun yüksek larvisit etki gösterdiği tespit edilmiştir.

SONUÇ

Böcekler ekosistemin ve biyolojik çeşitliliğin en önemli bileşenlerinden biridir. Doğada tozlaşma, besin zincirindeki yeri, organik madde döngüsüne katkısı gibi birçok kritik rolünün yanında kimi zaman da tarımsal üretimde ve ormanlarda bitki ölümlerine ve verim kaybına neden olabilmektedirler. Bu nedenle bitki sağlığını tehdit eden böceklere karşı çeşitli mücadele yöntemleri kullanılmaktadır. Bunlardan biri de kimyasal mücadele yöntemi olan insektisitlerin kullanımıdır. Ne var ki sentetik insektisitlerin yoğun kullanımı beraberinde böceklerin bu ilaçlara karşı direnç geliştirmesi, kullanılan insektisitlerin çevre kirliliğine sebep olması veya geniş spektrumlu insektisitlerin zararlı olmayan diğer canlıları da olumsuz etkilemesi gibi istenmeyen sonuçlar doğurabilmektedir.

Bu sebeplerle sentetik insektisitlere alternatif ürünler arayışına yönelim giderek artmaktadır. Bunlardan en önemlisi biyolojik kökenli insektisit elde edilmesidir. Bitkiler primer metaboliterin dışında çok çeşitli sekonder metaboliter de üretirler ve bunlardan bazıları böceklere karşı insektisit olma potansiyeli taşımaktadırlar. Ciğerotları tohumuz bitkiler olan briyofitlerin bir grubudur. En eski karasal bitkilerden olan ciğerotları 400 milyon yıldan fazla bir süredir gezegende karasal yaşamda yerini almıştır. Ciğerotları kullanılarak yapılan biyoaktivite araştırmaları çoğunlukla antibakteriyel, antifungal, antikanser ve antioksidan araştırmalar üzerine yoğunlaşmıştır. Bununla birlikte ciğerotlarının insektisidal aktivitesi konusunda çok kısıtlı sayıda araştırma bulunmaktadır. Gerçekleştirilmiş olan bu araştırmalar ciğerotlarının böcek larvalarına ve pupalarına karşı insektisidal aktivite gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu araştırmalara bakıldığında ciğerotlarının içerdikleri benzersiz yağ tanecikleri ve diğer sekonder metabolitleri sayesinde önemli bir insektisidal aktivite potansiyeline sahip olduklarını göstermektedirler.

Netice olarak ciddi ekonomik ve ekolojik sorunlar yaratabilen böcek zararlılarına karşı daha çevreci ve daha etkili yeni insektisit araştırmaları

giderek önem kazanmaktadır. Yapılan araştırmalar ciğerotlarının bu konuda önemli bir potansiyel taşıdığını göstermektedir. Buna rağmen ciğerotlarının insektisidal aktivitesi konusunda yapılmış olan çalışmalar oldukça azdır ve bu alanda çok daha fazla araştırma yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

REFERANSLAR

- Abay, G., Altun, M., Karakoc, O. C., Gul, F., & Demirtas, I. (2013). Insecticidal activity of fatty acid-rich Turkish bryophyte extracts against *Sitophilus granarius* (Coleoptera: Curculionidae). *Combinatorial chemistry & high throughput screening*, 16(10), 806-816.
- Ahmed S, Grainge M (1988). *Handbook of Plants with Pest Control Properties*. John Wiley & Sons Limited, New York, 470 pp.
- Altuner E. M. (2008). Bazı karayosunu türlerinin antimikrobiyal aktivitesinin belirlenmesi (Doctoral dissertation, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyoloji Anabilim Dalı).
- Anonim, 2008. Gıda Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı, Zirai Mücadele Teknik Talimatları Cilt 6, Ankara.
- Asakawa, Y. (2001). Recent advances in phytochemistry of bryophytes-acetogenins, terpenoids and bis (bibenzyl)s from selected Japanese, Taiwanese, New Zealand, Argentinean and European liverworts. *Phytochemistry*. 56: 297-312.
- Asakawa, Y. (2004). Chemosystematics of the Hepaticae. *Phytochemistry*, 65(6), 623-669.
- Asakawa, Y. (2011). Bryophytes: chemical diversity, synthesis and biotechnology. A review. *Flavour and Fragrance Journal*, 26(5), 318-320.
- Asakawa, Y., Ludwiczuk, A. (2013). Bryophytes: Liverworts, mosses, and hornworts: Extraction and isolation procedures. *Metabolomics Tools for Natural Product Discovery: Methods and Protocols*, 1-20
- Atkinson H.J., Lilley C.J., Urwin P.E., (2012). Strategies for transgenic nematode control in developed and developing world crops. *Current Opinion Biotechnolgy*, 23, 251–256.
- Aydınlı, G., & Mennan, S. (2016). Orta Karadeniz Bölgesi seralarındaki kök-ur nematodlarının yayılış ve bulaşıklık oranı. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5, 189-198.
- Baloğlu, S. (2022). Sürdürülebilir Tarımda Bitki Sağlığı. *UOT* 633/635: 632.9.
- Cemek S. Keçeli T. (2024). The Evaluation in Terms of Different Variables of Graduate Theses Related to Bryophytes in Türkiye. *Anatolian Bryology*. 10:1, 8-24.
- Erdağ A. Kürschner H. (2017). Türkiye bitkileri listesi:(Karayosunları). Ali Nihat Gökyiğit Vakfı.
- Harinantenaina, L., Takahara, Y., Nishizawa, T., Kohchi, C., Soma, G. I., Asakawa, Y. (2006). Chemical constituents of malagasy liverworts, Part V: Prenyl bibenzyls and clerodane diterpenoids with nitric oxide inhibitory activity from *Radula appressa* and *Thysananthus spathulistipus*. *Chemical and pharmaceutical bulletin*, 54(7), 1046-1049.
- Hernick, L. V., Landing, E., & Bartowski, K. E. (2008). Earth's oldest liverworts—*Metzgeriothallus sharonae* sp. nov. from the Middle Devonian (Givetian) of

- eastern New York, USA. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 148(2-4), 154-162.
- Keskin, Ş., ve Özkaya, H. (2013). Tahılların Depolanması Sırasında Böcek Üremesi ve Etkileri. *Akademik Gıda*, 11(3-4), 101-105.
- Kıyak, S. (2019). Dünyadaki Biyoçeşitlilik ve Böceklerin Ekosistem Açısından Önemi Hakkında. *Journal of the Heteroptera of Turkey*, 2687-3249.
- Klein, A. M., Vaissière, B. E., Cane, J. H., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S. A., Kremen, C., & Tscharntke, T. (2007). Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the royal society B: biological sciences*, 274(1608), 303-313.
- Landis, D. A., Wratten, S. D., & Gurr, G. M. (2000). Habitat management to conserve natural enemies of arthropod pests in agriculture. *Annual review of entomology*, 45(1), 175-201.
- Lavelle, P., Bignell, D., Lepage, M., Wolters, V., Roger, P., Ineson, P. Heal, O. W. & Dhillon, S. (1997). Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers. *European Journal of Soil Biology*, 1997, Vol. 33, No. 4, 159-193
- Markow, T. A., & O'Grady, P. (2005). *Drosophila: a guide to species identification and use*. Elsevier.
- Mulyani, S., ve Pangastuti, A. (2024, June). Larvicidal activity of liverworts'(Marchantia paleacea) ethyl acetate fraction against *Athalia proxima*. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1362, No. 1, p. 012042). IOP Publishing.
- Netscher, C. ve Sikora, R. A. (1990). Nematode parasites on vegetables. In: Luc, M., Sikora, R.A., Bridge, J., (Eds). *Plant parasitic nematodes in subtropical and tropical agriculture*. C.A.B. International, 231-283.
- Oskay, D., & Oskay, M. (2009). Bitki sekonder metabolitlerinin biyoteknolojik önemi. *Ecological Life Sciences*, 4(2), 31-41.
- Öztürk, A. (2020). Ormanlarda zarar yapan böceklerin ekonomik etkileri: Türkiye açısından bir değerlendirme. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 2(2), 164-180.
- Prakash A, Rao J (1996). *Botanical Pesticides in Agriculture*. CRC Pres, Lewis Publishers, 461 pp
- Ramírez, M., Kamiya, N., Popich, S., Asakawa, Y., & Bardón, A. (2010). Insecticidal constituents from the argentine liverwort *Plagiochila bursata*. *Chemistry & Biodiversity*, 7(7), 1855-1861.
- Ramírez, M., Kamiya, N., Popich, S., Asakawa, Y., ve Bardón, A. (2017). Constituents of the Argentine liverwort *Plagiochila diversifolia* and their insecticidal activities. *Chemistry & Biodiversity*, 14(12), e1700229.
- Samways. M.J. (2005). *Insect diversity conservation*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Scher, J. M., Speakman, J. B., Zapp, J., Becker, H. (2004). Bioactivity guided isolation of antifungal compounds from the liverwort *Bazzania trilobata* (L.) SF Gray. *Phytochemistry*, 5(18), 2583-2588.
- Serin Ç. 2007. Zonguldak ve Çevresinde Bulunan İki Bitki Türünde Biyolojik Aktif Bileşiklerin Taranması, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.

- Shanker C, Solanki KR (2000). Botanical insecticides: A historical perspective. India, Asian Agrihistory, 4: 21-30.
- Sikora, A., Kačík, F., Gaff, M., Vondrová, V., Bubeníková, T., Kubovský, I. (2018). Impact of thermal modification on color and chemical changes of spruce and oak wood, J. Wood Sci. 64(4), 406-416. <https://doi.org/10.1007/s10086-018-1721-0>
- Toğantimur, O. (2019). Edirne ilinde depolanan buğday ve un fabrikalarında tespit edilen zararlı böcekler üzerine araştırmalar. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi).59 sayfa, Tekirdağ.
- URL 1. Ormancılık İstatistikleri 2023. <https://www.ogm.gov.tr/tr/e-kutuphane/resmi-istatistikler> (Erişim tarihi: 22.12.2024).
- Wilson, E. O. (1987). The little things that run the world (the importance and conservation of invertebrates). Conservation biology, 344-346.

Maleik Hidrazitin Tautomerik Yapıları

Cumali ÇELİK¹

- 1- Doç.Dr.; Yalova Üniversitesi, Yalova MYO, Mülkiyet Koruma ve Güvenlik Bölümü
cumali.celik@yalova.edu.tr, ORCID No: 0000-0002-7788-5703

ÖZET

Tautomerleşme, çoğunlukla organik moleküllerde görülür, bileşiklerin reaktivitesini ve özelliklerini etkileyebildiği için organik kimyada önemli bir kavram olup ve bu alanda birçok farklı tautomerleşme örnekleri vardır. Tautomerik yapıların rol oynadığı reaksiyonlarda bileşiklerin molekül içi yoğunlaşmaları ve halkalaşma dönüşümleri oldukça fazladır. En basit örnekleri arasında, yalnızca bir çift bağın veya hidrojen atomunun konumunun hareket ettirildiği keto-enol, nitro-amin ve fenol-imin tautomerleşmesi bulunur. En önemlilerinden biri ise keto-enol tautomerliği olup bu dönüşümde, bir yapı keton ve diğeri enol formundadır. Her iki tautomerik form da asit veya baz katalizörleri kullanılarak birbirine dönüştürülebilir.

Maleik hidrazit, maleik anhidritin hidrazin ile yoğunlaşmasından elde edilen organik bir bileşiktir. Herbisit ve fungisit olarak kullanımı ve çeşitli uygulamaları ile göze çarpan çok yönlü bir bileşiktir. Bu bölümün konusu, bir piridazinon bileşiği olan maleik hidrazitin tercih ettiği ve bulunabileceği tüm tautomerik yapıların, teorik ve deneysel olarak katı, çözelti ve gaz fazı hesaplamalarına, pH değerlerine ve çözücü etkilerine dayalı denemelerde geliştirilen yöntem ve sonuçların incelendiği bir derleme çalışmasıdır.

Anahtar Kelimeler – Tautomer, Maleik Hidrazit, Yoğunluk Fonksiyonel Teorisi, Deneysel Matris İzolasyon, Monohidroksimonoketo, Dihidroksi, Diketo.

GİRİŞ

Tautomerleşme organik kimyada bir molekülün birbirleriyle dengede olan iki veya daha fazla farklı yapısal formda var olabildiği bir izomerizasyon türüdür. Taumomer olarak adlandırılan bu yapısal formlar, başka bir forma dönüşebilen yapısal izomerlerdir. Aynı moleküler formüle, aynı bağ bağlantılarına ve aynı atom düzenlemesine sahip olan, tautomer olarak bilinen iki veya daha fazla molekülün varlığından kaynaklanan özel bir izomerleşme veya yapısal izomerleşme türü olarak tanımlanabilir. Bir tautomerik bileşiğin mevcut yapısal izomerleri, bir protonun göçü ve bir çift bağın pozisyonundaki bir değişiklik yoluyla dinamik bir denge içinde kademeli olarak birbirine dönüşür ve bu da farklı bir tautomerin oluşumuyla sonuçlanır. Molekül içi izomerleşme veya tautomerleşme, genellikle proton ve çift bağların pozisyonunda farklılık gösteren izomerik türler arasında denge varlığı olarak da tanımlanır. Farklı atomları ve bağları içerebilir:

- göç eden atomun bir proton olduğu prototropik tautomerler,
- atomik bileşimlerinde farklılıklar bulunan prototropik olmayan tautomerler.

Prototropik tautomerler en yaygın tautomerizm türüdür ve proton transferi yoluyla organik bileşiklerin karşılıklı dönüşümünü içeren dinamik bir kimyasal dengeye ilişkindir ve işlevsel grup pozisyonlarında farklılık gösteren izomerik "tautomer" molekülleriyle sonuçlanır. Ayrıca ilgili atomların farklı hibridizasyon derecesine göre sınıflandırılır ve üç ana kategoriye ayrılır:

- keto-enol tautomerleşmesi,
- imin-enamin tautomerleşmesi,
- azo-nitrozo tautomerleşmesi.

Tautomerler atomların düzenlenmesinde farklılık gösterdiğinden, farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptirler. Tautomerlerin hızlı bir şekilde birbirine dönüşmesi tautomerik kayma olarak bilinir.

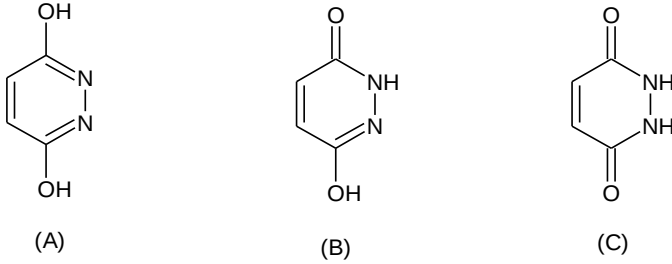
Tautomerik değişim biyokimya, tıbbi kimya ve farmakoloji için hayati öneme sahiptir. Birçok durumda organik bileşiklerin ve doğal ürünlerin biyolojik aktivitesini, enzimlere ve reseptörlere yönelik seçiciliğini ve toksisitesini belirler. Tautomerik bileşikler ayrıca pestisit, herbisit, hormon ve ilaç olarak yaygın olarak kullanılmıştır. Nükleik asitler ve proteinler gibi biyomoleküllerin yapısını ve işlevini etkileyebilir. DNA'nın nitrojenli bazlarının (adenin, timin, guanin ve sitozin) farklı tautomerleri benimsediği bilinmektedir.

Biyolojik öneminin yanı sıra, tautomer yapılar bileşiklerin termodinamik kararlılığının incelenmesi için de önemlidir. Bu yönün anlaşılması, ilaç endüstrisinde potansiyel uygulamalara sahip yeni biyoaktif organik bileşiklerin geliştirilmesi yaklaşımlarının bir nedeni olarak gösterilebilir. Böylece tautomerlerin göreceli kararlılığını, çözücüyü, sıcaklığı ve substrat doğasını belirleyen termodinamik parametreler dahil olmak üzere tautomer dengelerini etkileyen faktörlerin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasının yolu açılmış olur.

Moleküllerin tautomerik dönüşümleri son yıllarda kimyacılar tarafından araştırılmıştır. Bileşiklerin özelliklerinin ve uygulama alanlarının belirlenmesindeki önemi nedeniyle yeniden ilgi görmüştür (Grochowski vd., 2004:42, Belova vd., 2008:3209). Tautomerleşmenin önemi, son yıllarda araştırmaların teorik kimyada ana konu haline gelmesiyle daha da belirginleşmiştir. Örneğin, keto-enol (Sankar vd.,2007:33, Zborowski vd., 2004:15), imin-enamin (Oziminski vd., 2004:107, Dines vd., 2006:891) ve diğer birçok sistemdeki tautomerleşmeler incelenmiştir (Bonacin vd., 2007:137).

Bazı organik bileşiklerde tautomerik denge, hem deneysel hem de teorik olarak, gaz fazında ve sulu çözeltide ayrıntılı olarak incelenmiştir (Schlegel vd., 1982:5347, Nowak vd., 1990:7406, Beak vd., 1976:171). Maleik hidrazitteki karşılık gelen tautomerizm biraz karmaşıktır ve daha az

çalışılmıştır. Burada, prensip olarak üç tautomer gözlemlenebilir, dihidroksi form A, monohidroksimonoketo form B ve diketo form C (Şekil 1).



Şekil 1. Maleik hidrazitin üç tautomerik yapı formülleri.

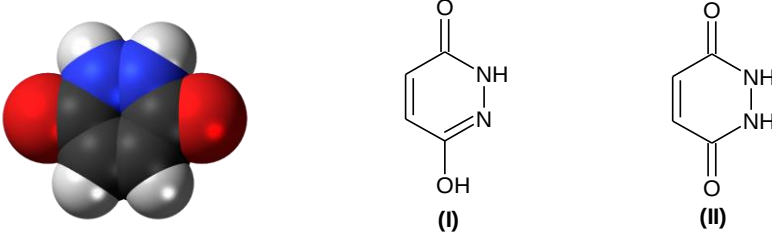
Gaz fazında tautomer tercihini gösteren deneysel verilerin olmadığı dönemde, yoğun faz çalışmaları ise katı halde ve çözeltide monohidroksi-monoketo formunun baskınlığını göstermiştir. Maleik hidrazitte bitişik heteroatomları içeren tautomerleşme söz konusudur. Burada, esas olarak aynı hibridizasyon tipindeki bitişik heteroatomların güçlü bir şekilde dengeszleştirici olduğu yönündeki varsayım hem deneysel hem de teorik çalışmalar tarafından doğrulanmıştır. Bu durum, tautomer B'nin A ve C'ye göre tercih edildiği tahminini ortaya koymuştur (Burton vd., 1993:331).

Tautomerik denge, sıcaklık, basınç, çözücü doğası veya hatta karmaşık fotoindüklenmiş dönüşümlerdeki değişikliklere tabi tutulabilir ve çok sayıda organik sistemde hayati önem taşır. Tautomer oranlarının kapsamlı bir şekilde anlaşılması, organik bileşiklerin çeşitli fiziko-kimyasal ve biyolojik özelliklerini incelemek için çok önemlidir. Organik bileşiklerin tautomer dengelerini araştırmak, denge karışımlarında bulunan tautomerlerin oranlarını ayırt etmek önemli bir çalışma alanı haline gelmiştir. Tautomerleşme organik bileşiklerin kantitatif belirlenmesini önemli ölçüde etkileyebilir ve genellikle denge halindeki formlardan birinin mutlak konsantrasyonundaki hesaplamalarda farklılıklara neden olabilir.

Tautomer oranlarının doğru bir şekilde bilinmesi son derece önemlidir, çünkü organik bileşikler yalnızca tautomerlerinin doğasına dayalı olarak belirgin kimyasal, biyolojik, spektroskopik ve fizikokimyasal özellikler gösterebilir. Denge karışımlarında bulunan tautomerlerin oranlarını belirlemek ve ayrıca pH'nın sulu tamponlardaki tautomerik dağılım üzerindeki etkisini incelemek için seçilmiş biyolojik açıdan önemli basit veya heterosiklik organik bileşikler değerlendirilir. Farklı pH'lardaki maleik hidrazit çözeltilerinde UV-Vis ve IR spektrumlarında dikkate değer değişimler gözlemlenmiştir. Bu spektral değişimlerin, bileşiğin iki formu arasındaki dengedeki tautomerik kaymadan kaynaklandığını bilinmektedir; bunlardan biri nötr maleik hidrazit diğeri de molekülünün eşlenik bazıdır.

Maleik Hidrazitin Yapı ve Özellikleri

Maleik hidrazit (Şekil 2) ilk olarak 1895 yılında sentezlendi ancak bitki büyümesini bir inhibitör olarak düzenleme yeteneği 1949 yılında keşfedildi (Schoene ve Hoffmann, 1949:588).



Şekil 2. Maleik hidrazitin molekül formülünün farklı gösterilişleri.

Maleik anhidritin hidrazinle hidrat çözeltisiyle (pH=6-6,5 ve 110 °C) reaksiyonundan kolaylıkla elde edilebilen ve sulu çözeltilerinde sadece bir hidrojen atomu verip zayıf bir monobazik asit gibi davranan maleik hidrazitin bazı fiziksel özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Table 1. Maleik Hidrazitin Bazı Fiziksel Özellikleri.

IUPAC Adı	6-hidroksi-2H-piridazin-3-on (I) 1,2-dihidropiridazin-3,6-dion (II)
Kimyasal Formül	C ₄ H ₄ N ₂ O ₂
Molekül Ağırlığı	112.09
CAS No	I: [10071-13-3] II: [123-33-1]
Dış Görünüş	Beyaz renkli kristal yapı
Çözünürlük	Su (4.5 g/Lt, pH 4.3; 25 °C) Metanol (4.1 g/Lt), Hekzan, Toluen (<0.001 g/Lt)
Kararlılık	Alkalilerle tuzlar oluşturur, ancak asidik ve bazik çözeltilerde kararlıdır. Hidrolize karşı kararlıdır, ancak güçlü oksitleyici ajanlar tarafından ayrıştırılır ve azot salınır.
Asitlik (pKa)	5.62
Erime Noktası	260 °C (Dec.)

Maleik Hidrazitle İlgili Tautomerik Çalışmalar

Maleik hidrazitin yapısı ve tautomerizmi de çeşitli hesaplamalı çalışmaların konusu olmuştur (Augustin vd., 1972:230, Fabian vd., 1991:17, Hoffmann vd.1991:321, Burton vd., 1993,331).

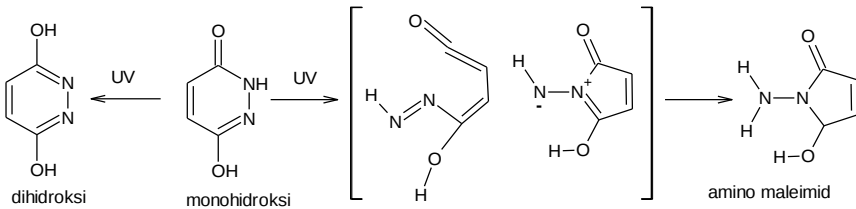
Maleik hidrazit moleküllerinin, urasil ve timinle baz çiftleri oluşturan bir purin analogu (O atomu aracılığıyla nükleozit oluşumu) veya adeninle baz çiftleri oluşturan bir pirimidin analogu (N aracılığıyla nükleozit oluşumu) olarak hareket edebileceği öne sürülmüştür (Coupland ve Peel, 1972:249, Cradwick, 1975:774). Maleik hidrazitin tautomerik formlarının farklı çözücülerdeki kararlılığı, nükleer manyetik rezonans (NMR) ve kızılötesi teknikler (IR) gibi spektroskopik yaklaşımlarla yoğunlaştırılmış ve gaz fazlarında tespit edilmiştir.

Çözücüdeki tautomer izomerlerinin kararlılığı, çözücü ile tautomer arasındaki etkileşime bağlıdır. En kararlı tautomerik yapıyı belirlemek için

genellikle kuantum kimyasal hesaplamalar kullanılır (Vakulskaya vd., 2009:716, Davari vd., 2010:841) ve tautomerik kararlılığı belirlemek için en sık kullanılan yöntem yoğunluk fonksiyonel teorisi DFT'dir (Ostakhov vd., 2019:7956, Jana vd., 2018:8429, Umadevi vd., 2015:149). Bu yöntem, tautomerleşmedeki termodinamik fonksiyonları, çözücülerin tautomerik formların kararlılığı üzerindeki etkisinin farklı çözücüler ve gaz fazlarında bilgisayar simülasyonu ile hesaplanabilirliğini ve tautomerizasyon mekanizmasını araştırmak için kullanılmaktadır.

Katı maleik hidrazitin tautomerizmi, kızılötesi ve Raman (Cheinker vd., 1958:217, Morzyk, 2007:121) spektroskopileri kullanılarak deneysel olarak incelenmiştir. Çeşitli çözeltilerdeki yapısı ise UV spektroskopisi, iyonizasyon sabitleri (Miller vd., 1956:1510, Barlin, 1974:1199), Raman spektroskopisi (Maillols vd., 1969:1491) ve nükleer manyetik rezonansı (Ohashi vd., 1964:970, Katritzky ve Waring, 1964:1523) kullanılarak karakterize edilmiştir. IR spektroskopik çalışmaları UR-10 kafes spektrometresi kullanılarak 1200–4000 cm^{-1} aralığındaki titreşimlerin gaz halindeki maleik hidrazitin varlığından kaynaklandığını göstermiştir. Yapılan bu tüm deneysel çalışmalardan elde edilen verilerle maleik hidrazitin mono-hidroksi tautomeri olarak da var olduğu sonucuna varılmıştır.

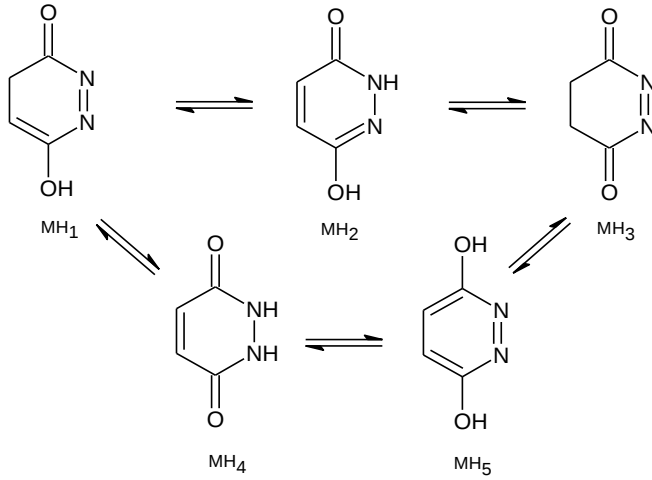
Reva ve arkadaşları 2012 yılında, maleik hidrazit bileşiğini deneysel matris izolasyon tekniği ve kuantum kimyasının DFT ve QCISD yöntemleri kullanılarak incelendi ve monohidroksi tautomerinin teorik olarak bileşiğin en kararlı formu olduğunu, dihidroksi ve diketo formlarının enerjilerinin (QCISD seviyesinde) 20 kJ mol^{-1} den daha yüksek bir değerde olduğunu hesapladılar. Maleik hidrazitin UV ışınlanması ise iki izomerizasyon dönüşüm sürecini indüklemiştir. Bunlardan biri okso-hidroksi formunu dihidroksi tautomere dönüştüren hidrojen atomu transferi, diğeri ise N-aminomaleimide (Şekil 3) dönüşüm olarak açıklanmıştır.



Şekil 3. Monohidroksi formun UV kaynaklı amino maleimide dönüşümü.

Shabanian ve ekibi 2012 yılında, bir DFT çalışması olarak, maleik hidrazitin tautomerlerinin yapısal verilerini, gaz fazında ve benzen (polar olmayan çözücü), tetrahidrofuran (polar aprotik çözücü) ve metanol (protik çözücü), dimetil sülfoksit (polar aprotik çözücü) ve su (protik çözücü) gibi

seçilmiş çözücülerde PCM modeli kullanılarak hesaplamışlardır. Maleik hidrazitin tautomerik yapıları Şekil 4'te gösterilmiştir. Bu beş tautomerin farklı çözücülerdeki enerji karşılaştırmalarının sonuçları göre gaz fazında MH₂ formunun diğer formlardan daha kararlı olduğu rapor edilmiştir. Gaz fazındaki tüm tautomerlerin kararlılık sırası MH₂ > MH₄ > MH₅ > MH₃ > MH₁'dir. Polar çözücülerin gaz fazına kıyasla tüm maleik hidrazit tautomerlerinin kararlılığını artırdığı belirtilmiştir. Çözücü etkileşimleri, gaz fazındaki tautomerlerin kararlılık sırası üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu vurgulanmıştır.



Şekil 4. DFT çalışmasıyla maleik hidrazitin tautomerleri.

Hofmann ve arkadaşları tarafından 1991 yılında, maleik hidrazitin yapısı ve tautomerik özellikleri kuantum kimyasal yöntemleriyle incelendi. Tautomerlerin moleküler geometrisi ve kararlılık sıraları 3-21G ve 6-31G' baz kümeleri kullanılarak belirlendi. Çözücünün tautomerlerin kararlılığı üzerindeki etkisi kuantum kimyasal süreklilik modeliyle izlenmiştir. Gaz fazında en kararlı yapının monohidroksi-monoketo tautomeri olduğu, bunu çözeltide karşılaştırılabilir öneme sahip olan diketo formunun izlediğini rapor edilmiştir.

Burton ve arkadaşları tarafından 1993 yılında, maleik hidrazitin gaz fazında ve sulu çözeltideki tautomerik dengelerin teorik tahminleri sunulmuştur. Sulu çözeltide tautomer popülasyonları elde etmek için pK verilerinin kullanımı tartışılmış ve elde edilen değerler teorik tahminlerle karşılaştırılmıştır. Yüksek düzeyde elektron korelasyonu içeren gaz fazı türlerinin serbest molekül hesaplamaları, solvasyon etkilerini modellemek için hem moleküler dinamik simülasyonları hem de süreklilik yöntemleriyle birleştirilmiştir. Hem gaz fazında hem de sulu çözeltide monohidroksi-monoketo tautomerinin (B) baskın olduğu rapor edilmiştir. Solvasyonun etkisinin, diketo formunu (C) öncelikli olarak stabilize edeceği ve böylece

her iki formun da çözeltide gözlemlenebileceği, dihidroksi formunun (A) ise esasen bulunmadığı ve mevcut deneysel verilerle uyumlu olduğu bildirilmiştir.

SONUÇ

Maleik hidrazit nükleik bazlara benzer şekilde, diketo, monohidroksi monoketo veya dihidroksi yapısal formda görünen farklı tautomerler sergiler. Deneysel ve teorik çalışmalar, monohidroksi monoketo tautomeri (B)'nin katı halde, çözeltide ve gaz fazında benzer şekilde en kararlı görüldüğünü ve baskın olduğunu gösterirken, dihidroksi (A) ve diketo (C) formlarının mevcutiyetinin daha az olduğu göstermiştir. Spektroskopik çalışmaları, tautomer B'nin polar çözücülerde tercih edildiğini ortaya koymuştur, bu da aynı hibridizasyon tipindeki bitişik heteroatomların güçlü bir şekilde istikrarsızlaştırıcı olduğu hipoteziyle desteklenmektedir. Polar çözücüler, gaz fazına nazaren tüm tautomerlerin kararlılığını artırmıştır. Maleik hidrazitin B tautomerinin UV ışınlamasıyla N-aminomaleimid tautomeri ürettiği görülmüştür.

REFERANSLAR

- Augustin M., Schädler H.D., Reinemann, P. (1972). *Zeitsch. Chem.* 12, 230-231.
- Barlin G.B., (1974). Tautomerism of N-heterocycles. Part II. 3-Hydroxypyridazin-6-one and 3-mercaptopyridazine-6-thione. *J. Chem. Soc. – Perkin Trans. 2* 1199–1202.
- Beak P., Fry F.S., Leeand J., Steele F. (1976). Equilibration studies. Protomeric equilibria of 2- and 4-hydroxypyridines, 2- and 4-hydroxypyrimidines, 2- and 4-mercaptopyridines, and structurally related compounds in the gas phase. *J.Am. Chem.Soc.*, 98, 171.
- Belova N V, Oberhammer H, Girichev G V and Shlykov S A. (2008). Tautomeric Properties and Gas-Phase Structure of 3-Chloro-2,4-pentanedione. *J Phys Chem A.*, 2008,112 (14), 3209-3214.
- Bonacin J A, Formiga A L B, de Melo V H S and Toma H E. (2007). Vibrational spectra and theoretical studies of tautomerism and hydrogen bonding in the violuric acid and 6-amino-5-nitrosouracil system. *Vib Spectrosc.*,44(1), 133-141.
- Burton N.A., Green D.V.S., Millier, I.H., Taylor, P.J., Vincent, M.A., Woodcock, S. (1993). Tautomeric equilibria of maleic hydrazide in the gas phase and in aqueous solution: an experimental and theoretical study. *J.Chem. Soc.– Perkin Trans. 2* 331–335.
- Cheinker J.U.N., Gortinskaia, T.V., Sycheva, P. (1958). *J. Chim. Phys. Physico-Chim. Biol.*, 55, 217–226

- Coupland D., Peel, A.J. (1972). Maleic Hydrazide as an Antimetabolite of Uracil. *Planta*, 103, 249–253.
- Cradwick, P.D. (1975). *Nature*, 258 774.
- Davari MD, Bahrami H, Haghighi ZZ, Zahedi M. (2010). Quantum chemical investigation of intramolecular thione-thiol tautomerism of 1,2,4-triazole-3-thione and its disubstituted derivatives. *J Mol Model.*, 16:841–855.
- Dines T J and Onoh H. (2006). An infrared and resonance Raman spectroscopic study of phenylazonaphthol pigments. *Spectrochim Acta A*, 64, 891.
- Fabian W.M.F. (1991). Tautomeric equilibria of heterocyclic molecules. A test of the semi-empirical AM1 and MNDO-PM3 methods. *J. Comput. Chem.* 12 17–35.
- Grochowski J, Serda P, Markiewicz M, Kozik B and Sepiol J J. (2004). Structural and energetic characterization of ylidenemalonodinitrile tautomers, precursors of fungicidal species. *J Mol Struct.*, 689, 43–48.
- Hofmann H.J., Cimiraglia, Tomasi, R. J., Bonaccorsi, R. (1991). Structure and Tautomerism of Maleic Hydrazide. *J. Mol. Struct.* 227 321–326.
- Jana K, Ganguly B. (2018). DFT study to explore the importance of ring size and effect of solvents on the keto–enol tautomerization process of α - and β -cyclo-diones. *ACS Omega*, 3:8429–8439.
- Katritzky A.R., Waring, A.J. (1962). Tautomeric azines. Part I. The tautomerism of 1-methyluracil and 5-bromo-1-methyluracil. *J. Chem. Soc.* 1540–1544.
- Maillols J., Vinh, L.D. Bardet, L. (1969). *Comp. Rend. Hebdomad. Séances Acad. Sci. Ser. B* 268, 1491.
- Miller D.M., White, W. (1956). The Structure of Maleic Hydrazide as Inferred from The Ultraviolet Spectra of Its Methyl Derivatives. *Can. J. Chem.– Rev. Can. Chim.* 34 1510–1512.
- Nowak M.J., Lapinski, L., Rostkowska, H., Andrezej, L. Adamowicz, L. (1990). Theoretical and matrix-isolation experimental study on 2(1H)-pyridinethione/2-pyridinethiol. *J. Phys. Chem.*, 1990, 94, 7406–7414.
- Morzyk Ociepa B. (2007). X-ray crystal structure and vibrational spectra of hydrazides and their metal complexes. Part I. Catena-poly[di- μ -aqua-(μ -maleic hydrazidato-O)sodium] hydrate. *J. Mol. Struct.* 833 121–132.
- Ohashi O., M. Mashima, Kubo, M. (1964). Proton Magnetic Resonance and The Structure of Maleic Hydrazide. *J. Chem. – Rev. Can. Chim.* 42 970–973
- Ostakhov SS, Ovchinnikov MYu, Masyagutova GA, Khursan SL. (2019). Luminescent and DFT study of keto–enol tautomers of 5-fluorouracil and its derivatives in aqueous solutions. *J Phys Chem A*. 123:7956–7964.
- Oziminiski W P, Dobrovolski J C and Mazurek A P. (2004). DFT studies on tautomerism of C5-substituted 1,2,4-triazoles. *J Mol Struct. (Theochem.)* 680, 107–115
- Sankar Prasad De, Sankarlal Ash, Sudipta Dalai, Ajay Misra. (2007). A DFT-based comparative study on the excited states intramolecular proton transfer in 1-hydroxy-2-naphthaldehyde and 2-hydroxy-3-naphthaldehyde. *J Mol Struct. (Theochem.)* 807, 33–41
- Schlegel, H. B., Gund, P. and Fluder, E. M. (1982). Tautomerization of formamide, 2-pyridone, and 4-pyridone: an ab initio study. *J. Am. Chem. Soc.*, 104, 5347–5351.
- Schoene D. L., Hoffmann, O. L. (1949). *Science*, 109, 588–590.

- Umadevi V, Mano Priya A, Senthilkumar L. (2015). DFT study on the tautomerism of organic linker 1H-imidazole-4,5-tetrazole (HIT). *Comput Theor Chem.* 1068:149–159.
- Vakulskaya TI, Larina LI, Protsuk NI, Lopyrev VA. (2009). Tautomerism of 3-nitro-1,2,4-triazole-5-one radical anions. *Magn Reson Chem* 47:716–719.
- Zborowski K and Korenova A. (2004). Quantum chemical studies on tautomeric equilibria in chlorokojic and azidokojic acids. *J Mol Struct. (Theochem.)*, 683, 15-22.

Uşak Üniversitesi'nde Radon Gazı ve Elektromanyetik Alan Değerlerinin Belirlenmesi*

Engin TEKİN¹
İrem YILMAZ²
Hanife BULUT³

* Bu araştırma TÜBİTAK 2209/A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projesinden türetilmiştir (Proje No: 1919B012106759).

- 1- Öğr. Gör. Dr. Uşak Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, engin.tekin@usak.edu.tr, ORCID No: 0000-0002-7073-3301.
- 2- Uşak Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Görüntüleme Teknikleri Programı, ireemmy@gmail.com
- 3- Uşak Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Görüntüleme Teknikleri Programı, 215311001@ogr.usak.edu.tr

ÖZET

Kapalı ortamlarda uzun süreli radyasyona maruz kalınması insan sağlığına zarar verebilmektedir. Kapalı ortamlarda en çok maruz kalınan radyasyonlar Radon gazı ve Elektromanyetik radyasyondur. Radon gazı bina içlerine sızarak birikir. Elektrikle çalışan tüm cihazlar da Elektromanyetik alan yayarlar. Radon gazı akciğer kanseri oluşumunda en önemli ikinci etkidir. Elektromanyetik alanlara uzun süreli maruziyet de kansere yol açabilmektedir. Öğrenim hayatlarının önemli bir bölümünü üniversite dersliklerinde geçiren öğrencilerin radyasyona maruziyet seviyelerinin belirlenmesi büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle, bu araştırmanın amacı, Uşak Üniversitesi'nde öğrenim gören öğrencilerin öğrenim gördükleri dersliklerde Radon gazı konsantrasyonlarının ve Elektromanyetik alan değerlerinin belirlenmesi, ulusal ve uluslararası sınır değerlerle karşılaştırılması ve iş sağlığı ve güvenliği yönünden değerlendirilmesidir. Literatür incelendiğinde, Uşak Üniversitesi'ndeki dersliklerde radyasyon ölçümlerinin ve Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri (YEDE) hesaplamalarının yapıldığı bir araştırmaya rastlanılmamıştır.

Anahtar Kelimeler – Radon Gazı, Elektromanyetik Alan, Yede, Uşak Üniversitesi, Öğrenci.

GİRİŞ

Radyasyonun genellikle medikal kaynaklardan geldiğine yönelik algı bulunmaktadır. İnsan yapımı/yapay radyasyon kaynakları içerisinde sağlık hizmetlerinde özellikle radyoloji birimlerinde radyasyon maruziyeti çok fazladır. Hastalıkların teşhis ve tedavisinde görüntüleme teknolojilerinin kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte hem sağlık çalışanlarının hem de görüntüleme hizmeti alan hastaların radyasyona maruziyeti artmaktadır. Radyasyona aşırı maruz kalmanın geri dönüşü olmayan zararları bulunmaktadır. Sağlık hizmetlerinde birincil öncelik hastaların ve sağlık çalışanlarının radyasyondan korunması ve güvenliğinin sağlanması olmalıdır. Bu nedenle tıbbi gereklilik olmadıkça radyasyon içeren görüntüleme tekniklerinin kullanılmaması, koruyucu ekipman ve önlemlerin alınması, denetimlerin zamanında yapılması, radyasyonla ilgili farkındalığın artırılması gibi önlemler alınmaya çalışılmaktadır. Sağlığın korunması ve geliştirilmesi için sadece sağlık hizmetlerinde maruz kalınan radyasyona değil doğal veya yapay tüm radyasyon kaynakları dikkate alınmalıdır (Emikönel, Türkmen ve Tekin, 2024).

Modern çalışma ortamlarında yaşanan teknolojik gelişmeler, çalışan bireylerin sosyal yaşamları ve sağlıkları üzerinde olumlu ve olumsuz etkiler oluşturmaktadır (Kaya vd, 2022). Söz konusu çalışma ortamlarından biri de

eğitim kurumları ve bunlar içerisinde de teknolojik alt yapılarıyla üniversite kampüsleri ve binaları ön plana çıkmaktadır. Teknoloji tüm dünyada hızla gelişmekte, faydalar sağlamaktadır. Ancak getirdiği faydanın yanında insan sağlığı üzerinde olumsuz etkileri de olmaktadır. Olumsuz etkilerin başında sürekli olarak hayatımızın her alanında maruz kaldığımız radyasyon gelmektedir (Emikönel vd., 2023). Radyasyon, günlük yaşam içerisinde gerek evler, gerek okullar, gerekse sağlık kuruluşlarında maruz kaldığımız radyoaktif atık kaynaklarından biri olarak değerlendirilmektedir (Tekin vd., 2023). Radyasyon iyonize ve iyonize olmayan radyasyon olarak ikiye ayrılmakta ve kapalı ortamlarda maruziyet oluşturmaktadır (Emikönel ve Tekin, 2023a). Radyasyon yaşamımızın bir parçasıdır. Doğal radyasyon kaynaklarından kaynaklanan ve teknolojinin getirdiği elektromanyetik radyasyona sürekli olarak maruz kalıyoruz (Emikönel ve Tekin, 2023b).

Radon gazı iyonize radyasyon kaynaklarından birisidir ve uranyumun bozunması sonucu ortaya çıkar. Yer altından açığa çıkan radon gazı bina içlerine nüfuz eder ve birikir. Binalarda radon gazı konsantrasyonu yüksek seviyelere ulaşır, insan sağlığına zarar verir (Yörük, 2021). Radon gazı atmosfere yayılırken binalardaki çatlaklardan bina içlerine girer. Bunun dışında radon gazı bina çevresinde birikerek, sıcaklık-basınç farklılığı olduğunda kapı ve pencerelerden bina içine girebilmektedir (Günay, 2018). Radon gazı havadan ağır olduğu için, kapalı alanlar içerisindeki Radon yerden 50 cm mesafede kalır. Havalandırmanın yetersiz kaldığı durumlarda Radon gazı miktarı tehlikeli seviyelere ulaşabilmektedir. Soluk alma ile akciğerlere giren Radon gazı, alfa ışıması yapar ve canlı dokularda iyonizasyona neden olur. Bu da hücrelerin DNA yapısında değişikliklere neden olabilir ve akciğer kanserine yol açabilmektedir (Gümüş ve Yalım, 2022).

ICRP (Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi) ve TAEK (Türkiye Atom Enerjisi Kurumu) binalarda Radon gazı sınır değerini 400 Bq/m³ olarak belirlemiştir. WHO (Dünya Sağlık Örgütü) ise Radon limit değeri olarak 100 Bq/m³ belirlemiştir (Yörük, 2021).

Elektromanyetik Alan (EMA) iyonize olmayan radyasyondur ve EMA'ya yaşamımız boyunca yoğun bir şekilde maruz kalmaktayız. Tüm elektrikli cihazlar EMA yaymaktadır. Baz istasyonları, cep telefonları, Wi-fi modemleri, bilgisayarlar EMA kaynaklarına örnek verilebilir. EMA'nın baş ağrısı, baş dönmesi, kalp ritmini etkilemesi, hafıza kaybı gibi sağlık sorunlarına yol açtığı bildirilmiştir (Tekin ve Emikönel, 2024). Uluslararası İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyondan Korunma Komisyonu (ICNIRP) EMA için sınır değerleri 900 MHz'de 41,25 V/m; 1800 MHz'de 58,33 V/m olarak belirlemiştir.

Yüksek miktarda solunan Radon gazının kansere yol açtığı, EMA hassasiyeti yüksek olan kişilerde ciddi sağlık sorunları görülebildiği bilinmektedir. Bu nedenle üniversite öğrencilerinin öğrenim gördükleri

dersliklerde Radon gazı konsantrasyonunun ve EMA değerlerinin ölçülmesi büyük önem teşkil etmektedir.

Bu amaçla, bu araştırmada, Uşak Üniversitesi öğrencilerinin öğrenim gördükleri dersliklerde, Radon gazı ve EMA değerlerinin ölçülerek ulusal ve uluslararası kabul edilen sınır değerlerle karşılaştırılması ve iş sağlığı ve güvenliği yönünden değerlendirilmesi amaçlanmaktadır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu araştırma TÜBİTAK 2209/A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projesinden türetilmiştir (Proje No: 1919B012106759). Araştırma için Uşak Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Etik Kurulu'ndan izin alınmıştır (Karar No: 2023/05). Radon gazı ölçümleri, proje bütçesi ile alınan Airthings 222 Corentium Home Radon gaz dedektörü ile gerçekleştirilmiştir. Ölçüm doğruluğunu artırmak için Radon dedektörü dersliklerde üç gün boyunca bekletilmiştir. Derslikler üç gün boyunca kilitli tutulmuş, cam ve perdeler kapalı tutulmuştur. Radon dedektörü yerden 50 cm mesafede olacak şekilde yerleştirilmiştir. Üç gün sonunda cihazda okunan Radon konsantrasyon değeri o dersliğin Radon değeri olarak alınmıştır. radon ölçümleri binaların zemin, birinci ve ikinci karlarındaki dersliklerde gerçekleştirilmiştir. Binadaki tüm dersliklerin Radon konsantrasyonu değerlerinin ortalaması da o binanın Radon değeri olarak alınmıştır. Bina Radon konsantrasyonu değerleri kullanılarak, her bina için 8 saatlik Yıllık Etkin Eşdeğer Doz (YEDE) değerleri hesaplanmıştır.

EMA ölçümleri, Extech 480846 Elektromanyetik Alan Ölçüm Cihazı ile kısa süreli-anlık ölçümler şeklinde gerçekleştirilmiştir. Dersliklerin iki köşesinde ve ortasında, 30'ar saniye aralıklı, 6 dakikalık ölçümler alınmıştır. EMA ölçümleri 2023 yılı Mart-Temmuz ayları arasında yapılmıştır. Her ölçüm noktasında, 6 dakikalık sürede toplam 12 ölçüm yapılmıştır. Bu 12 ölçümün ortalaması o noktanın EMA değeri olmuştur. 3 ölçüm noktasındaki EMA değerlerinin ortalaması o dersliğin EMA değerleri olarak alınmıştır.

EMA ölçümleri yerden 90 cm yükseklikte (bel hizasında) gerçekleştirilmiştir. 6 dakikalık ölçümlerin alınmasının nedeni, EMA değerlerindeki anlık yükselme ve düşmelerinin ölçüm sonuçlarının etkilememesi için, ICNIRP tarafından belirlenmiş olmasıdır (Tekin ve Emikönel, 2024).

Dersliklerde ölçümleri alınan EMA değerleri; Elektrik Alan Maksimum (Emax), Elektrik Alan Ortalama (Eort), Manyetik Alan Maksimum (Bmax) ve Manyetik Alan Ortalama (Bort) değerleridir. Dersliklerde gerçekleştirilen EMA ölçümleri, dersliklerin boş olduğu zamanlarda gerçekleştirilmiştir.

BULGULAR

Uşak Üniversitesi'ndeki dersliklerde gerçekleştirilen Radon gazı ve EMA ölçümleri, Mühendislik Fakültesi, Tıp Fakültesi, Güzel Sanatlar Fakültesi, Eğitim Fakültesi, Fen Edebiyat Fakültesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Sosyal-Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu binalarının dersliklerinde ve Merkez öğrenci kütüphanesinde yapılmıştır.

Radon gazı ölçümlerinde en yüksek ve en düşük Radon gazı konsantrasyonu değerleri ölçülen binaların ve tüm binaların ortalama Radon değerleri Tablo 1, 2 ve 3'de verilmiştir.

Tablo 1: En yüksek Radon gazı değeri ölçülen binanın ortalama Radon değerleri.

GÜZEL SANATLAR FAKÜLTESİ			
	ZEMİN KAT (Bq/m ³)	KAT-1 (Bq/m ³)	KAT-2 (Bq/m ³)
DERSLİK-1	82	63	53
DERSLİK-2	80	56	58
DERSLİK-3	75	47	37
ORTALAMA	79	55,3	49,3
BİNA ORTALAMASI	51,2		

Tablo 2: En düşük Radon gazı değeri ölçülen binanın ortalama Radon değerleri.

SOSYAL TEKNİK MESLEK YÜKSEKOKULU			
	ZEMİN KAT (Bq/m ³)	KAT-1 (Bq/m ³)	KAT-2 (Bq/m ³)
DERSLİK-1	20	6	10
DERSLİK-2	18	7	14
DERSLİK-3		14	
ORTALAMA	19	9	12
BİNA ORTALAMASI	13,3		

Tablo 3: Tüm binaların ortalama Radon değerleri.

DERSLİKLERİN BULUNDUĞU BİNALARIN ORTALAMA RADON DEĞERLERİ	
BİNA	Radon Değerleri (Bq/m ³)
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ	15,7
TIP FAKÜLTESİ	35,3
GÜZEL SANATLAR FAKÜLTESİ	51,2
EĞİTİM FAKÜLTESİ	27,1
FEN EDEBİYAT FAKÜLTESİ	34,1
İKTİSADİ VE İDARİ BİLİMLER FAK.	31,6
SOSYAL TEKNİK MYO	13,3

Binaların ortalama Radon gazı değerleri, Uşak Üniversitesi'nde öğrenim gören gençlerin, Radon gazına maruz kalmaları sonucu alacakları yıllık etkin doz eşdeğeri (YEDE) hesaplanmasında kullanılmıştır (8 saat için). Binaların YEDE değerleri Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4: Binaların yıllık etkin doz eşdeğeri (YEDE) değerleri.

BİNA İÇİ YILLIK ETKİN DOZ EŞDEĞER (YEDE) DEĞERLERİ	
BİNA	8 SAAT İÇİN ALINACAK YILLIK ETKİN DOZ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ	0,11 mSv
TIP FAKÜLTESİ	0,25 mSv
GÜZEL SANATLAR FAKÜLTESİ	0,36 mSv
EĞİTİM FAKÜLTESİ	0,19 mSv
FEN EDEBİYAT FAKÜLTESİ	0,24 mSv
İKTİSADİ VE İDARİ BİLİMLER FAK.	0,22 mSv
SOSYAL TEKNİK MYO	0,09 mSv

EMA ölçümleri için, en yüksek ve en düşük Elektrik Alan değerleri ölçülen binaların ve tüm binaların ortalama EMA değerleri Tablo 5, 6 ve 7’de verilmiştir.

Tablo 5: En yüksek EMA değerleri ölçülen binanın ortalama EMA değerleri.

EĞİTİM FAKÜLTESİ				
	E _{max} (mV/m)	E _{ort} (mV/m)	B _{max} (mA/m)	B _{ort} (mA/m)
Zemin	836,6	17,4	0,02	0,01
Kat 1	400,8	10,1	1	0,03
Kat 2	363,2	13,3	0,3	0,02
Ortalama	533,5	13,6	0,4	0,02

Tablo 6: En düşük EMA değerleri ölçülen binanın ortalama EMA değerleri.

GÜZEL SANATLAR FAKÜLTESİ				
	E _{max} (mV/m)	E _{ort} (mV/m)	B _{max} (mA/m)	B _{ort} (mA/m)
Zemin	10,1	6,9	0,02	0,01
Kat 1	32,6	16,5	0,09	0,03
Kat 2	28,9	13,9	0,06	0,01
Kat 3	22,3	6,6	0,04	0,01
Ortalama	23,4	10,9	0,05	0,01

Tablo 7: Tüm binaların ortalama EMA değerleri.

	E _{max} (mV/m)	E _{ort} (mV/m)	B _{max} (mA/m)	B _{ort} (mA/m)
FEN EDEBİYAT FAKÜLTESİ	407,2	93,6	0,6	0,1
İKTİSADİ VE İDARİ BİLİMLER FAKÜLTESİ	168,9	17	0,2	0,03
GÜZEL SANATLAR FAKÜLTESİ	23,4	10,9	0,05	0,01
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ	57,5	30,4	0,1	0,01
EĞİTİM FAKÜLTESİ	533,5	13,6	0,4	0,02
SOSYAL TEKNİK MYO	209,5	74,9	0,5	0,15
MERKEZ KÜTÜPHANE	264,8	8,9	0,9	0,08
ORTALAMA	237,8	35,6	0,4	0,05

SONUÇ VE ÖNERİLER

Radon gazının akciğer kanseri oluşumunda en önemli ikinci etken olduğu bildirildiğinden (Gümüş ve Yalım, 2022), üniversitelerde öğrenim gören öğrencilerin öğrenim gördükleri dersliklerdeki Radon gazı konsantrasyon değerlerinin belirlenmesi büyük önem teşkil etmektedir. Ülkemizdeki bazı üniversitelerimizde, binaların Radon gazı değerleri belirlenmiştir. Karadeniz Teknik Üniversitesi Kanuni Kampüsü (Duran ve Küçükömeroğlu, 2020), Sütçü İmam Üniversitesi Avşar Kampüsü (Küçükönder, 2021), Giresun Üniversitesi Kampüsü (Büyüksulu vd., 2018), Okan Üniversitesi Kampüsü (Kulalı, Günay ve Aközcan, 2019) ve Afyon Kocatepe Üniversitesi Kampüsü (Gümüş ve Yalım, 2022) binalarında ölçülen Radon gazı konsantrasyonları sınır değerlerin altındadır.

Bu araştırmada da ölçülen ortalama Radon gazı konsantrasyonu değerleri, ulusal ve ulusal kuruluşların belirlediği limit değerlerin altındadır. En yüksek ortalama Radon değeri Güzel Sanatlar Fakültesi binasında 51,2 Bq/m³ olarak ölçülmüştür. Bu araştırmada dersliklerde ölçülen en yüksek Radon değeri de Güzel Sanatlar Fakültesi Zemin katındaki derslikte 82 Bq/m³ olarak ölçülmüştür. Bu değer WHO'nun sınır değeri olan 100 Bq/m³ değerine yakındır. Güzel Sanatlar Fakültesi Binası Uşak Üniversitesi'nin en eski binasıdır. Yüksek Radon değerlerinin ölçülmesinin sebeplerinden birisi bu olabilir. Bu bina için Radon gazı konsantrasyonunu düşürücü önlemler alınmalıdır.

Radon ortalama konsantrasyonunun en düşük ölçüldüğü dersliklerin olduğu bina 13,3 Bq/m³ ile Sosyal-Teknik Bilimler MYO binası olmuştur.

Tıp Fakültesi Binasının son yıllarda yapılmasına rağmen, Zemin katında bulunan bir derslikte de (Amfi) Radon konsantrasyonu nispeten yüksek değerde ölçülmüştür (54 Bq/m³). Bu derslikte sadece küçük bir pencere vardır. Dersliğin havalandırma kapasitesi artırılmalıdır.

Etkin doz, dokularımızın aldığı dozun, vücudumuz için teşkil ettiği riski belirtir. Yıllık etkin doz eşdeğeri (YEDE) de, bir kişinin çeşitli radyasyon kaynaklarından yayılan ışınlara maruz kalarak bir yıl süre içinde alacağı radyasyon dozudur (Gümüş ve Yalım, 2022). Bina içi YEDE değerlerinin hesaplanması, dersliklerde öğretimlerini alan öğrencilerimizin Radon maruziyetlerinin belirlenmesi açısından büyük önem teşkil etmektedir. Binaların YEDE değerleri;

$YEDE = C * F * D * t$ formülü ile hesaplanmıştır. Formülde,
C (Rn): Radon konsantrasyonu (Bq/m³),
F: Radon ile bozunma ürünleri arasındaki denge faktörü,
D: Doz dönüşüm katsayısı,
t: Bina içerisinde bir yılda ortalama geçirilen zaman (saat) olup;
Denge faktörü 0,4; Doz Dönüşüm Katsayısı ise 9×10^{-9} (Sv/saat)/(Bq/m³) olarak alınmıştır. Zaman, çalışma saatleri; 8 saat olarak alınmıştır.

Tablo 4’de, YEDE değerleri 0,09-0,36 mSv aralığında bulunmuştur. En yüksek YEDE değeri 0,36 mSv ile Güzel Sanatlar Fakültesinde, en düşük YEDE değeri ise 0,09 mSv ile Sosyal-Bilimler Teknik MYO’da elde olunmuştur. Uşak Üniversitesi binalarında ve dersliklerinde elde olunan YEDE değerleri ulusal ve uluslar arası limit değerlerin altındadır.

Radon gazına maruziyet kaçınılmazdır. Ancak daha az maruz kalmak için tedbirler alınması sağlık için ciddi öneme sahiptir. TAEK bina içi radon konsantrasyonunu minimuma indirmek için aşığıdaki tedbirleri açıklamıştır:

- Bina yapı malzemelerinin radyoaktivite ölçümleri yapılmalıdır. İzolasyon ile binaların toprak teması engellenmelidir.
- Su ve doğalgaz sistemleri periyodik kontrol edilmelidir.
- Binalardaki havalandırma sistemleri iyi seviyede olmalıdır.
- Eski binaların kırık ve çatlakları onarılmalıdır.
- Kapalı ortamlarda çalışanlara Radonun zararlı etkileri konusunda eğitim verilmelidir.

EMA’nın sağlığa olumsuz etkileri bilinmektedir. Teknolojik cihazların sayısının günde güne artması, üniversite öğrencilerinin sağlığını da tehdit eder duruma gelmiştir. Üniversitemizde EMA ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bitlis Eren Üniversitesi Kampüsü (Aygün ve Aygün, 2022), Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Kampüsü (Dilek ve Şahin 2021), İnönü Üniversitesi Kampüsü (Karadağ, Özdemir ve Abbasov, 2014) ve Ege Üniversitesi Kampüsü (Yörük, Çam ve Canbaz, 2021) derslik ve binalarında EMA değerleri yasal sınırların altında ölçülmüştür.

Bu araştırmada da Uşak Üniversitesi dersliklerinde ölçülen EMA değerleri yasal sınır değerlerin altında ölçülmüştür. Emax değerleri 23,4-533,5 mV/m arasında değişmektedir (Tablo 7). En yüksek ortalama Emax değeri 533,5 mV/m ile Eğitim Fakültesi’nde, en düşük Emax değeri ise 23,4 mV/m ile Güzel Sanatlar Fakültesi’nde ölçülmüştür. Bmax değerleri de 0,05-0,9 mA/m arasında değişmektedir. En yüksek Bmax değeri 0,9 mA/m ile merkez öğrenci kütüphanesinde, en düşük Bmax değeri ise Güzel Sanatlar Fakültesinde ölçülmüştür.

Bu araştırmada Emax ve Bmax olarak ölçülen en yüksek değerler, 726,7 mV/m ve 3,2 mA/m ile merkez öğrenci kütüphanesinin zemin katında bilgisayarların olduğu bölümde ölçülmüştür. Öğrenciler kütüphanede uzun zaman geçirdikleri için, bilgisayarların yaydığı EMA’nın azaltılmasına yönelik çalışma yapılması gerekmektedir.

Uşak Üniversitesi’ndeki Fakülte ve Meslek Yüksekokulların dersliklerinin olduğu binaların EMA değerlerinin yasal sınır değerinin çok altında olması iyi bir sonuç olarak düşünülebilir. Ancak, EMA’ya uzun süreli maruziyetin insan sağlığında yaratabileceği olumsuz etkilerin de düşünülmesi gerekmektedir. EMA’ya maruziyeti azaltmak için, aşığıda verilen önerilerin gerçekleştirilmesi faydalı olacaktır:

- Kullanılmayan elektrikli cihazlar kapatılmalı, fişinden çekilmelidir.
- Masaüstü bilgisayarlar için düşük radyasyon yayan ekranlar kullanılmalı ya da ekran filtresi olmalıdır.
- Laptoplar şarjlı bir şekilde kullanılmalıdır ancak şarj edilirken uzak mesafede bulunulmalıdır.
- Binalardaki Elektromanyetik Alan ölçümleri periyodik olarak yapılmalıdır. Gerekli olması halinde önlemler uygulanmalıdır.

Bu araştırmada dersliklerde ölçülen Radon gazı konsantrasyonları ve EMA değerleri yasal sınırların altındadır. Buradan hareketle öğrenciler için sağlık riski oluşmadığı düşünülebilir. Ancak EMA yayan kaynakların artması ve binaların yaşlanması nedeniyle Radon gazı konsantrasyonu ve EMA değerleri periyodik olarak ölçülmelidir. Uşak Üniversitesi Kampüsündeki dersliklerin olduğu binalarda daha uzun süreli ölçümlerin iki yılda bir yapılması önerilmektedir.

REFERANSLAR

- Büyüksulu H, Özdemir FB, Öge TÖ, Gökce H. (2018). Indoor and tap water radon (^{222}Rn) concentration measurements at Giresun University campus areas. *Appl Radiat Isot. Sep*;139:285-291. doi: 10.1016/j.apradiso.2018.05.027.
- Dilek, B., As, N., & Şahin, M. E. (2021). Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Merkez Kampüsünde Elektromanyetik Alan Kirlilik Ölçümü ve Spektrum Analizi. *Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2(1), 53-65. <https://doi.org/10.53501/rteufemud.916087>
- E. Küçükönder. (2021). Kahramanmaraş İlinde Bina İçi Mevsimsel Radon Gazı Aktivitesi Ölçümü. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, c. 10, sy. 3, ss. 891–901. doi: 10.17798/bitlisfen.944134
- Emikönel, S., Tekin, E. (2023a). Dış Hekimliği 5. Sınıf Öğrencilerinin Radyasyon ve Radyasyon Güvenliği Hakkında Bilgi Düzeylerinin Değerlendirilmesi, *Ege 9th International Conference on Applied Sciences September 22-24, Izmir, Turkey*, 125-131
- Emikönel, S., Tekin, E., Kaya R.R. (2023). Tıbbi Görüntüleme Teknikleri Programı Öğrencilerinin Radyasyon Kavramına İlişkin Algıları, *Ases IV. International Scientific Research Conference May 13-14, Istanbul, Turkey*, 351-358
- Emikönel, S., Tekin, E. (2023b). Lise Öğrencilerinin Radyasyon Bilgi Düzeylerinin Değerlendirilmesi, *Ases VI. International Scientific Research Conference December 22-24, Ankara, Turkey*, 267-273
- Emikönel, S., Türkmen, İ., & Tekin, E. (2024). Tıbbın Gören Gözü: Radyoloji ile ilgili Haberlerin Analizi. *VIII. International Scientific Research Congress, Conference Book*, November 28-30 (s. 437-448). Lefkoşa, KKTC: Ases Publications.

- Gümüş, A., & Yalım, H. A. (2022). Afyon Kocatepe Üniversitesi Ahmet Necdet Sezer Kampüsü Bina içi Radon Konsantrasyonlarının ve Yıllık Etkin Doz Eşdeğerlerinin Belirlenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(4), 719-729. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1142177>
- Günay, O., Aközcan, S., & Kulalı, F. (2018). Bina İçi Radon Konsantrasyonlarının Belirlenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* (13), 91-97. <https://doi.org/10.31590/ejosat.442702>
- Karadağ, T., Özdemir, A. R., & Abbasov, T. (2014). Bir Üniversite Yerleşkesinde Uzun Süreli Elektromanyetik Alan Ölçümleri ve Kirlilik Haritaları. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(8), 314-318. <https://doi.org/10.5505/pajes.2014.78941>
- Kaya, R. R., Özyıldız, K. H., Alkan, A. (2022). Modern İş Yaşamının Korkutan Yönleri. R. Erdem, K. Sezer Korumcu (Ed.). Modern İş Yaşamının Eleştirisi. Nobel Yayınevi: Ankara.
- Kulalı, F., Günay, O. & Aközcan, S. (2019). Determination of indoor radon levels at campuses of Üsküdar and Okan Universities. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 16, 5281–5284. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02369-5>
- S. Uzun Duran ve B. Küçükömeroğlu. (2020). Karadeniz Teknik Üniversitesi Kanuni Kampüsü'nde Bazı Ofislerde Radon Gazı Ölçümü ve Çevrelerindeki Topraklarda Radyonüklid Seviyeleri. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, c. 9, sy. 1, ss. 68–77. doi: 10.17798/bitlisfen.576178
- Tekin, E., Emikönel, S. (2024). Bir Özel Hastanede Elektromanyetik Alan (EMA) Ölçümlerinin Gerçekleştirilmesi: Uşak İli Örneği. *Uşak Üniversitesi Fen ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 8(1), 31-38
- Tekin, E., Emikönel, S., Kaya R.R. (2023). Sağlık Hizmetlerinde Tıbbi Atıklar ile ilgili Araştırmaların Bibliyometrik Analizi, *Ases IV. International Scientific Research Conference* May 13-14, Istanbul, Turkey, 341-350
- Yörük, E., Çam, F., & Canbaz, B. (2021). Güvenli Çalışma Ortamları İçin Radyasyon Riskinin Değerlendirilmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 23(68), 357-367. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2021236802>
- Z. Aygun and M. Aygün. (2022). Electromagnetic pollution analysis of Bitlis Eren University main and vocational school campus. *Bitlis Eren University Journal of Science and Technology*, vol. 12, no. 1, pp. 1–6, 2022, doi: 10.17678/beuscitech.1029003

Çok Aralıklı Diferansiyel Denklemlerin Genelleştirilmiş DDY ile Çözümü

**Merve YÜCEL¹
Kadriye AYDEMİR²**

1-Dr. Öğr. Üyesi, Hitit Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Matematik Bölümü
merve.yucel@outlook.com.tr. ORCID No:0000-0001-7990-2821

2-Prof. Dr.; Amasya Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi Matematik Bölümü, kadriyeaydemir@gmail.com.
ORCID No: 0000-0002-8378-3949

ÖZET

Diferansiyel denklemler için başlangıç ve/veya sınır değer problemleri (SDP), doğa bilimlerinin tüm alanlarında çok geniş sınıftan olan süreçlerin matematiksel modeli olarak ortaya çıkar. Belirli tipteki diferansiyel denklemlerin kesin çözümlerini veya yaklaşık çözümlerini bulmak için çeşitli sayısal yöntemler geliştirilmiştir. Ancak, tüm diferansiyel denklemlerin analitik formda olan kesin çözümleri mevcut değildir. Genel olarak, salt analitik yöntemler klasik olmayan ve tekil diferansiyel denklemlerin kesin çözümlerini bulmak için uygulanamaz. Bu nedenle Sonlu Farklar Yöntemi, Atış Yöntemi, Homotopi Pertürbasyon Yöntemi, Adomian Ayırıştırma Yöntemi, Diferansiyel Dönüşüm Yöntemi vb. gibi çeşitli yaklaşık çözüm bulma yöntemleri, bilinmeyen çözümleri incelemek için etkili tekniklerdir.

Anahtar Kelimeler –DDY, Yaklaşık Çözümler, Geçiş Şartları, SDP, α –Parametrelili DDY.

GİRİŞ

Mühendislik, fizik, kimyasal fizik ve diğer doğa bilimleri alanlarında ortaya çıkan çeşitli tipteki önemli problemler, yüksek mertebeden adi diferansiyel denklemler (ADD) ve kısmi diferansiyel denklemler (KDD) için başlangıç değeri ve SD problemleri kullanılarak modellenebilir. Bu nedenle, Taylor serisi yöntemi, Euler yöntemi, Diferansiyel Dönüşüm Yöntemi (DDY), Runge-Kutta yöntemi, Sonlu Farklar yöntemi, Varyasyonel İteratif yöntem, Atış Yöntemi vb. gibi çeşitli yarı analitik, sayısal veya yaklaşık yöntemler, çeşitli ADD ve KDD tipleri için başlangıç ve/veya SD problemlerinin çözümlerinin nitel özelliklerini araştırmak ve anlamak için geliştirilmiştir. Birçok yaklaşık ve sayısal yöntem, karmaşık cebirsel hesaplamalar gerektirebileceğinden çeşitli klasik olmayan ve/veya tekil problemleri çözmede yeterince etkili değildir. Ancak, diferansiyel dönüşüm tekniği, basit bir algoritmaya dayandığından çoğu düzenli SDP ve bazı klasik olmayan tekil SDP'ler için yararlı yaklaşık çözümler sağlayabilir. Bu en basit algoritma, veri fonksiyonlarının yüksek mertebeden türevlerinin büyük hesaplamalarını gerektirmemesi bakımından diğerlerinden farklıdır. 1986'da Zhou, elektrik devrelerinin matematiksel modellemesinde ortaya çıkan başlangıç/sınır değer problemlerini çözmek için Diferansiyel Dönüşüm Yöntemi (DDY) adı verilen yeni bir yaklaşık çözüm bulma yöntemi geliştirdi. DDY'nin başlıca avantajı, kapsamlı sayısal hesaplamalar gerektirebilecek doğrusallaştırma, ayrıklaştırma veya perturbation (tedirgeme) tekniklerini gerektirmeyen nispeten geniş bir başlangıç/sınır değeri problemleri sınıfına uygulanabilmesidir. Dahası, bazı yaklaşık çözüm bulma yönteminden farklı

olarak, DDY yardımcı fonksiyonları tanımlamayı, yardımcı parametreleri hesaplamayı veya uygun başlangıç veya sınır koşullarını belirtmeyi gerektirmez. DDY çeşitli diferansiyel denklem tiplerini çözmek için kullanılabilir. Örneğin, Hassan (2002:1) bu yöntemi Sturm-Liouville denklemi için özdeğer problemlerini çözmek için uyguladı. Unal ve Gokdogan (2017:264) uyumlu kesirli diferansiyel denklemleri çözmek için DDY'yi geliştirdi.

Bu çalışmada, klasik DDY'yi yalnızca tek aralıklı başlangıç/sınır değeri problemlerine değil, aynı zamanda etkileşim noktalarında tanımlanan ek geçiş koşulları içeren çok aralıklı problemlere de uygulanabilecek şekilde uyarlıyoruz. DDY'nin önerilen modifikasyonunun etkinliğinin esaslandırılması için, üç aralıklı tekil

$t^2 u''(t) - 2tu'(t) + 2u(t) = 0, \quad t \in [0,1) \cup (1,2) \cup (2,3]$
diferansiyel denkleminde

$$u(0) = 0, \quad u'(0) = 2$$

başlangıç şartlarından ve

$$u(1+0) = u(1-0), \quad u'(1+0) = \frac{3}{2}u(1-0)$$

$$u(2+0) = 2u(2-0), \quad u'(2+0) = 2u(2-0)$$

geçiş şartlarından oluşan çok-aralıklı problemi daha da geliştirilmiş diferansiyel dönüşüm yöntemi ile çözüldü.

Ayrıca

$tu''(t) - (t+1)u'(t) + u(t) = 0, \quad t \in [0,1) \cup (1,2) \cup (2,3]$
tekil diferansiyel denklemden

$$u(0) = 2, \quad u'(0) = 2$$

başlangıç şartlarından ve

$$u(1+0) = \frac{3}{2e}u(1-0), \quad u'(1+0) = \frac{1}{e}u(1-0)$$

$$u(2+0) = \frac{6}{3+e}u(2-0), \quad u'(2+0) = \frac{2}{3+e}u(2-0)$$

geçiş şartlarından oluşan bir çok-aralıklı problemi incelendi.

Bu problem, DDY'nin önerilen modifikasyonu kullanılarak çözüldü. Önerilen tekniği doğrulamak için elde edilen yaklaşık DDY çözümünün grafiği, aşağıdaki şekilde verilen kesin çözümün grafiği ile karşılaştırılmıştır.

$$u(t) = \begin{cases} 2e^t & \text{in} & t \in [0,1) \\ t + e^{t-1} + 1 & \text{in} & t \in (1,2) \\ 2t + 2 & \text{in} & t \in (2,3]. \end{cases}$$

Ayrıca,

$$(t^2 + \frac{2}{3}t + \frac{1}{12})u''(t) - (2t + \frac{2}{3})u'(t) + 2u(t) = 0, \quad t \in [0,1) \cup (1,2]$$

diferansiyel denkleminde

$$u(0) = 1, \quad u'(0) = 3$$

başlangıç şartlarından ve

$$u(1+0) = \frac{13}{4}u(1-0), \quad u'(1+0) = 5u'(1-0)$$

geçiş şartlarından oluşan sınır-değer-geçiş probleminin çözümü aynı yöntem ile incelenmiştir. Daha sonra ise α –parametrelili dönüşüm yöntemi tanıtılarak,

$$u''(t) + 4u(t) = 0, \quad t \in [-1,1]$$

diferansiyel denklemi ve

$$u(-1) = 0, \quad u'(1) = 1$$

sınır şartları ile verilen sınır değer probleminin çözümü bu yöntem ile araştırılmıştır.

Diferansiyel dönüşüm yöntemi (DDY) ilk olarak Zhou tarafından elektrik devrelerinin matematiksel modellemesinde ortaya çıkan bazı diferansiyel denklemlere yaklaşık çözümler bulmak için önerildi (Zhou, 1986). Bu yöntem, başlangıç ve/veya sınır koşulları altında çeşitli tipteki ADD ve KDD'leri çözmek için etkili yaklaşık yöntemlerden biridir. DDY, analitik fonksiyonların Taylor serisine dayanmasına rağmen, Taylor serisinin aksine, verilen analitik fonksiyonların yeterince yüksek türevlerinin hesaplanmasını gerektirmez. Bunun yerine, DDY, yaklaşık çözümler, hatta bazı durumlarda kesin çözümler elde etmek için Taylor serisinin yinelemeli terimlerini hesaplamak için tekraralama formülleri sağlar. Bildiğimiz kadarıyla, fizik, kimya, mühendislik ve diğer doğa bilimleri dallarındaki bazı fenomenler, sınır ve iletim koşullarıyla birlikte çok aralıklı diferansiyel denklemlerle modellenir. Örneğin, çok aralıklı diferansiyel denklemler için sınır iletim problemleri kuantum mekaniği, hidrolik kırılma, ısı ve kütle transferi, nokta kütlelerle yüklenen iplerin titreşimi, jeotermal sistemler, paralel plakalar arasındaki akışkan akışı, kimyasal katalitik reaktörler vb. alanlarının bazı problemlerinde ortaya çıkar. Birçok yazar, farklı tipteki doğrusal ve doğrusal olmayan denklemler için başlangıç ve/veya sınır değer problemlerini çözmek için DDY ve çeşitli modifikasyonlarını uygulamıştır. Mukhtarov ve arkadaşları, çeşitli sınır değer problemlerinin yaklaşık çözümlerini bulmak için DDY'nin yeni bir modifikasyonunu (α -parametrelili DDY) önermektedir (Mukhtarov vd., 2021:49). Bu çalışmanın temel amacı, belirli başlangıç ve geçiş koşulları altında çok aralıklı tekil diferansiyel denklemlerin yaklaşık çözümünü bulmak için klasik DDY' nin yeni bir modifikasyonunu sunmaktır. Bu yöntem, yüksek doğruluk, minimum hesaplama maliyeti ve fiziksel olarak gerçekçi olmayan varsayımlardan kaçınma ile verimli yaklaşık çözümler sağlar. DDY, Taylor serisini tamamen farklı bir şekilde formüle eden yarı analitik bir yöntemdir. Bu yöntemle, verilen bir diferansiyel denklem ve ilişkili başlangıç ve/veya sınır koşulları, nihayetinde bir kuvvet serisi çözümünün katsayıları olarak bir cebirsel denklemlerin çözümüne yol açan

tekrarlama denklemine dönüştürülür. Bu yöntem, doğrusal ve doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerin yaklaşık çözümlerini ve bazı durumlarda kesin çözümlerini elde etmek için yararlıdır. Birçok yazar, farklı denklem tipleri için çeşitli başlangıç ve/veya sınır değer problemlerini çözmek için farklı sayısal veya yarı analitik yöntemlerin yanı sıra DDY'yi de uygulamıştır (Ayaz, 2004:649; Yücel ve Mukhtarov, 2018:161; Mukhtarov vd. 2019:85; Mukhtarov vd., 2021:49; Olğar vd., 2018:911; Mukhtarov vd, 2020:284; Aydemir vd, 2019:97; Şen ve Mukhtarov, 2016:153; Öztürk ve Mukhtarov, 2023:37; Allahverdiev ve Tuna, 2018:1; Gultekin ve Altinisik, 2014:384; Gultekin ve Altinisik, 2014:31). Diferansiyel denklemler için yüksek mertebeden sınır değer problemleri, doğa bilimlerinin tüm alanlarındaki çok çeşitli fiziksel ve kimyasal fenomenleri modellemek için gereklidir. Çoğu durumda, bu sınır değer problemlerine kesin bir çözüm elde etmek imkansızdır. Bu nedenle, güvenilir bir yaklaşık çözüm bulmak veya kesin çözümün nitel doğasını anlamak için yeni bir sayısal yöntem geliştirmeye yönelik artan bir ilgi vardır. Son yıllarda, klasik DDY'nin ve çeşitli genellemelerinin çözümüne uygulanması büyük ilgi çekmiştir. Örneğin, Momami ve Noor (2007:218), klasik diferansiyel dönüşüm yöntemini, Adomian ayrıştırma yöntemini ve homotopik bozulma yöntemini kullanarak farklı analitik teknikler göstermiş ve özel bir dördüncü mertebeden sınır değer problemini çözerken bu yöntemlerin sayısal bir karşılaştırmasını vermiştir. Hassan ve Ertürk (2009:426), yüksek mertebeden sınır-değer problemlerini çözmek için DDY'yi kullandı. Hussin ve Kılıçman (2011:724927), doğrusal ve doğrusal olmayan sınır-değer problemlerini çözmek için DTM ve ADM'yi uyguladı. Zahar (2013:257), tekil bozulmuş dördüncü derece SDP'lerin sayısal çözümlerini elde etmek için DDY'yi kullandı.

Wazwaz (2002:345), özel tip yüksek mertebeden SDP'lerin sayısal çözümünü elde etmek için değiştirilmiş bir ayrıştırma yöntemi kullandı. Bazı çalışmalarda, DDY, yaklaşık çözümleri ve çeşitli Sturm-Liouville problemlerinin spektral özelliklerini incelemek için kullanılabilecek şekilde genelleştirilmiştir (Mukhtarov vd. 2021:49; Mukhtarov vd. 2019:85; Mukhtarov vd. 2020:8019460). Boukary ve arkadaşları (Boukary vd. 2018:1476), dördüncü dereceden parabolik tip kısmi diferansiyel denklemleri çözmek için Adomian ayrışım yöntemi (AAY) kullanır.

Kwami ve arkadaşları (Kwami vd. 2020:8), dördüncü dereceden ADD'leri çözmek için AAY'nin yeni bir modifikasyonunu tanıttı. Bu modifikasyon, dikkate alınan dördüncü dereceden ADD'yi Volterra tipi eşdeğer bir integral denkleme dönüştürmeye dayanmaktadır. Mukhtarov ve Yücel (2020:415), fizik ve mühendislikte birçok olayı modellemede ortaya çıkan iki aralıklı Sturm-Liouville problemlerinin özdeğerlerini ve özfonksiyonlarını araştırmak için AAY'yi kullandı. Yücel ve Mukhtarov (2018:161), klasik olmayan SDP'lerini çözmek için DDY'nin yeni bir genellemesini geliştirmiştir; bu, sınır koşullarının ek koşullar verildiğinde bazı iç noktaları içermesi bakımından klasik sınır değer problemlerinden farklıdır. Duan ve arkadaşları

(2012:7), DDY'ye ve kesirli mertebeden diferansiyel denklemleri çözümedeki uygulamalarına genel bir bakış sağlamıştır. Şimdi de kullanacağımız yöntemi inceleyelim.

DİFERANSİYEL DÖNÜŞÜM YÖNTEMİ

Kabul edelim ki $f(x)$ fonksiyonu (a, b) aralığında analitik bir fonksiyondur ve $x_0 \in (a, b)$ keyfi bir noktadır. Bu durumda

$$K_{x_0}(f, l) = \frac{1}{l!} \left[\frac{d^l}{dx^l} f(x) \right]_{x=x_0}, \quad l = 0, 1, 2, \dots$$

eşitliği ile tanımlı $K_{x_0}(f, l)$, $l = 0, 1, 2, \dots$ dizisi tek değişkenli $f(x)$ fonksiyonunun tek boyutlu diferansiyel dönüşümü olarak adlandırılır. Ayrıca (a_l) bir reel sayılar dizisi ise

$$K_{x_0}^{-1}(a_l) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n (x - x_0)^n$$

eşitliği ile tanımlı dönüşüme ters diferansiyel dönüşüm operatörü denir. Analitik fonksiyonların tanımı gereği

$$f(x) = K_{x_0}^{-1}(K_{x_0}(f, l))$$

eşitliği sağlanır. Diferansiyel dönüşüm aşağıdaki özellikleri verilebilir.

- Eğer $f(x) = g(x) + h(x)$ ise $K_{x_0}(f, l) = K_{x_0}(g, l) + K_{x_0}(h, l)$.
- Eğer $f(x) = cg(x)$ ise $K_{x_0}(f, l) = cK_{x_0}(g, l)$.
- Eğer $f(x) = \frac{d^n g(x)}{dx^n}$ ise $K_{x_0}(f, l) = \frac{(l+n)!}{l!} K_{x_0}(g, l+n)$.
- Eğer $f(x) = g(x)h(x)$ ise $K_{x_0}(f, l) = \sum_{r=0}^l K_{x_0}(g, r) K_{x_0}(h, l-r)$.
- Eğer $f(x) = c$ ise

$$K_{x_0}(f, l) = \begin{cases} c, & l = 0 \text{ ise} \\ 0, & l = 1, 2, 3, \dots \text{ ise} \end{cases} = c\delta(l).$$

Burada $\delta(l) = \begin{cases} 1, & l = 0 \text{ ise} \\ 0, & l \neq 0 \text{ ise} \end{cases}$ dır.

- Eğer $f(x) = x^m$, $m \in N$ ise

$$K_{x_0}(f, l) = \begin{cases} \frac{m!}{l!(m-l)!} x_0^{m-l}, & l < m \text{ ise} \\ 1, & l = m \text{ ise} \\ 0, & l > m \text{ ise} \end{cases}.$$

Özel olarak $x_0 = 0$ ise $K_{x_0}(x^m, l) = \delta(m - l)$. Reel uygulamalarda $K_{x_0}^{-1}(K_{x_0}(f, l))$ diferansiyel ters dönüşümü aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$K_{x_0}^{-1}(K_{x_0}(f, l)) \approx \sum_{n=0}^s K_{x_0}(f, n)(x - x_0)^n$$

Burada s yeteri kadar büyük doğal sayıdır.

ESAS SONUÇLAR

ÖRNEK 1.

$$t^2 u''(t) - 2tu'(t) + 2u(t) = 0, \quad t \in [0,1) \cup (1,2) \cup (2,3] \quad (1)$$

diferansiyel denklemden

$$u(0) = 0, \quad u'(0) = 2$$

başlangıç şartlarından ve

$$\begin{aligned} u(1+0) &= u(1-0), \quad u'(1+0) = \frac{3}{2}u(1-0) \\ u(2+0) &= 2u(2-0), \quad u'(2+0) = 2u(2-0) \end{aligned}$$

geçiş şartlarından oluşan sınır-değer-geçiş problemini (SDGP) göz önüne alalım.

Sırasıyla $t = 0$, $t = 1$ ve $t = 2$ için $u(t)$ fonksiyonunun diferansiyel dönüşümü $J_0(l)$, $J_1(l)$ ve $J_2(l)$ olsun. Eğer (1) diferansiyel denklemine $t_0 = 0$ için $[0,1)$ aralığında diferansiyel dönüşüm uygularsak,

$$J_0(u_1, l)(l^2 - 3l + 2) = 0 \quad (2)$$

elde ederiz. Şimdi de diferansiyel ters dönüşümü uygularsak $[0,1)$ aralığında

$$u_1(t) = J_0(u_1, 0) + J_0(u_1, 1)t + J_0(u_1, 2)t^2 + J_0(u_1, 3)t^3 + \dots$$

buluruz. $u(0) = 0$ ve $u'(0) = 2$ başlangıç şartlarını kullanarak

$$J_0(u_1, 0) = 0 \quad \text{ve} \quad J_0(u_1, 1) = 2$$

elde ederiz. (2) formülünü kullanarak da $(J_0(u_1, l))$ dizisinin diğer terimlerini bulabiliriz:

$$J_0(u_1, 2) = 0, \quad J_0(u_1, 3) = 0, \quad J_0(u_1, 4) = 0, \dots$$

Böylece,

$$\begin{aligned} u_1(t) &= J_0(u_1, 0) + J_0(u_1, 1)t + J_0(u_1, 2)t^2 + J_0(u_1, 3)t^3 + \dots \\ &= 2t \end{aligned}$$

ile $[0,1)$ aralığında tanımlanan çözümü elde ederiz.

İkinci olarak, $(1,2)$ aralığındaki çözümü araştıralım. Eğer diferansiyel denkleme $t_0 = 1$ noktasında diferansiyel dönüşüm yöntemini uygularsak,

$$J_1(u_2, l+2) = \frac{-1}{(l+1)(l+2)} [2(l^2 - 1)J_1(u_2, l+1) + (l^2 - 3l + 2)J_1(u_2, l)] \quad (3)$$

elde ederiz. $(1,2)$ aralığında diferansiyel ters dönüşüm uygulanarak,

$$u_2(t) = J_1(u_2, 0) + J_1(u_2, 1)(t-1) + J_1(u_2, 2)(t-1)^2 + J_1(u_2, 3)(t-1)^3 + \dots$$

elde edilir. $u(1+0) = u(1-0)$ ve $u'(1+0) = \frac{3}{2}u(1-0)$ geçiş şartları kullanılarak,

$$J_1(u_2, 0) = 2 \text{ ve } J_1(u_2, 1) = 3$$

elde edilir. (3) formülü kullanılarak da

$$J_1(u_2, 2) = 1, J_1(u_2, 3) = 0, J_1(u_2, 4) = 0, \dots$$

bulunur. Sonuç olarak,

$$\begin{aligned} u_2(t) &= J_1(u_2, 0) + J_1(u_2, 1)(t-1) + J_1(u_2, 2)(t-1)^2 \\ &\quad + J_1(u_2, 3)(t-1)^3 + \dots \\ &= t^2 + t. \end{aligned}$$

Üçüncü olarak, $(2, 3]$ aralığı için problemin çözümünü araştıralım. Eğer $t_0 = 2$ noktasında dönüşüm yöntemi diferansiyel denkleme uygulanırsa, aşağıdaki formül elde edilir.

$$J_2(u_3, l+2) = \frac{-1}{4(l+1)(l+2)} [(4l^2 - 4)J_2(u_3, l+1) + (l^2 - 3l + 2)K_2(u_3, l)]$$

$u(2+0) = 2u(2-0)$ ve $u'(2+0) = 2u(2-0)$ geçiş şartları kullanılarak,

$$J_2(u_3, 0) = 12 \text{ ve } J_2(u_3, 1) = 12$$

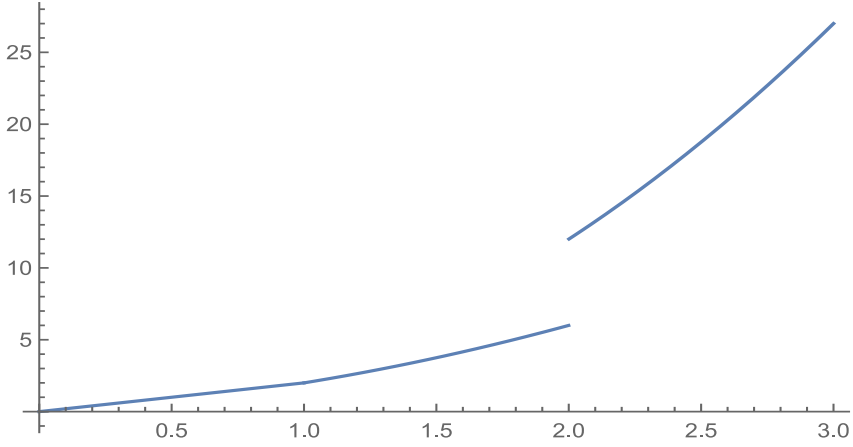
elde edilir. $K_2(u_3, l+2)$ formülü kullanılarak,

$$\begin{aligned} J_2(u_3, 2) &= \frac{1}{2}J_2(u_3, 1) - \frac{1}{4}J_2(u_3, 0), J_2(u_3, 3) = 0, \\ J_2(u_3, 4) &= 0, \dots \end{aligned}$$

bulunur. Böylece

$$u_3(t) = J_2(u_3, 0) + J_2(u_3, 1)(t-2) = 3t^2$$

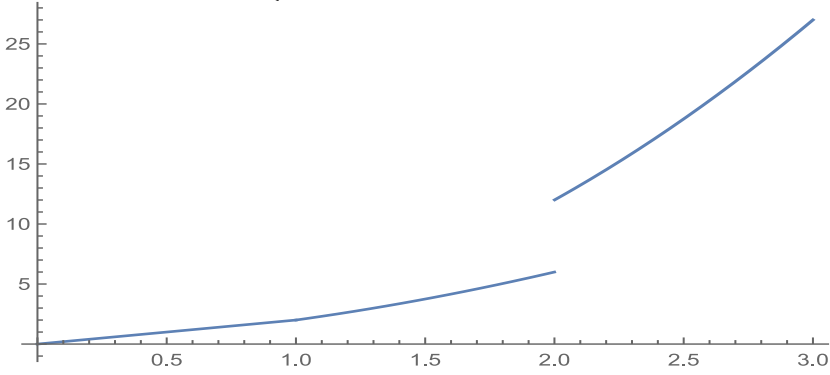
çözümü elde edilir.



Şekil 1: Yaklaşık çözüm grafiği

Ele alınan problemin tam çözümü aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$u(t) = \begin{cases} 2t + 6 & \text{için } t \in [0,1) \\ t + e^{t-1} + 3 & \text{için } t \in (1,2) \\ 3e^{t-1} & \text{için } t \in (2,3]. \end{cases}$$



Şekil 2: Tam çözüm grafiği

ÖRNEK 2.

$$tu''(t) - (t + 1)u'(t) + u(t) = 0, \quad t \in [0,1) \cup (1,2) \cup (2,3] \quad (4)$$

diferansiyel denkleminde

$$u(0) = 2, \quad u'(0) = 2$$

başlangıç şartlarından ve

$$\begin{aligned} u(1+0) &= \frac{3}{2e} u(1-0), \quad u'(1+0) = \frac{1}{e} u(1-0) \\ u(2+0) &= \frac{6}{3+e} u(2-0), \quad u'(2+0) = \frac{2}{3+e} u(2-0) \end{aligned}$$

geçiş şartlarından oluşan SDGP'yi göz önüne alalım.

Sırasıyla $t = 0$, $t = 1$ ve $t = 2$ için $u(t)$ fonksiyonunun diferansiyel dönüşümü $K_0(l)$, $K_1(l)$ ve $K_2(l)$ olsun. Eğer (4) diferansiyel denkleminde $t_0 = 0$ için $[0,1)$ aralığında diferansiyel dönüşüm uygularsak,

$$K_0(u_1, l+1) = \frac{1}{l+1} K_0(u_1, l) \quad (5)$$

elde ederiz. Şimdi de diferansiyel ters dönüşümü uygularsak $[0,1)$ aralığında

$$u_1(t) = K_0(u_1, 0) + K_1(u_1, 0)t + K_2(u_1, 0)t^2 + K_3(u_1, 0)t^3 + \dots$$

buluruz. $u(0) = 2$ ve $u'(0) = 2$ başlangıç şartlarını kullanarak

$$K_0(u_1, 0) = 2 \quad \text{ve} \quad K_0(u_1, 1) = 2$$

elde ederiz. (5) formülünü kullanarak da $(K_0(u_1, l))$ dizisinin diğer terimlerini bulabiliriz:

$$K_0(u_1, 2) = 1, \quad K_0(u_1, 3) = \frac{1}{3}, \quad K_0(u_1, 4) = \frac{1}{12}, \dots$$

Böylece, $[0,1)$ aralığında tanımlanan

$$\begin{aligned} u_1(t) &= K_0(u_1, 0) + K_0(u_1, 1)t + K_0(u_1, 2)t^2 + K_0(u_1, 3)t^3 + \dots \\ &= 2 + 2t + \frac{2}{3!}t^2 + \frac{2}{4!}t^3 + \dots = 2e^t \end{aligned}$$

çözümü elde ederiz.

İkinci olarak, $(1,2)$ aralığındaki çözümü araştıralım. Eğer diferansiyel denkleminde $t_0 = 1$ noktasında diferansiyel dönüşüm yöntemini uygularsak,

$$K_1(u_2, l+2) = \frac{-(l-2)}{(l+2)} K_1(u_2, l+1) + \frac{l-1}{(l+2)(l+1)} K_1(u_2, l) \quad (6)$$

elde ederiz. $(1,2)$ aralığında diferansiyel ters dönüşüm uygulanarak,

$$\begin{aligned} u_2(t) &= K_1(u_2, 0) + K_1(u_2, 1)(t-1) + K_1(u_2, 2)(t-1)^2 \\ &\quad + K_1(u_2, 3)(t-1)^3 + \dots \end{aligned}$$

elde edilir. $u(1+0) = \frac{3}{2e} u(1-0)$, $u'(1+0) = \frac{1}{e} u(1-0)$ geçiş şartları kullanılarak,

$$K_1(u_2, 0) = 3, \quad K_1(u_2, 1) = 2$$

elde edilir. (6) formülü kullanılarak da

$$K_1(u_2, 2) = \frac{1}{2}, \quad K_1(u_2, 3) = \frac{1}{6}, \quad K_1(u_2, 4) = \frac{1}{24}, \quad K_1(u_2, 5) = \frac{1}{120}, \dots$$

bulunur. Sonuç olarak,

$$\begin{aligned}
 u_2(t) &= K_1(u_2, 0) + K_1(u_2, 1)(t - 1) + K_1(u_2, 2)(t - 1)^2 \\
 &\quad + K_1(u_2, 3)(t - 1)^3 + \dots \\
 &= 3 + 2(t - 1) + \frac{1}{2}(t - 1)^2 + \frac{1}{3!}(t - 1)^3 + \dots \\
 &= t + 1 + e^{t-1}
 \end{aligned}$$

Üçüncü olarak, $(2, 3]$ aralığı için problemin çözümünü araştıralım. Eğer $t_0 = 2$ noktasında dönüşüm yöntemi diferansiyel denkleme uygulanırsa, aşağıdaki formül elde edilir.

$$K_2(u_3, l + 2) = \frac{-(l - 3)}{2(l + 2)} K_2(u_3, l + 1) + \frac{(l - 1)}{2(l + 1)(l + 2)} K_2(u_3, l)$$

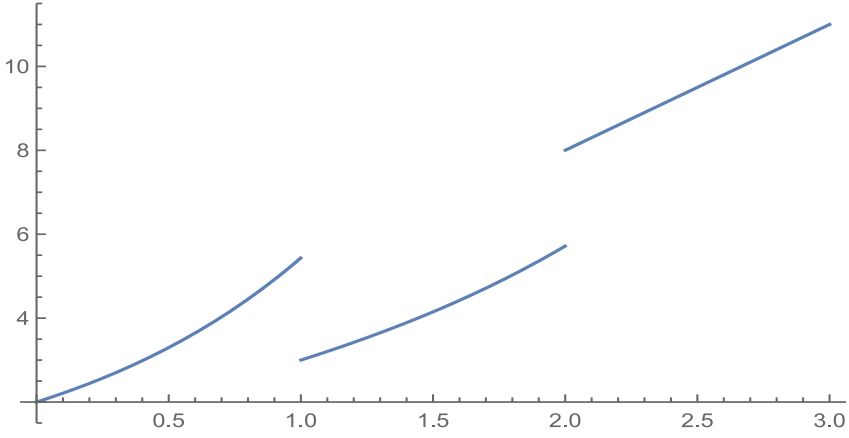
$u(2 + 0) = \frac{6}{3+e} u(2 - 0)$, $u'(2 + 0) = \frac{2}{3+e} u(2 - 0)$ geçiş şartları kullanılarak,

$K_2(u_3, 0) = 6$, $K_2(u_3, 1) = 2$ elde edilir. $K_{l+2}(u_3, 2)$ formülü kullanılarak,

$$\begin{aligned}
 K_2(u_3, 2) &= \frac{3}{4} K_2(u_3, 1) - \frac{1}{4} K_2(u_3, 0) = 0, \quad K_2(u_3, 3) = 0, \\
 K_2(u_3, 4) &= 0, \dots
 \end{aligned}$$

bulunur. Böylece

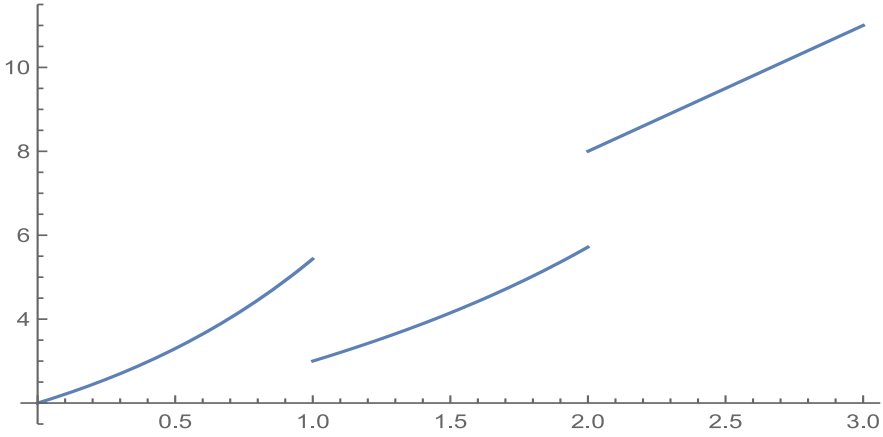
$u_3(t) = K_2(u_3, 0) + D_2(u_3, 1)(t - 2) = 2t + 2$ çözümü elde edilir.



Şekil 3: Yaklaşık çözüm grafiği

Ele alınan problemin tam çözümü aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$u(t) = \begin{cases} 2e^t \text{ için} & t \in [0,1) \\ t + e^{t-1} + 1 \text{ için} & t \in (1,2) \\ 2t + 2 \text{ için} & t \in (2,3]. \end{cases}$$



Şekil 4: Tam çözümünün grafiği

ÖRNEK 3.

$$(t^2 + \frac{2}{3}t + \frac{1}{12})u''(t) - (2t + \frac{2}{3})u'(t) + 2u(t) = 0, \quad t \in [0,1) \cup (1,2]$$

diferansiyel denkleminde

$$u(0) = 1, \quad u'(0) = 3$$

başlangıç şartlarından ve

$$u(1+0) = \frac{13}{4}u(1-0), \quad u'(1+0) = 5u'(1-0)$$

geçiş şartlarından oluşan SDGP'yi göz önüne alalım.

Sırasıyla $t = 0$, $t = 1$ için $u(t)$ fonksiyonunun diferansiyel dönüşümü $K_0(l)$, $K_1(l)$ olsun. Eğer diferansiyel denkleminde $t_0 = 0$ için $[0,1)$ aralığında diferansiyel dönüşüm uygularsak,

$$K_0(u_1, l+2) = \frac{-12(l^2-3l+2)}{(l+1)(l+2)} K_0(u_1, l)$$

elde ederiz. Şimdi de diferansiyel ters dönüşümü uygularsak $[0,1)$ aralığında

$$u_1(t) = K_0(u_1, 0) + K_1(u_1, 0)t + K_2(u_1, 0)t^2 + K_3(u_1, 0)t^3 + \dots$$

buluruz. $u(0) = 1$ ve $u'(0) = 3$ başlangıç şartlarını kullanarak

$$K_0(u_1, 0) = 1 \quad \text{ve} \quad K_0(u_1, 1) = 3$$

elde ederiz. $(K_0(u_1, l))$ dizisinin diğer terimlerini aşağıdaki gibi bulabiliriz:

$$K_0(u_1, 2) = -12, \quad K_0(u_1, 3) = 0, \quad K_0(u_1, 4) = 0, \dots$$

Böylece, $[0,1)$ aralığında tanımlanan

$$u_1(t) = K_0(u_1, 0) + K_0(u_1, 1)t + K_0(u_1, 2)t^2 + K_0(u_1, 3)t^3 + \dots \\ = 1 + 3t$$

çözümü elde ederiz.

İkinci olarak, $(1,2]$ aralığındaki çözümü araştıralım. Eğer diferansiyel denkleminde $t_0 = 1$ noktasında diferansiyel dönüşüm yöntemini uygularsak,

$$K_1(u_2, l+2) = \frac{-12}{32(l+1)(l+2)} \left[\left(\frac{8l^2}{3} + \frac{4l}{3} - \frac{4}{3} \right) K_1(u_2, l+1) + (l^2 - 3l + 2) K_1(u_2, l) \right]$$

elde ederiz. $(1,2)$ aralığında diferansiyel ters dönüşüm uygulanarak,

$$u_2(t) = K_1(u_2, 0) + K_1(u_2, 1)(t-1) + K_1(u_2, 2)(t-1)^2 \\ + K_1(u_2, 3)(t-1)^3 + \dots$$

elde edilir.

$$u(1+0) = \frac{13}{4}u(1-0), \quad u'(1+0) = 5u'(1-0)$$

geçiş şartları kullanılarak,

$$K_1(u_2, 0) = 13, \quad K_1(u_2, 1) = 15$$

elde edilir. Daha sonra $K_1(u_2, l+2)$ kullanılarak

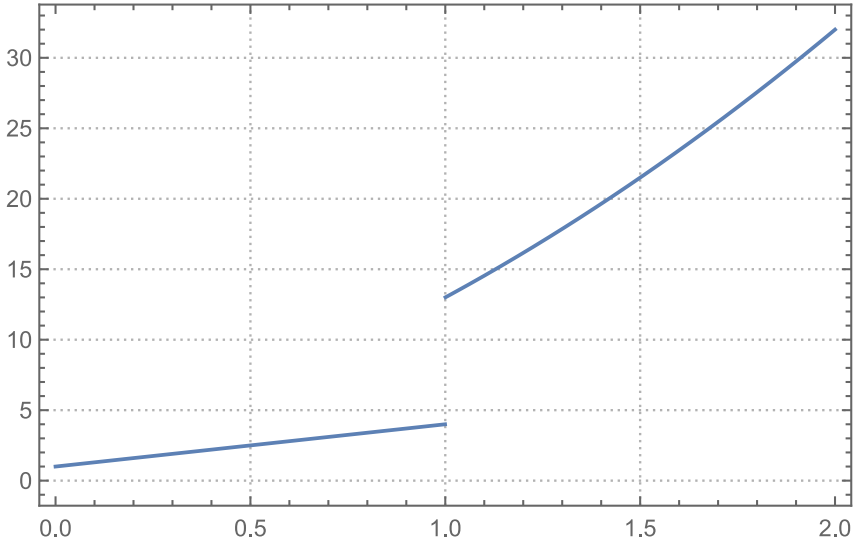
$$K_1(u_2, 2) = -\frac{9}{8}, \quad K_1(u_2, 3) = \frac{33}{16}, \quad \dots$$

bulunur. Sonuç olarak,

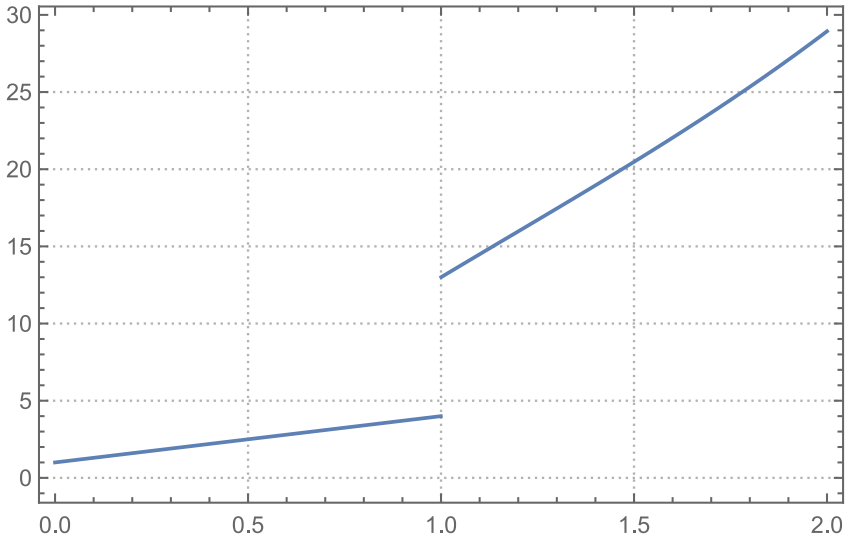
$$\begin{aligned}
u_2(t) &= K_1(u_2, 0) + K_1(u_2, 1)(t - 1) + K_1(u_2, 2)(t - 1)^2 \\
&\quad + K_1(u_2, 3)(t - 1)^3 + \dots \\
&= 13 + 15(t - 1) - \frac{9}{8}(t - 1)^2 + \frac{33}{16}(t - 1)^3 + \dots
\end{aligned}$$

Ele alınan problemin tam çözümü aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$u(t) = \begin{cases} 3t + 1, & t \in [0,1) \\ 4t^2 + 7t + 2, & t \in (1,2] \end{cases}$$



Şekil 5: Tam çözümünün grafiği



Şekil 6: Yaklaşık çözümünün grafiği

α -PARAMETRELİ DİFERANSİYEL DÖNÜŞÜM YÖNTEMİ

$f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ analitik bir fonksiyon ve $\alpha \in [0,1]$ reel bir parameter olsun.

$$Y_{a,n}(f) := \frac{d^n f(a)}{n!}, Y_{b,n}(f) := \frac{d^n f(b)}{n!}$$

olduğu durumda, $f(x)$ fonksiyonunun α -diferansiyel dönüşümü

$$T_{\alpha,n}(f) := \alpha Y_{a,n}(f) + (1 - \alpha) Y_{b,n}(f), n = 0, 1, 2, \dots$$

dizisidir. Eğer seri yakınsak ise, α -diferansiyel dönüşümünün tersi

$$f_{\alpha}(x) = T_{\alpha}^{-1}(f) := \sum_{n=0}^{\infty} T_{\alpha,n}(f) (x - (\alpha a + (1 - \alpha)b))^n$$

serisi ile tanımlanır.

$$f_{\alpha,N}(x) := \sum_{n=0}^N T_{\alpha,n}(f) (x - (\alpha a + (1 - \alpha)b))^n$$

fonksiyonuna $f(x)$ fonksiyonun α -parametrelili yaklaşımı denir. Aşağıdaki özellikler geçerlidir.

- $T_{\alpha,n}(cf) = cT_{\alpha,n}(f), c \in \mathbf{R},$
- $T_{\alpha,n}(f \pm g) = T_{\alpha,n}(f) \pm T_{\alpha,n}(g),$
- $T_{\alpha,n}\left(\frac{d^m f}{dx}\right) = \frac{(n+m)!}{n!} T_{\alpha,n}(f)$
- $T_{\alpha,n}(fg) = \sum_{m=0}^n \left(\alpha Y_{a,m}(f) Y_{a,n-m}(g) + (1 - \alpha) Y_{b,m}(f) Y_{b,n-m}(g) \right)$

ÖRNEK 1.

$$u''(t) + 4u(t) = 0, \quad t \in [-1,1]$$

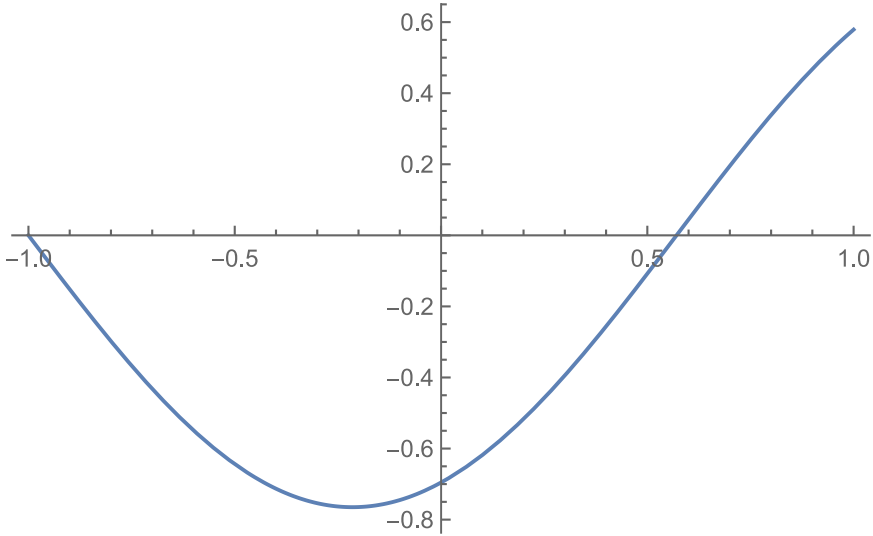
diferansiyel denklemi ve

$$u(-1) = 0, \quad u'(1) = 1$$

sınır şartları ile verilen sınır değer problemini düşünelim. Bu problem için tam çözümü,

$$u(t) = \frac{\cos 2t \sin 2 + \cos 2 \sin 2t}{2(\cos^2 2 - \sin^2 2)}$$

şeklindedir.



Şekil 7: Problemin tam çözüm grafiği

α – P DDy nin temel özelliklerini kullanarak

$$T_{\alpha,k+2} = \frac{4}{(k+1)(k+2)} T_{\alpha,k}(y)$$

yazarız. Verilen sınır şartları kullanılarak,

$$u_{\alpha,N}(-1) = \sum_{k=0}^N T_{\alpha,k}(u)(2\alpha - 2)^k = A + B(2\alpha - 2) + (-2A)(2\alpha - 2)^2 + \left(\frac{-4B}{6}\right)(2\alpha - 2)^3 + \frac{2A}{3}(2\alpha - 2)^4 + \frac{4B}{30}(2\alpha - 2)^5 + \left(\frac{-4A}{45}\right)(2\alpha - 2)^6 = 0$$

$$u'_{\alpha,N}(1) = \sum_{k=0}^N T_{\alpha,k}(u)k(2\alpha)^{k-1} = B + (-2A)2(2\alpha) + \left(\frac{-4B}{6}\right)3(2\alpha)^2 + \frac{2A}{3}4(2\alpha)^3 + \frac{4B}{30}5(2\alpha)^4 + \left(\frac{-4A}{45}\right)6(2\alpha)^5 = 1$$

elde edilir. $T_{\alpha,k+2}$ kullanılarak, $x_\alpha = (1 - 2\alpha)$,

$T_{\alpha,0}(y) = A$ ve $T_{\alpha,1}(1) = B$ olduğu durumda,

$$T_{\alpha,2}(y) = -2A, \quad T_{\alpha,3}(y) = \frac{-4B}{6}, \quad T_{\alpha,4}(y) = \frac{2A}{3}, \quad T_{\alpha,5}(y) = \frac{4B}{30}, \quad T_{\alpha,6}(y) = \frac{-4A}{45}, \quad T_{\alpha,7}(y) = \frac{-4B}{315}, \dots$$

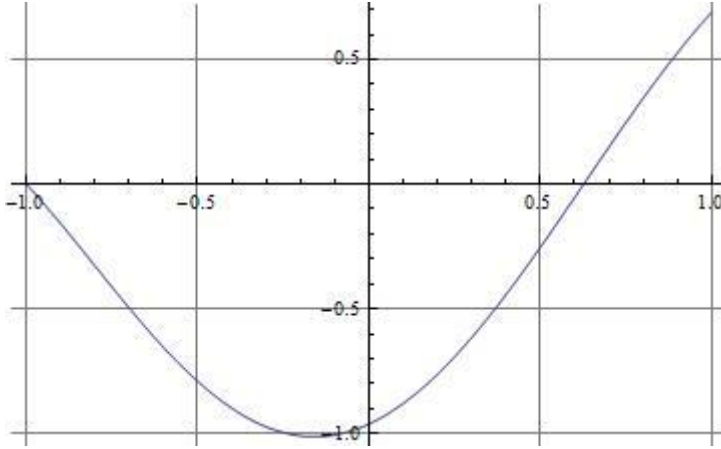
elde edilir.

$$\begin{aligned} y_\alpha(x) = & A + B(x - (1 - 2\alpha)) + (-2A)(x - (1 - 2\alpha))^2 \\ & - \left(\frac{-4B}{6}\right)(x - (1 - 2\alpha))^3 + \left(\frac{2A}{3}\right)(x - (1 - 2\alpha))^4 \\ & + \left(\frac{4B}{30}\right)(x - (1 - 2\alpha))^5 + \left(\frac{-4A}{45}\right)(x - (1 - 2\alpha))^6 \\ & + O(x^7) \end{aligned}$$

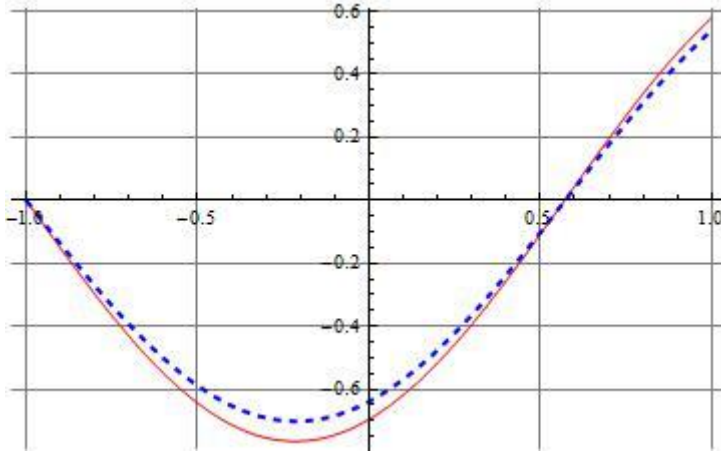
α –parametrelili yaklaşık çözümü bulunur.

$$\begin{aligned} A = & - \left(90(-7 + 55\alpha - 200\alpha^2 + 280\alpha^3 - 160\alpha^4 + 32\alpha^5) \right) / (-1365 \\ & + 30720\alpha^2 - 122880\alpha^3 + 189440\alpha^4 - 49152\alpha^5 \\ & - 241920\alpha^6 + 327680\alpha^7 - 138240\alpha^8 + 8192\alpha^{10}) \end{aligned}$$

$$B = -(15(91 - 336\alpha + 1320\alpha^2 - 3200\alpha^3 + 3360\alpha^4 - 1536\alpha^5 + 256\alpha^6)) / (-1365 + 30720\alpha^2 - 122880\alpha^3 + 189440\alpha^4 - 49152\alpha^5 - 241920\alpha^6 + 327680\alpha^7 - 138240\alpha^8 + 8192\alpha^{10})$$



Şekil 8: $\alpha = \frac{1}{3}$ için α -parametrelili nümerik çözümü



Şekil 9: $\alpha = \frac{1}{2}$ için α -parametrelili nümerik çözümü ile tam çözümünün (kırmızı çizgi) karşılaştırılması

SONUÇ

Bu çalışmada, sınır değer problemlerinin ve sınır-değer-geçiş problemlerinin yaklaşık çözümünü bulmak için α -parametrelili diferansiyel dönüşüm yöntemi ve geliştirilmiş diferansiyel dönüşüm yöntemi kullanıldı. Elde edilen yaklaşık çözümler tam çözümlerle grafiksel olarak karşılaştırıldı.

REFERANSLAR

Allahverdiev, B. P., Tuna, H. (2018). Titchmarsh–Weyl theory for Dirac systems with transmission conditions. *Mediterranean Journal of Mathematics*, 15, 1-12.

Ayaz, F. (2004). Applications of differential transform method to differential-algebraic equations. *Applied Mathematics and Computation*, 152(3), 649-657.

Aydemir, K., Olğar, H., Mukhtarov, O. (2019). The principal eigenvalue and the principal eigenfunction of a boundary-value-transmission problem. *Turkish Journal of Mathematics and Computer Science*, 11(2), 97-100.

Boukary, B., Loufouilou-Mouyedo, J., Bonazebi-Yindoula, J. ve Bissanga, G. (2018). Application of the Adomian decomposition method (ADM) for solving the singular fourth-order parabolic partial differential equation. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 6(7), 1476-1480.

Che Hussin, C. H., Kiliçman, A. (2011). On the Solutions of Nonlinear Higher-Order Boundary Value Problems by Using Differential Transformation Method and Adomian Decomposition Method. *Mathematical problems in engineering*, 2011(1), 724927.

Duan, J. S., Rach, R., Baleanu, D., Wazwaz, A. M. (2012). A review of the Adomian decomposition method and its applications to fractional differential equations. *Communications in Fractional Calculus*, 3(2), 73-99.

El-Zahar, E. R. (2013). Approximate analytical solutions of singularly perturbed fourth order boundary value problems using differential transform method. *Journal of king Saud university-science*, 25(3), 257-265.

Gultekin, H., Altinisik, N. (2014). Asymptotic expansion formulas for eigenvalues and eigenfunctions of the discontinuous boundary value problem with transmission condition. *J. Math. Comput. Sci.*, 4(2), 384-399.

Gültekin, H., Altınışik, N. (2014). On solution of two-point fuzzy boundary value problems. *The Bulletin of Society for Mathematical Services and Standards*, 11, 31-39.

Hassan, I. A. H. (2002). On solving some eigenvalue problems by using a differential transformation. *Applied Mathematics and Computation*, 127(1), 1-22.

Hassan, I. A. H., Erturk, V. S. (2009). Solutions of different types of the linear and nonlinear higher-order boundary value problems by differential transformation method. *European Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2(3), 426-447.

Kwami, A., Salisu, M. U. N. I. R. A., Hussaini, J., Garba, M. O. H. A. M. M. E. D. (2020). Modified Adomian Decomposition Method for the Solution of Fourth Order Ordinary Differential Equations. *GSJ*, 8(4).

Momani, S., Noor, M. A. (2007). Numerical comparison of methods for solving a special fourth-order boundary value problem. *Applied Mathematics and computation*, 191(1), 218-224.

Mukhtarov, O. S., Yücel, M. (2020). A study of the eigenfunctions of the singular Sturm–Liouville problem using the analytical method and the decomposition technique. *Mathematics*, 8(3), 415.

Mukhtarov, O. S., Yücel, M., Aydemir, K. (2020). Treatment a new approximation method and its justification for Sturm–Liouville problems. *Complexity*, 2020(1), 8019460.

Mukhtarov, O., Yücel, M., Aydemir, K. (2021). A new generalization of the differential transform method for solving boundary value problems. *Journal of New Results in Science*, 10(2), 49-58.

Mukhtarov, O., Çavuşoğlu, S., Olğar, H. (2019). Numerical solution of one boundary value problem using finite difference method. *Turkish Journal of Mathematics and Computer Science*, 11, 85-89.

Mukhtarov, O., Olğar, H., Aydemir, K. (2020). Eigenvalue problems with interface conditions. *Konuralp Journal of Mathematics*, 8(2), 284-286.

Olğar, H., Mukhtarov, O. S., Aydemir, K. (2018). Some properties of eigenvalues and generalized eigenvectors of one boundary value problem. *Filomat*, 32(3), 911-920.

Öztürk, S. N., & Mukhtarov, O. (2023). İki Aralıklı Sturm-Liouville Denklemlerinin Çözümlerinin Salınım ve Ayırma Özellikleri. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 12(1), 37-45.

Şen, E., Mukhtarov, O. S. (2016). Spectral properties of discontinuous Sturm–Liouville problems with a finite number of transmission conditions. *Mediterranean Journal of Mathematics*, 13, 153-170.

Ünal, E., Gökdoğan, A. (2017). Solution of conformable fractional ordinary differential equations via differential transform method. *Optik*, 128, 264-273.

Zhou, J. K., (1986). Differential Transformation and Its Application for Electrical Circuits, Huazhong University Press, Wuhan, China.

Wazwaz, A. M. (2002). The numerical solution of special fourth-order boundary value problems by the modified decomposition method. *International journal of computer mathematics*, 79(3), 345-356.

Yücel, M., Mukhtarov, O. S. (2018). A new treatment of the decomposition method for nonclassical boundary value problems. *Journal of Advanced Physics*, 7(2), 161-166.

Projektif Düzlemde Kuadratik Bézier Eğrileri¹

Muhsin İNCESU²
Mücahit ŞİMŞEK³

- 2- Doç. Dr.; Muş Alparslan Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Matematik Bölümü.
m.incesu@alparslan.edu.tr ORCID No: 0000-0003-2515-9627
- 3- Öğretmen; Diyarbakır il Milli Eğitim Müdürlüğü . m.incesu@alparslan.edu.tr ORCID No: 0000-0003-0651-8436

¹ Bu çalışma Mücahit ŞİMŞEK'in Yüksek Lisans Tezinden üretilmiştir. Muş Alparslan Üniv. Fen Bil. Ens. Mat. ABD, Danışman: Doç. Dr. Muhsin İNCESU, 2024.

ÖZET

Projektif düzlem elde etmenin bir yöntemi olarak verilen bir Afin düzleme ideal nokta adı verilen sonsuzda noktalar ilave edilmesi ile bir afin düzlemin kapanışının elde edilmesi yöntemidir. Buna göre afin düzlemdeki her bir doğruya sonsuzda bir nokta karşılık getirilmekte; Paralel doğrulara ise ancak bir ortak ideal nokta karşılık getirilmektedir. Bu şekilde sonsuzdaki noktalar ilave edilerek verilen bir Afin düzlemin kapanışı elde edilmektedir. Projektif düzlem aksiyomlarına göre bu elde edilen kapanış uzayı bir projektif düzlem ifade etmektedir. Bu çalışmada bir afin düzlemin kapanışı olarak alınan bir projektif düzlemde tanımlan kuadratik Bezier eğrileri incelenmiştir. Bu eğrilerin daha iyi anlaşılabilmesi, görselleştirilebilmesi için incelenen bu kuadratik Bezier eğrilerinin; afin düzlemin kapanışı olarak aldığımız projektif düzleme izomorfik olan ve reel projektif düzlem olarak isimlendirilen 3- boyutlu reel öklid uzayında orjinden geçen doğruların kümesindeki karşılıkları incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler – Bezier Eğrisi, Afin Düzlem, Ideal Nokta, Projektif Düzlem, Reel Projektif Düzlem

GİRİŞ

Bezier eğrileri, bilgisayar detekli tasarımlarda en kararlı çözümleri veren polinom eğriler olduklarından bu eğrilerle ilgili pek çok çalışmalar yapılmıştır. Bunlara örnek olarak G. Farin (1990), R. Farouki (1985), J.Hoschek (1985), H. Potmann (1995), İncesu (2003, 2004), Samancı H., Çelik S, İncesu M (2015), Samancı H (2018, 2021), Samancı H ve İncesu M (2020), Ören ve İncesu (2020), çalışmaları verilebilir.

Projektif düzlem elde etmenin bir yöntemi olarak verilen bir Afin düzleme ideal nokta adı verilen sonsuzda noktalar ilave edilmesi ile bir afin düzlemin kapanışının elde edilmesi yöntemidir. Buna göre her doğruya sonsuzda bir nokta karşılık getirilmektedir. Bu çalışmada bir afin düzlemin kapanışı olarak alınan bir kümede tanımlanacak Bezier eğrileri incelenmiş, bu eğrilerin reel projektif düzlemde karşılıkları üzerinde durulmuştur. Burada sıklıkla kullanılan kuadratik Bezier eğrileri dikkate alınmıştır.

Afin Uzay ve Afin Düzlem

Tanım 4: $A \neq \emptyset$ bir küme, V ise K cismi üzerinde bir vektör uzayı olsun. Aşağıdaki önermeleri doğrulayan bir

$$f: A \times A \rightarrow V$$

fonksiyonu varsa A , V ile birleştirilmiş bir afin uzaydır denir:

A1) $\forall P, Q, R \in A$ için $f(P, Q) + f(Q, R) = f(P, R)$ dır.

A2) $\forall P \in A$ ve $\forall \alpha \in V$ için $f(P, Q) = \alpha$ olacak biçimde bir tek $Q \in A$ vardır. (Hacısalıhoğlu, 1983)

Tanım 5: A afin uzayda $\{P_0, P_1, \dots, P_n\}$ nokta $n+1$ lisi verilsin. Eğer A ya karşılık gelen vektör uzayında $\{\overrightarrow{P_0P_1}, \overrightarrow{P_0P_2}, \dots, \overrightarrow{P_0P_n}\}$ vektör n lisi bir çatı oluşturuyorsa A daki $\{P_0, P_1, \dots, P_n\}$ nokta $n+1$ lisine A nın bir afin çatısı denir. (Hacısalıhoğlu, 1983)

Önerme 1: A bir afin uzay ve V de bu afin uzaya birleşen vektör uzayı olsun. Bu takdirde A nın boyutu V nin boyutuna eşittir.

Şimdi boyutu 2 olan bir afin uzay alalım. Bu afin uzaya bir Afin düzlem adını vereceğiz.

Önerme 2: A bir afin düzlem olsun. Bu takdirde A şu özellikleri sağlar:

A-1 $P, Q \in A$ iki farklı nokta olsun A da P ve Q yu içeren tek ve bir tek ℓ doğrusu vardır

A-2 Bir $\ell \subset A$ doğrusu ve $P \in A (P \notin \ell)$ verildiğinde ℓ -ye paralel ve P-den geçen tek ve bir tek m doğrusu vardır.

A-3 Doğrudaş olmayan en az üç nokta vardır. (P_1, P_2, P_3 noktalarına doğrudaş denir eğer hepsi aynı doğru üzerinde ise.) (Hartshorne, 1967: 1)

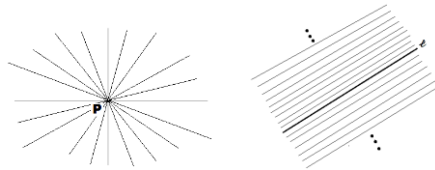
Sonuç 1: Bir afin düzlem en az 4 nokta içerir. (Hartshorne, 1967:2)

Tanım 6: A afin düzlemde ℓ ve m iki doğru olsun. Eğer $\ell = m$ veya $\ell \cap m = \emptyset$ ise ℓ ve m doğrularına **paralel** iki doğru denir. (Hartshorne, 1967:1)

Önerme 3: Afin düzlemde doğruların Paralellik bağıntısı bir **denklik** bağıntısıdır. (Hartshorne, 1967:2).

Önerme 4: Afin düzlemde Paralel olmayan iki doğrunun ancak bir tek ortak noktası vardır. (Hartshorne, 1967:2).

Tanım 7: Düzlemde doğruların bir demeti demek, bir P noktasından geçen doğrular ya da verilen bir ℓ doğrusuna paralel olan tüm doğrular demektir. (Hartshorne, 1967: 3)



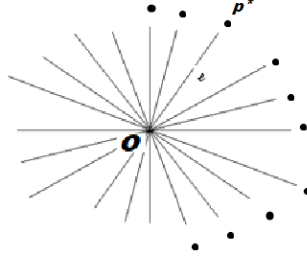
a) P noktasından geçen doğruların demeti b) verilen bir ℓ doğrusuna paralel doğruların denklik sınıfı olan $[\ell]$ doğru demeti

Şekil 1. Doğru demetleri

2.2.2 İdeal Noktalar ve Projektif Düzlemin İnşaaası

A afin düzlem verilsin. Şimdi bu verilen afin düzleme sonsuzda bir takım noktalar ilave edilerek afin düzlemin bir anlamda kapanışıyla projektif düzlemi elde edeceğiz.

A'nın her bir ℓ doğrusu için ℓ doğrusuna paralel olan doğru demeti bir denklik sınıfı olacağından bu demeti $[\ell]$ ile göstereceğiz. Her bir $[\ell]$ demetine, ℓ yönünde 'ideal nokta' yada 'sonsuzda bir nokta' diye adlandıracağımız bir nokta ilave edeceğiz ve bu noktayı P^* , Q^* , ... gibi sembollerle göstereceğiz. $P^* = [\ell]$ biçiminde yazacağız. Yani her bir doğruya bir ideal nokta ilave ediliyor ancak tüm birbirine paralel olan doğrulara tek bir ideal nokta ilave edilmektedir. Her bir $[\ell]$ demetini yani denklik sınıfını temsilen orjinden geçen ℓ doğrusunu alır ve bu demete sonsuzda ilave edilen ideal noktayı da ℓ doğrusunun sonuna ekleyecek olursak, tüm ideal nokta ilavelerini aşağıdaki gibi sembolik olarak gösterebiliriz:



Şekil 2. Afin düzleme İdeal noktaların eklenmesi

Böylece A'nın doğrularına ideal noktalar ilave edilerek A'nın kapanışını elde etmiş olacağız. Bu yeni kümeyi S ile gösterirsek, S'nin noktaları A'nın noktaları ile A'nın tüm ideal noktalarının birleşimidir. Böylece, S'deki her bir L doğrusu,

a) A'nın bir ℓ doğrusu ile bu ℓ doğrusunun ideal noktası $[\ell] = P^*$ in toplamıdır. Ya da

b) A'nın tüm ideal noktalarından oluşan 'Sonsuzluk doğrusu' nu içerir.

(Hartshorne, 1967:3)

Tanım 8: (Projektif Düzlem):

S noktalardan oluşan bir küme ve onun doğrulardan oluşan alt kümeleri Şu 4 aksiomu sağlarsa S-ye projektif düzlem denir:

P1) S'nin iki farklı P ve Q noktaları ancak ve ancak bir tek doğru üzerinde ise.

P2) L_1 ve L_2 herhangi iki doğru, en az bir noktada kesişiyorsa.

P3) En az üç doğrudan olmayan nokta varsa.

P4) Her doğru en az üç nokta içeriyorsa.

(Hartshorne, 1967:3)

Önerme 5: A afin düzlemin kapanışı S bir projektif düzlemdir .

İspat: Bkz.(Şimşek, 2024:6)

Reel Projektif Düzlem

R^3 sıradan üç boyutlu Öklid uzayı olsun. $\tilde{L}$, R^3 ün O başlangıç noktasından geçen tüm doğrularının kümesi olsun. $\tilde{L}$ nin bir noktası, R^3 ün O başlangıç noktasından geçen bir doğrusu olarak tanımlanır. Aynı şekilde $\tilde{L}$ nin bir doğrusu olarak da, R^3 ün O başlangıç noktasından geçen doğrularının bir kolleksiyonu olarak tanımlanırsa $\tilde{L}$ bir projektif düzlem oluşturur. Bu kümeyi homojen koordinatlar yardımıyla aşağıdaki gibi analitik olarak ifade edebiliriz:

$\tilde{L}$ nin bir noktası O başlangıç noktasından geçen doğru olduğundan bu noktayı P ile gösterirsek P noktası bir ℓ doğrusudur. Her ℓ doğrusunu, doğru üzerinde (0,0,0) dan farklı bir (x_1, x_2, x_3) noktası seçerek göstereceğiz. Buradaki (x_1, x_2, x_3) noktaları P noktasının homojen koordinatlarını ifade edecektir. ℓ üzerindeki başka bir nokta $(\lambda x_1, \lambda x_2, \lambda x_3)$ dir. $(\lambda \in R, \lambda \neq 0)$. Böylece $\tilde{L}$, (x_1, x_2, x_3) şeklindeki üçlülerden oluşur öyle ki, x_1, x_2, x_3 lerin hepsi birden aynı anda sıfır olmaz ve herhangi iki üçlü $P = (x_1, x_2, x_3)$ ve $Q = (x_1', x_2', x_3')$ aynı noktayı ifade eder ancak ve ancak P ve Q lineer bağımlı ise ya da $\exists \lambda \in R$ öyleki $x_i' = \lambda x_i$ dir. ($i = 1, 2, 3$).

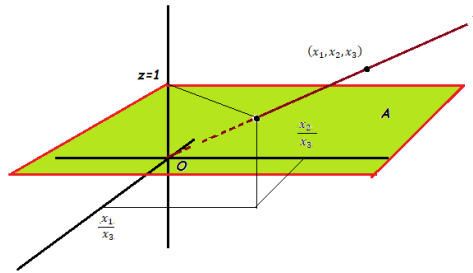
R^3 te O başlangıç noktasından geçen bir düzlemin denklemi

$$a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 = 0$$

dır ve a_i lerin hepsi birden sıfır olmaz. Görülecektir ki bu denklem $\tilde{L}$ nin bir doğrusunun denklemidir.

Tanım 9: S ve S' iki projektif düzlem olsun. Eğer bir $T: S \rightarrow S'$ birebir dönüşümü doğrudan noktaları yine doğrudan noktalara resmedecek şekilde bulunabilirse S ve S' projektif düzlemlerine **İzomorfik** denir. (Hartshorne, 1967:5)

Önerme 6: Homojen koordinatlar yardımıyla yukarıdaki gibi tanımlanan $\tilde{L}$ projektif düzlemi, Öklid geometride Sıradan afin düzlemin kapanışı olarak elde edilen S Projektif düzlemine izomorfiktir. (Hartshorne, 1967:5)



Şekil 3. Reel Projektif Düzlem

Projektif Düzlemde Kuadratik Bezier Eğrileri

Kontrol noktaları P_0 , P_1 ve P_2 olan kuadratik Bezier eğrisini göz önüne alalım. P_0 , P_1 ve P_2 noktalarını A afin düzlemin kapanışı olarak ifade ettiğimiz S kümesinden alalım. Burada 4 kategoride 8 durum söz konusu olabilir:

- i) P_0 , P_1 ve P_2 noktaları A afin düzlemin iç noktaları olmaları durumu
- ii) P_0 , P_1 ve P_2 den birinin ideal nokta ikisinin ise A'nın iç yani afin noktaları olmaları durumu:
Bu durumu da ideal noktanın bir uç nokta ya da bir iç nokta olmasına göre iki farklı biçimde ifade edebiliriz.
- iii) P_0 , P_1 ve P_2 den birinin A'nın afin noktası diğer ikisinin birer ideal nokta olmaları durumu
Bu durumu da afin noktanın bir uç nokta ya da bir iç nokta olmasına göre yine iki farklı biçimde ifade edebiliriz
- iv) P_0 , P_1 ve P_2 den üçünün de A'nın ideal noktaları olmaları durumu

Şimdi bu durumları inceleyelim:

Üç Afin Kontrol Noktalı Kuadratik Bezier Eğrileri

- i) P_0 , P_1 ve P_2 noktaları A afin düzlemin iç noktaları olsunlar. Bu durumda kuadratik Bezier eğrisinin ifadesi $t \in [0,1]$ olmak üzere

$$B(t) = (1-t)^2 P_0 + 2t(1-t) P_1 + t^2 P_2$$

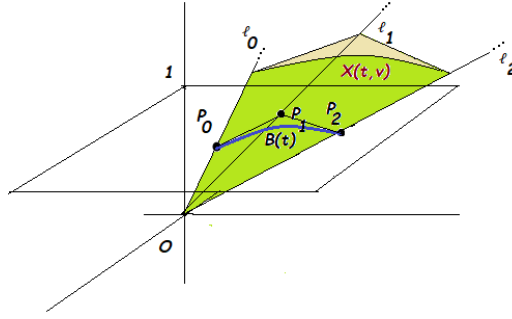
dir. Şimdi P_0 , P_1 ve P_2 noktalarının reel projektif düzlemde karşılıkları sırasıyla ℓ_0 , ℓ_1 ve ℓ_2 doğruları olarak alınırsa ve her bir ℓ_i doğrusu üzerindeki bir nokta ile temsil edileceğinden bu doğruların temsilcisi olarak A afin düzlemdeki $P_i = (P_{i1}, P_{i2})$ noktalarının homojen koordinatı olarak $\bar{P}_i = (P_{i1}, P_{i2}, 1)$ alınırsa $B(t)$ kuadratik Bezier eğrisinin reel projektif düzlemde karşılığı $X(t, v)$ bir koni yüzeyidir. Bu yüzeyin dayanak eğrisi $B(t)$ Bezier eğrisi

$$B(t) = (1-t)^2 \bar{P}_0 + 2t(1-t) \bar{P}_1 + t^2 \bar{P}_2$$

dir. Bu yüzeyin R^3 teki denklemi ise

$$X(t, v) = vB(t) = v \left[(1-t)^2 \bar{P}_0 + 2t(1-t) \bar{P}_1 + t^2 \bar{P}_2 \right]$$

biçiminde ifade edilebilir. (Şekil 4)



Şekil 4. Her üç kontrol noktası da afin nokta olan kuadratik Bezier eğrisi

İki Afin Bir İdeal Kontrol Noktalı Kuadratik Bezier Eğrileri

P_0 , P_1 ve P_2 noktaları iki afin ve bir ideal noktadan oluşsun. Bu da temelde iki şekilde ele alınabilir: İdeal noktanın uç nokta olması ya da ideal noktanın bir iç kontrol noktası olması durumu.

- a) ideal noktanın bir uç nokta olması durumu. Yani, P_0 ya da P_2 den birinin ideal nokta ve bunlardan diğeri ile P_1 in bir afin nokta olması durumu. Burada genelinden bir şey kaybetmeden P_2 yi ideal nokta olarak alalım. (P_0 da alınabilirdi.) Bu durumda bir ℓ afin doğrusu vardır ki $P_2 = [\ell_2]$ dir. Bu durumda kuadratik Bezier eğrisinin S deki ifadesi $t \in [0,1]$ olmak üzere

$$B(t) = (1-t)^2 P_0 + 2t(1-t) P_1 + t^2 P_2$$

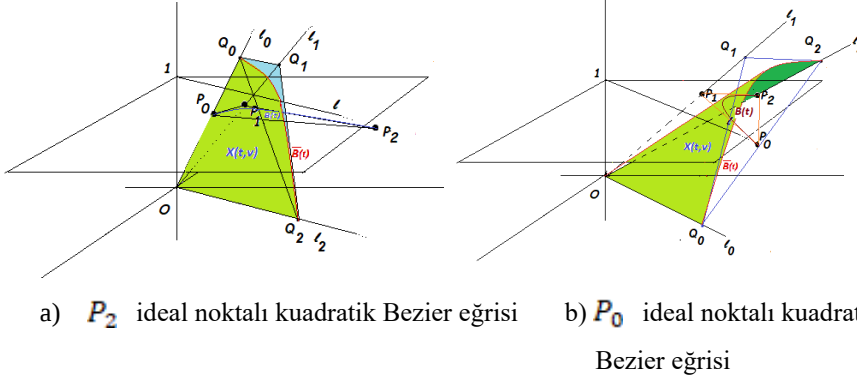
yazılabilir. Ancak bu eğri incelendiğinde görülecektir ki eğri, P_0 dan başlayıp P_1 yönüne yönelecek ancak $P_1 P_2$ ışınına paralel kalarak sonsuza devam edecektir. Hatta öyle ki hemen hemen $P_1 P_2$ ışını gibi olacaktır. Şimdi P_0 , P_1 ve P_2 noktalarının reel projektif düzlemde karşılıklarını sırasıyla ℓ_0 , ℓ_1 ve ℓ_2 doğruları olarak alalım. Bu doğrular üzerinde alınacak üç nokta sırasıyla Q_0 , Q_1 ve Q_2 olsun. Bu noktalar $P_0 = (P_{01}, P_{02})$, $P_1 = (P_{11}, P_{12})$ afin noktalarının reel projektif düzlemdeki homojen koordinatlarda karşılığı olan $Q_0 = (\sigma P_{01}, \sigma P_{02}, \sigma)$ ve $Q_1 = (\sigma P_{11}, \sigma P_{12}, \sigma)$ noktaları olarak ve Q_2 olarak da eğer ℓ_2 nin eğimi ∞ ise $Q_2 = (0, \sigma, 0)$ noktası, eğer ℓ_2 nin eğimi ∞ değilse $Q_2 = (\sigma, \sigma m_2, 0)$ noktası olarak alınır. ($\sigma > 0$) Böylece, S deki $B(t)$ kuadratik Bezier eğrisinin reel projektif düzlemde karşılığı $X(t, v)$ koni yüzeyidir. Bu yüzeyin dayanak eğrisi $t \in [0,1]$ olmak üzere

$$\bar{B}(t) = (1-t)^2 Q_0 + 2t(1-t) Q_1 + t^2 Q_2$$

biçimindeki Bezier eğrisidir. Buna göre S deki $B(t)$ kuadratik Bezier eğrisinin reel projektif düzlemde karşılığı $X(t, v)$ koni yüzeyi

$$X(t, v) = v \bar{B}(t) = v[(1-t)^2 Q_0 + 2t(1-t) Q_1 + t^2 Q_2]$$

biçimindedir. (Şekil 5-a). Benzer olarak İdeal nokta olarak P_2 değil de P_0 alınsaydı bu durumda koni yüzeyi (Şekil 5-b) deki gibi olacaktı.



Şekil 5. İdeal noktası uç kontrol noktası olan kuadratik Bezier eğrileri

- b) ideal noktanın bir iç nokta olması durumu. Yani, P_0 ve P_2 birer afin nokta ve P_1 in bir ideal nokta olması durumudur. Bu durumda bir ℓ afin doğrusu vardır ki $P_1 = [\ell]$ dir. Bu durumda kuadratik Bezier eğrisinin S deki ifadesi $t \in [0,1]$ olmak üzere

$$B(t) = (1-t)^2 P_0 + 2t(1-t)P_1 + t^2 P_2$$

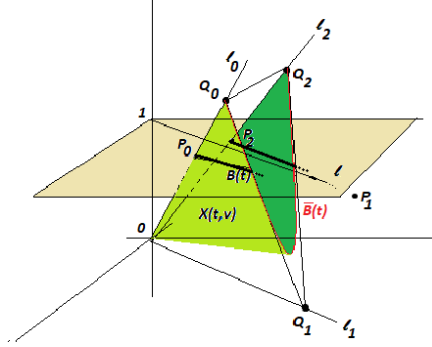
yazılabilir. P_1 bir ideal nokta olduğundan sonsuzda olacağı için bu eğriyi sanki bir noktada sonsuzluk tipindeki süreksizlik gibi düşünebiliriz. Yani sağdan ve soldan aynı sonsuzluk durumunun olduğu fonksiyonlardaki bir noktada süreksizlik durumu gibi görülebilir. Ancak S projektif düzleminin yapısı ve Bezier eğrilerindeki son nokta teğet özellikleri dikkate alındığında Bu eğrinin P_0 ve P_2 den ℓ ye paralel çizdiğimizde P_1 bu paralel doğruların üçünün de üzerinde olmalıdır. Çünkü paralel doğrulara sonsuzda tek bir karşılık getirilmekteydi. Buna göre S deki $B(t)$ kuadratik Bezier eğrisi P_0 ve P_2 den sonsuza çizilen iki paralel ışını ifade eder. Şimdi bu eğrinin reel projektif düzlemde karşılığına bakalım. P_0 , P_1 ve P_2 noktalarının reel projektif düzlemde karşılıklarını sırasıyla ℓ_0 , ℓ_1 ve ℓ_2 doğruları olarak alalım. S deki P_0 ve P_2 afin noktalarının ($P_0 = (P_{01}, P_{02})$, $P_2 = (P_{21}, P_{22})$ olmak üzere) reel projektif düzlemdeki homojen koordinatlarda karşılıklarını $Q_0 = (\sigma P_{01}, \sigma P_{02}, \sigma)$ ve $Q_2 = (\sigma P_{21}, \sigma P_{22}, \sigma)$ noktaları olarak alırsak ($\sigma > 0$) ve Q_1 noktasını da ℓ_1 doğrusunun eğimi m_1 in durumuna göre, eğer $m_1 = \infty$ ise $Q_1 = (0, \sigma, 0)$ olarak ve eğer $m_1 \neq \infty$ ise $Q_1 = (\sigma, \sigma m_1, 0)$ noktası olarak aldığımızda S deki $B(t)$ kuadratik Bezier eğrisinin reel projektif düzlemdeki karşılığı $X(t, v)$ koni yüzeyidir. Bu yüzeyin dayanak eğrisi $t \in [0,1]$ olmak üzere

$$\bar{B}(t) = (1-t)^2 Q_0 + 2t(1-t) Q_1 + t^2 Q_2$$

biçimindeki Bezier eğrisidir. O halde $X(t, v)$ koni yüzeyi

$$X(t, v) = v\bar{B}(t) = v[(1-t)^2 Q_0 + 2t(1-t) Q_1 + t^2 Q_2]$$

biçimindedir. (Şekil 6).



Şekil 6. İdeal noktanın iç kontrol noktası olduğu kuadratik Bezier eğrisi

İki İdeal Bir Afın Kontrol Noktalı Kuadratik Bezier Eğrileri

P_0 , P_1 ve P_2 noktaları iki ideal ve bir afın noktadan oluşsun. Bu da temelde iki şekilde ele alınabilir: Afın noktanın uç nokta olması ya da afın noktanın bir iç kontrol noktası olması durumu.

- a) Afın noktanın bir uç kontrol noktası olması durumu. Yani, P_0 ya da P_2 den birinin afın nokta ve bunlardan diğeri ile P_1 in bir ideal nokta olması durumu. Genelinden bir şey kaybetmeden burada da P_0 afın nokta ve P_1 ve P_2 ideal nokta olsun. Bu durumda bir ℓ_1 ve ℓ_2 afın doğruları vardır ki $P_1 = [\ell_1]$ ve $P_2 = [\ell_2]$ dir. Bu durumda kuadratik Bezier eğrisinin S deki ifadesi $t \in [0,1]$ olmak üzere

$$B(t) = (1-t)^2 P_0 + 2t(1-t) P_1 + t^2 P_2$$

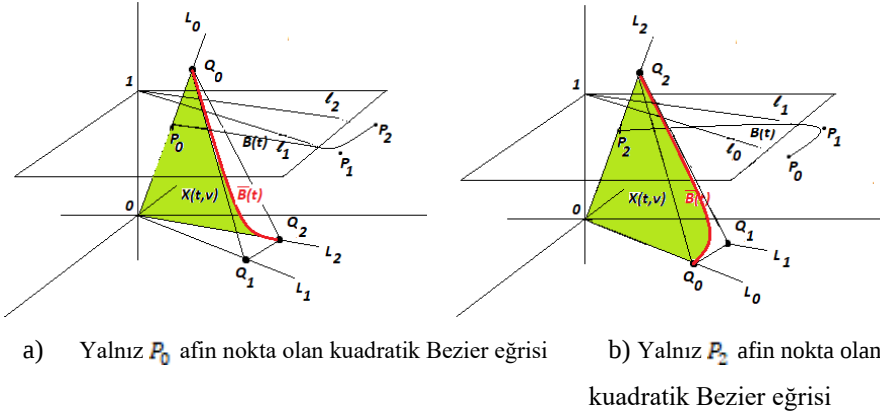
yazılabilir. Bu eğri incelendiğinde P_1 sonsuzda bir nokta olduğundan eğrinin karakteristiğinde büyük rolü olacağından eğrimiz sanki P_1 de kesişen iki doğru gibi görünecektir. Bunlar $P_0 P_1$ ve $P_1 P_2$ doğrularıdır. Şimdi P_0 , P_1 ve P_2 noktalarının reel projektif düzlemde karşılıklarını sırasıyla L_0 , L_1 ve L_2 doğruları olarak alalım. Bu doğrular üzerinde alınacak üç temsilci nokta sırasıyla Q_0 , Q_1 ve Q_2 olsun. Q_0 noktası S deki $P_0 = (P_{01}, P_{02})$ afın noktanın reel projektif düzlemde karşılığı olan L_0 in homojen koordinatlardaki temsilcisi olarak alınacak $Q_0 = (\sigma P_{01}, \sigma P_{02}, \sigma)$ noktasıdır. ($\sigma > 0$) Q_1 ve Q_2 noktaları da L_1 ve L_2 nin eğimlerine bağlı olarak; L_1 in eğimi m_1 , L_2 nin eğimi m_2 olmak üzere,

$m_1 = \infty$ ve $m_2 \neq \infty$ ise $Q_1 = (0,1,0)$ ve $Q_2 = (1, m_2, 0)$
 $m_1 \neq \infty$ ve $m_2 = \infty$ ise $Q_1 = (1, m_1, 0)$ ve $Q_2 = (0,1,0)$
 $m_1 \neq \infty$ ve $m_2 \neq \infty$ ise $Q_1 = (1, m_1, 0)$ ve $Q_2 = (1, m_2, 0)$

olarak alınan kontrol noktalarıdır. Böylece S de alınan $B(t)$ kuadratik Bezier eğrisinin reel projektif düzlemde karşılığı $X(t, v)$ koni yüzeyidir. Bu yüzeyin dayanak eğrisi R^3 teki kontrol noktaları Q_0, Q_1 ve Q_2 olan bir Bezier eğrisidir. Bu koni yüzeyinin denklemi ise $t \in [0,1]$ olmak üzere

$$X(t, v) = v\bar{B}(t) = v[(1-t)^2Q_0 + 2t(1-t)Q_1 + t^2Q_2]$$

biçimindedir. (Şekil 7-a). Benzer olarak afin nokta olarak P_0 değil de P_2 alınsaydı bu durumda koni yüzeyi (Şekil 7-b) deki gibi olacaktı.



Şekil 7. ideal noktası uç nokta olan kuadratik Bezier eğrileri

- b) Afin noktanın bir iç kontrol noktası olması durumu. Yani, P_0 ve P_2 ideal nokta ve P_1 bir afin nokta olsun. Bu durumda bir ℓ_0 ve ℓ_2 afin doğruları vardır ki $P_0 = [\ell_0]$ ve $P_2 = [\ell_2]$ dir. Bu durumda kuadratik Bezier eğrisinin S deki ifadesi $t \in [0,1]$ olmak üzere

$$B(t) = (1-t)^2P_0 + 2t(1-t)P_1 + t^2P_2$$

yazılabilir. Bu eğri incelendiğinde P_0 ve P_2 sonsuzda birer nokta olduğundan eğrinin karakteristiğinde büyük rolleri olacağından eğrimiz sanki sonsuzluk doğrusuna yakın bir eğri olacaktır. Şimdi P_0 , P_1 ve P_2 noktalarının reel projektif düzlemde karşılıklarını sırasıyla L_0 , L_1 ve L_2 doğruları olarak alalım. Bu doğrular üzerinde alınacak üç temsilci nokta sırasıyla Q_0, Q_1 ve Q_2 olsun. Q_1 noktası S deki $P_1 = (P_{11}, P_{12})$ afin noktanın reel projektif düzlemde karşılığı olan L_1 in homojen koordinatlardaki temsilcisi olarak alınacak $Q_1 = (\sigma P_{11}, \sigma P_{12}, \sigma)$ noktasıdır. ($\sigma > 0$) Q_0 ve Q_2 noktaları da L_0

ve L_2 nin eğimlerine bağlı olarak; L_0 in eğimi m_0 , L_2 nin eğimi m_2 olmak üzere,

$m_0 = \infty$ ve $m_2 \neq \infty$ ise $Q_0 = (0,1,0)$ ve $Q_2 = (1, m_2, 0)$

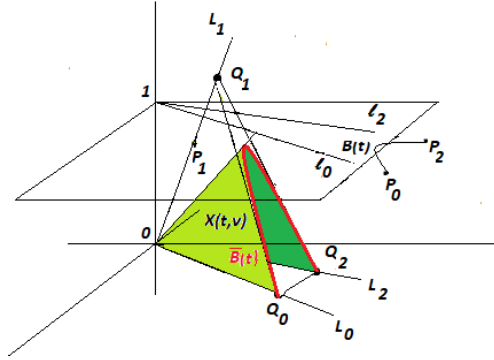
$m_0 \neq \infty$ ve $m_2 = \infty$ ise $Q_0 = (1, m_0, 0)$ ve $Q_2 = (0,1,0)$

$m_0 \neq \infty$ ve $m_2 \neq \infty$ ise $Q_0 = (1, m_0, 0)$ ve $Q_2 = (1, m_2, 0)$

olarak alınan kontrol noktalarıdır. Böylece S de alınan $B(t)$ kuadratik Bezier eğrisinin reel projektif düzlemde karşılığı $X(t, v)$ koni yüzeyidir. Bu yüzeyin dayanak eğrisi R^3 teki kontrol noktaları Q_0, Q_1 ve Q_2 olan bir Bezier eğrisidir. Bu koni yüzeyinin denklemi ise $t \in [0,1]$ olmak üzere

$$X(t, v) = v\bar{B}(t) = v[(1-t)^2Q_0 + 2t(1-t)Q_1 + t^2Q_2]$$

biçiminde yazılabilir. (Şekil 8).



Şekil 8. P_1 afin nokta olan kuadratik Bezier Eğrisi

Üç İdeal Kontrol Noktalı Kuadratik Bezier Eğrileri

P_0, P_1 ve P_2 noktaları üçü de ideal noktadan oluşsun. Bu durum aslında üç noktanın sonsuzluk doğrusu üzerinde olması durumudur. Üç nokta doğrudan olduğundan Bezier eğrisi her ne kadar kuadratik olarak iade edilse de aslında lineer durum ile aynı koşulları taşımış olacaktır. Bunun için P_0, P_1 ve P_2 noktaları üçü de ideal nokta olduğundan bir ℓ_0, ℓ_1 ve ℓ_2 afin doğruları vardır ki $P_0 = [\ell_0], P_1 = [\ell_1]$ ve $P_2 = [\ell_2]$ dir. Şimdi Bezier eğrisinin S deki ifadesi $t \in [0,1]$ olmak üzere

$$B(t) = (1-t)^2P_0 + 2t(1-t)P_1 + t^2P_2$$

yazılabilir. Bu eğri gerçekte P_0 dan P_2 ye kadar sonsuzluk doğrusu üzerinde yer alan doğru parçasıdır. Yani

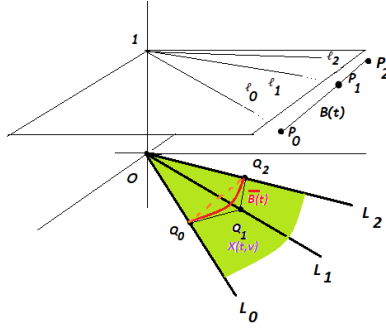
$$B(t) = (1-t)P_0 + tP_2$$

ile özdeşdir. Tek farkı eğrinin hızıdır. Bu eğrinin reel projektif düzlemde karşılığını ifade etmek istersek, P_0, P_1 ve P_2 noktalarının reel projektif düzlemde karşılıklarını sırasıyla L_0, L_1 ve L_2 doğruları olarak alalım. Bu L_i doğruları üzerinde alınacak üç temsilci nokta sırasıyla Q_0, Q_1 ve Q_2 olsun.

ℓ_i doğrularının eğimleri m_i olmak üzere bu üç nokta m_i ler sonsuz değilse $Q_0 = (1, m_1, 0)$, $Q_1 = (1, m_1, 0)$, $Q_2 = (1, m_2, 0)$ olarak alınabileceği gibi $Q_0 = (\sigma_0, \sigma_0 m_1, 0)$, $Q_1 = (\sigma_1, \sigma_1 m_1, 0)$, $Q_2 = (\sigma_2, \sigma_2 m_2, 0)$ olarak da alınabilir. Böylece S de alınan $B(t)$ kuadratik Bezier eğrisinin reel projektif düzlemde karşılığı $X(t, v)$ düzlemsel koni yüzeyidir. Bu yüzeyin dayanak eğrisi R^3 teki kontrol noktaları Q_0 , Q_1 ve Q_2 olan bir Bezier eğrisidir. Bu dayanak eğrisi, Q_i lerin birinci seçimine göre düzlemde $Q_0 Q_2$ doğru parçası yani lineer Bezier eğrisi, yada Q_i lerin ikinci seçimine göre de düzlemde kuadratik bir Bezier eğrisini ifade eder. Her iki durumda da koni yüzeyi aynıdır. O halde S de alınan $B(t)$ kuadratik Bezier eğrisinin reel projektif düzlemde karşılığı $X(t, v)$ düzlemsel koni yüzeyi $t \in [0, 1]$ olmak üzere

$$X(t, v) = v \bar{B}(t) = v[(1-t)^2 Q_0 + 2t(1-t)Q_1 + t^2 Q_2]$$

olarak yazılabilir.



Şekil 9. P_0 , P_1 ve P_2 ideal nokta olması durumunda kuadratik Bezier Eğrisi

REFERANSLAR

- Farin, G. (1990). Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design A Practical Guide, 2nd edition, San Diago : Academic Press Inc.
- Farouki, R. (1985). Exact offset procedures for simple solids. Computer Aided Geometric Design, 2 (4), 257-279.
- Hacısalihoglu, H. H. (1998). İki ve Üç Boyutlu Uzaylarda Dönüşümler ve Geometrilere, Ankara: Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Matematik Bölümü Yayınları.
- Hoschek, J. (1985). Offset curves in the plane, Computer Aided Design, 17 (2) , 77-82.
- Hartshorne, R. (1967). Foundations of Projective Geometry, Newyork :W.A. Benjamin, Inc..
- İncesu, M. (2003). Bezier Eğrileri, Bezier Yüzeyleri ve Sayısal Algoritmalar, Yük. Lis. Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi ,Trabzon,
- İncesu, M. ve Gursoy, O. (2004). Bezier Yüzeylerinde Esas Formlar ve eğrilikler, XVII Ulusal Matematik Sempozyumu, Bolu,146-157.

- Ören, İ., ve İncesu, M. (2020). Recognition of complex polynomial Bezier curves under similarity transformations. *Communications Faculty of Sciences University of Ankara Series A1 Mathematics and Statistics*, 69(2), 1377-1388
- Potmann, H. (1995). Rational curves and surfaces with rational offsets, *Computer Aided Geometric Design*, 12, 175-192.
- Samanci, H. K., Celik, S. ve İncesu, M. (2015). The Bishop frame of Bézier curves. *Life Sci. J*, 12(6), 175-180.
- Samancı, H. K., İncesu, M. (2020). Investigating a quadratic Bezier curve due to NCW and N-Bishop frames. *Turkish Journal of Mathematics and Computer Science*, 12(2), 120-127.
- Samanci, H. K. (2021). The Serret Frenet Frame of the Rational Bezier Curves in the Euclidean -3 Space by Algorith Method, *Journal of Science & Arts*, 21(3), 721- 748.
- Şimşek, M. (2024). Projektif Düzlemde Bezier Eğrileri, Yük. Lis. Tezi, Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Muş.

Dual Bézier Eğrilerinde Frenet Çatısı¹

Muhsin İNCESU²
Fadime TEKGÜL³

- 2- Doç. Dr.; Muş Alparslan Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Matematik Bölümü.
m.incesu@alparslan.edu.tr ORCID No: 0000-0003-2515-9627
- 3- Öğretmen; Malatya il Milli Eğitim Müdürlüğü . m.incesu@alparslan.edu.tr ORCID No: 0000-0001-8781-8072

¹ Bu çalışma Fadime TEKGÜL'ün Yüksek Lisans Tezinden üretilmiştir. Muş Alparslan Üniv. Fen Bil. Ens. Mat. ABD, Danışman: Doç. Dr. Muhsin İNCESU, 2024.

ÖZET

Vida sistemleri, uzay mekanizmaları gibi alanlarda sıklıkla kullanılan dual sayı kavramı, özellikle birim dual küre üzerindeki noktaların 3- boyutlu Öklid uzayında yönlenmiş bir doğruya karşılık getirilmesinden sonra geometrideki temel kavramların doğrular ile ifade edilmek yerine noktalar ile betimlenmesiyle çok büyük önem kazanmıştır. Böylece bir regle yüzeyin incelenmesi, küresel bir eğrinin çalışılmasına indirgenmiştir.

Dual uzayda Bernstein taban polinomlarının ifadesini Samancı (2015, 2017) vermiştir. Incesu (2022) de Dual uzayda Bezier eğrileri ve birim dual küre üzerine projeksiyon eğrileri, reel parametreye bağlı olarak yani $t^* = 0$ durumunda verilmiştir. Bu çalışmada parametre keyfi dual değişken alınarak Bezier eğrileri çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler – Dual Vektör, Bezier Eğrisi, Frenet Vektör Alanı, Eğrilikler, Dual Değişken

GİRİŞ

Mekanik ve Mekanizmalar teorisinde sıklıkla kullanılan regle yüzey kavramı ve bununla ilişkili olarak da dual uzay ve D-modül üzerindeki eğriler robotik, mimari ve diğer endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Regle yüzeyler Öklid uzayları, Lorentz - Minkowski uzayları, Galile ve pseudo-Galile uzayları gibi birçok uzayda incelenmiştir Hacısalihoğlu, (1972, 1983), Kazaz, Özdemir ve Güröğlü (2008), Nesovic vd., (2016), Güler ve Kasap, (2018), (Hathout, Bekar ve Yaylı, 2017), Taş (2016), (Taş ve İlarıslan, 2019), (Taş ve Gürsoy, 2018) çalışmaları örnek olarak verilebilir.

Parametrik eğriler ve yüzeyler bilgisayar destekli tasarımın (CAD) temelini oluşturmaktadır. bu alanda kavramların başında Bézier eğrileri ve yüzeyleri gelmektedir. Bezier eğrileri, en kararlı çözümleri veren polinom eğriler olduklarından bu eğrilerle ilgili pek çok çalışmalar yapılmıştır. Bunlara örnek olarak G. Farin (1990), R. Farouki (1985), J.Hoschek (1985), H. Potmann (1995), Incesu (2003, 2004), Samancı H., Çelik S, Incesu M (2015), Samancı H (2018, 2021), Samancı H ve Incesu M (2020), Ören ve Incesu (2020), çalışmaları verilebilir.

Incesu (2022) de dual uzayda Bezier eğrilerini reel parametre olarak çalışmıştır. Keyfi dual değişkenler için Bernstein polinomlarını Samancı (2015, 2017) vermiştir.

Dual Uzayda Bezier Eğrileri

Incesu (2022) de Dual uzayda Bezier eğrileri ve birim dual küre üzerine projeksiyon eğrileri, reel parametreye bağlı olarak yani $t^* = 0$ durumunda

verilmiştir. Bu çalışmada parametre keyfi dual değişken alınarak Bezier eğrileri çalışılmıştır.

Lineer Dual Bezier Eğrisi

Kontrol noktaları $\hat{P}_0 = P_0 + \varepsilon P_0^*$ ve $\hat{P}_1 = P_1 + \varepsilon P_1^*$ olan $(P_i \in \mathbb{R}^3, P_i^* \in \mathbb{R}^3 \ i = 0,1)$ lineer Bezier eğrisini göz önüne alalım.

$$\hat{P}_0 = P_0 + \varepsilon P_0^* \quad \hat{B}(\hat{t}) \quad \hat{P}_1 = P_1 + \varepsilon P_1^*$$

$\hat{t} = t + \varepsilon t^* \in D$ olmak üzere $t \in [0,1]$ ve $t^* \in \mathbb{R}$ anındaki Bezier eğrisinin vektörel ifadesi

$$\hat{B}(\hat{t}) = \hat{P}_0 + \hat{t} \overrightarrow{\hat{P}_0 \hat{P}_1}$$

olur. Dual değişken açıldığında bu ifade

$$\hat{B}(\hat{t}) = \hat{P}_0 \underbrace{(1 - t - \varepsilon t)}_{\hat{B}_0^1} + \underbrace{(t + \varepsilon t^*)}_{\hat{B}_1^1} \cdot \hat{P}_1$$

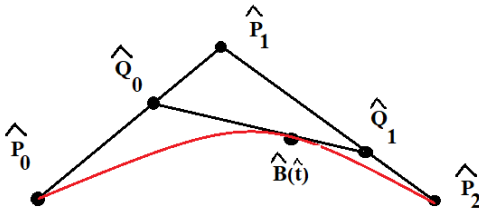
olarak tanımlanır. Burada $\hat{B}_i^1$ ifadeleri dual Bernstein polinomlarıdır ve (Samancı, 2015) ile örtüşür. Eğer $\hat{t} = 0$ ise $\hat{B}(\hat{t}) = \hat{B}(0) = \hat{P}_0$ ve $\hat{t} = 1$ ise $\hat{B}(\hat{t}) = \hat{B}(1) = \hat{P}_1$ olduğu görülür ve reel ve dual kısımlarına ayırdığımızda

$$\hat{B}(\hat{t}) = B(t) + \varepsilon (B^*(t) + t^*(P_1 - P_0))$$

şeklinde olduğu görülür. Burada $B(t)$, kontrol noktaları P_0 ve P_1 olan lineer Bezier eğrisi, $B^*(t)$ ise kontrol noktaları P_0^* ve P_1^* olan bir lineer Bezier eğrisi olur.

Dual Kuadratik Bezier Eğrileri

Kontrol noktaları $\hat{P}_0 = P_0 + \varepsilon P_0^*$, $\hat{P}_1 = P_1 + \varepsilon P_1^*$, $\hat{P}_2 = P_2 + \varepsilon P_2^*$ olan kuadratik Bezier eğrisini elde edelim



Şekil 3. Kuadratik Dual Bezier Eğrisi

$\hat{t} = t + \varepsilon t^* \in D$ olmak üzere $(t \in [0,1]$ ve $t^* \in \mathbb{R})$ bir $\hat{t}$ anında

$$\begin{cases} \hat{Q}_0 = (1 - \hat{t})\hat{P}_0 + \hat{t}\hat{P}_1 \\ \hat{Q}_1 = (1 - \hat{t})\hat{P}_1 + \hat{t}\hat{P}_2 \end{cases}$$

yazılabilir. O halde Kuadratik Bezier eğrisi $\hat{t}$ anında

$$\hat{B}(\hat{t}) = (1 - \hat{t})\hat{Q}_0 + \hat{t}\hat{Q}_1$$

yazılır. Açıldığında ise

$$\hat{B}(\hat{t}) = (1 - \hat{t})^2\hat{P}_0 + 2(1 - \hat{t})\hat{t}\hat{P}_1 + \hat{t}^2\hat{P}_2$$

yazılır. Bu ifadeler Reel ve Dual kısımlarına ayrıldığında,

$$\hat{B}(\hat{t}) = B(t) + \varepsilon[B^*(t) + t^*B'(t)]$$

Olduğu görülür.. Burada $B(t)$, Kontrol noktaları P_0, P_1, P_2 olan; $B^*(t)$, Kontrol noktaları P_0^*, P_1^*, P_2^* olan reel Bezier eğrileridir. B' ise $B(t)$ nin t parametresine göre türevi olan Bezier eğrisidir.

Kübik Dual Bezier Eğrisi

Kontrol noktaları $\hat{P}_0 = P_0 + \varepsilon P_0^*$, $\hat{P}_1 = P_1 + \varepsilon P_1^*$, $\hat{P}_2 = P_2 + \varepsilon P_2^*$ ve $\hat{P}_3 = P_3 + \varepsilon P_3^*$ olan kübik dual bezier eğrisi yukarıda olduğu gibi

$$\hat{B}(\hat{t}) = (1 - \hat{t})^3\hat{P}_0 + 3(1 - \hat{t})^2\hat{t}\hat{P}_1 + 3(1 - \hat{t})\hat{t}^2\hat{P}_2 + \hat{t}^3\hat{P}_3$$

biçiminde yazabiliriz. Bu ifade açıldığında yine ,

$$\hat{B}(\hat{t}) = B(t) + \varepsilon[B^*(t) + t^*B'(t)]$$

Eşitliğinin doğru olduğu görülür. Buna göre kübik dual Bezier eğrisi, dual ve reel kısımlarına ayrıldığında $B(t)$, kontrol noktaları P_0, P_1, P_2, P_3 olan ve $B^*(t)$, kontrol noktaları $P_0^*, P_1^*, P_2^*, P_3^*$ olan kübik reel Bezier eğrileridir.

Genel Bezier Eğrisi

Yukarıdaki metod genişletildiğinde kontrol noktaları $\hat{P}_0 = P_0 + \varepsilon P_0^*$, $\hat{P}_1 = P_1 + \varepsilon P_1^*$, $\hat{P}_2 = P_2 + \varepsilon P_2^*$,, $\hat{P}_n = P_n + \varepsilon P_n^*$ olan dual n.nci derece Bezier eğrisi

$$\hat{B}(\hat{t}) = \sum_{i=0}^n \hat{B}_i^n(\hat{t})\hat{P}_i$$

biçiminde ifade edilebilir. Burada $\hat{B}_i^n(\hat{t})$, dual Bernstein taban polinomlarıdır.

$$\hat{B}_i^n(\hat{t}) = \begin{cases} \binom{n}{i}(1 - \hat{t})^{n-i}\hat{t}^i, & 0 \leq i \leq n \\ 0, & \text{diğer} \end{cases}$$

biçimindedir. Bu ifadeler reel ve dual kısımlara ayrıldığında dual değişkenli genel Bezier eğrisi yukarıda olduğu gibi

$$\hat{B}(\hat{t}) = B(t) + \varepsilon[B^*(t) + t^*B'(t)]$$

şeklinde yazılabilir.

Teorem 1: $\hat{B}(\hat{t}) = \hat{B}(t + \varepsilon t^*)$ eğrisi n.dereceden Dual Bezier eğrisi olsun. (Kontrol noktaları $\hat{P}_0 = P_0 + \varepsilon P_0^*$, $\hat{P}_1 = P_1 + \varepsilon P_1^*$, $\hat{P}_n = P_n + \varepsilon P_n^*$ olan) Bu takdirde

$$\text{i) } \hat{B}|_{t=0} = P_0 + \varepsilon P_0^* = \hat{P}_0$$

$$\text{ii) } \hat{B}|_{t^*=0} = B(t) + \varepsilon B^*(t)$$

$$\text{iii) } \hat{B}|_{t=1} = P_n + \varepsilon(P_n^* + nt^*\Delta P_{n-1})$$

dir. Burada $\Delta P_{n-1} = P_n - P_{n-1}$ dir.

Teorem 2: $\hat{B}(\hat{t})$ n.dereceden dual Bezier eğrisi olsun. Kontrol noktaları da $\hat{P}_i = P_i + \varepsilon P_i^*$, ($i = 0, \dots, n$) olarak verilsin. Bu takdirde

$$\frac{d(\hat{B}(\hat{t}))}{d\hat{t}} = \sum_{i=0}^{n-1} \hat{B}_i^{n-1}(\hat{t}) \hat{P}_i^{(1)}$$

dir. Burada $\hat{P}_i^{(1)} = n(\hat{P}_{i+1} - \hat{P}_i)$ dir.

İspat: Reel Bezier eğrilerinde olduğu gibidir. Bkz (Tekgül, 2024)

Teorem 3: $\hat{B}(\hat{t})$, kontrol noktaları $\hat{P}_i = P_i + \varepsilon P_i^*$ ($i = 0, \dots, n$) olan n derece dual Bezier eğrisi olsun. Bu takdirde

$$\hat{B}'(\hat{t}) = B'(t) + \varepsilon (B^{*'}(t) + t^* B''(t))$$

dir. Burada $B(t)$, kontrol noktaları P_i ler olan, $B^*(t)$ de kontrol noktaları P_i^* olan n.derece Reel Bezier eğrisidir.

İspat: Bkz (Tekgül, 2024)

Teorem 4: Kontrol noktaları $\hat{P}_i = P_i + \varepsilon P_i^*$, ($i = 0, \dots, n$) olan n.derece dual Bezier eğrisinin ikinci türevi

$$\frac{d^2(\hat{B}(\hat{t}))}{d\hat{t}^2} = \sum_{i=0}^{n-2} \hat{P}_i^{(2)} \hat{B}_i^{n-2}(\hat{t})$$

dir. Burada

$$\begin{aligned} \hat{P}_i^{(2)} &= n(n-1) \cdot (\hat{P}_{i+2} - 2\hat{P}_{i+1} + \hat{P}_i) \\ &= n(n-1) \cdot [\Delta\hat{P}_{i+1} - \Delta\hat{P}_i] \text{ dir.} \end{aligned}$$

$$(\Delta\hat{P}_j = \hat{P}_{j+1} - \hat{P}_j) \text{ dir.}$$

İspat: Reel Bezier eğrilerinde olduğu gibidir. İncesu (2003)

Teorem 5: $\hat{B}(\hat{t})$, Kontrol noktaları $\hat{P}_i = P_i + \varepsilon P_i^*$ olan n.nci derece dual Bezier eğrisi olsun. Bu takdirde

$$\hat{B}'(\hat{t} = t + \varepsilon t^*)|_{t=0, t^*=0} = n(P_1 - P_0) = n\Delta P_0 = P_0^{(1)} + \varepsilon P_0^{*(1)}$$

$$\hat{B}'(\hat{t} = t + \varepsilon t^*)|_{t=0, t^* \in R} = P_0^{(1)} + \varepsilon (P_0^{*(1)} + t^* P_0^{(2)})$$

$$\hat{B}'(\hat{t} = t + \varepsilon t^*)|_{t=1, t^*=0} = P_{n-1}^{(1)} + \varepsilon P_{n-1}^{*(1)}$$

$$\hat{B}'(\hat{t} = t + \varepsilon t^*)|_{t=1, t^* \in R} = P_{n-1}^{(1)} + \varepsilon (P_{n-1}^{*(1)} + t^* P_{n-1}^{(2)})$$

Burada;

$$\Delta P_i = P_{i+1} - P_i, P_i^{(1)} = n(P_{i+1} - P_i), P_i^{(2)} = n(n-1) \cdot [\Delta\hat{P}_{i+1} - \Delta\hat{P}_i] \text{ dir.}$$

İspat: son nokta teğet ve son nokta interpolasyon özelliklerinden kolayca görülür.

Sonuç 1: $\hat{B}(\hat{t})$, Kontrol noktaları $\hat{P}_i = P_i + \varepsilon P_i^*$ olan n.nci derece dual Bezier eğrisi olsun. Bu takdirde

$$\hat{B}''(\hat{t}) = B''(t) + \varepsilon[B^{*''}(t) + t^*B'''(t)]$$

Sonuç 2: $\hat{B}(\hat{t})$, Kontrol noktaları $\hat{P}_i = P_i + \varepsilon P_i^*$ olan n.nci derece dual Bezier eğrisi olsun. Bu takdirde

$$\hat{B}^{(n)}(\hat{t}) = B^{(n)}(t) + \varepsilon[B^{*(n)}(t) + t^*B^{(n+1)}(t)]$$

dir.

Teorem 6: $\hat{B}(\hat{t})$, Kontrol noktaları $\hat{P}_i = P_i + \varepsilon P_i^*$ olan n.nci derece dual Bezier eğrisi olsun. Bu takdirde

$$i) \hat{B}''(\hat{t})|_{t=0, t^*=0} = P_0^{(2)} + \varepsilon P_0^{*(3)}$$

$$ii) \hat{B}''(\hat{t})|_{t=1, t^*=0} = P_{n-1}^{(2)} + \varepsilon P_{n-3}^{*(3)}$$

$$iii) \hat{B}''(\hat{t})|_{t=0, t^* \in R} = P_0^{(2)} + \varepsilon [P_0^{*(2)} + t^*P_0^{*(3)}]$$

$$iv) \hat{B}''(\hat{t})|_{t=1, t^* \in R} = P_{n-2}^{(2)} + \varepsilon [P_{n-2}^{*(2)} + t^*P_{n-3}^{*(3)}]$$

dir.

İspat:

Bezier eğrilerinin son nokta interpolasyon ve son nokta teğet özellikleri kullanılarak ispat kolayca görülür.

Dual Bezier Eğrilerinde Frenet Çatısı

$\hat{B}(\hat{t})$ Kontrol noktaları $\hat{P}_i = P_i + \varepsilon P_i^*$ olan dual Bezier eğrisi olsun. Bu takdirde herhangi bir $\hat{t} = t + \varepsilon t^*$ noktasında eğri üzerindeki Frenet-Seret çatısını inşa edelim.

$\hat{T}, \hat{N}, \hat{B}$ dual Bezier eğrisi üzerindeki dual Frenet vektör alanları olmak üzere $\{\hat{T}, \hat{N}, \hat{B}\}$ üçlüsünü oluşturalım. Bunun için

$$\hat{T} = \frac{\hat{B}'}{\|\hat{B}'\|}$$

O halde

$$\hat{T} = \frac{B' + \varepsilon(B^{*'} + t^*B'')}{\|B' + \varepsilon(B^{*'} + t^*B'')\|}$$

olacaktır.

$$\hat{T} = \frac{\hat{B}'}{\|\hat{B}'\|} = \frac{B'}{\|B'\|} + \varepsilon \left[\frac{B^{*'} + t^*B''}{\|B'\|} - \frac{\langle B', B^{*'} + t^*B'' \rangle}{\|B'\|^3} B' \right]$$

olarak ifade edilebilir. Benzer şekilde Binormal vektör alanı

$$\hat{B} = \frac{\hat{B}' \times \hat{B}''}{\|\hat{B}' \times \hat{B}''\|}$$

olacağından, binormal vektör alanı

$$\hat{B} = \frac{(B' + \varepsilon(B^{*'} + t^*B'')) \times (B'' + \varepsilon(B^{*''} + t^*B'''))}{\|(B' + \varepsilon(B^{*'} + t^*B'')) \times (B'' + \varepsilon(B^{*''} + t^*B'''))\|}$$

olur. Bu ifade açıldığında pay kısmı

$$(B' \times B'') + \varepsilon[B^{*'} \times B'' + B' \times B^{*''} + t^*B' \times B''']$$

olacağından birnormal vektör alanı:

$$\widehat{\mathbf{B}} = \frac{B' \times B''}{\|B' \times B''\|} + \varepsilon \left[\begin{aligned} & \frac{(B^{*'} + B'' + B' \times B^{*''} + t^* B' \times B''')}{\|\widehat{B}' \times \widehat{B}''\|} \\ & - \frac{\langle (B' \times B''), (B^{*'} \times B'' + B' \times B^{*''} + t^* B' \times B''') \rangle}{\|\widehat{B}' \times \widehat{B}''\|^3} \cdot B' \times B'' \end{aligned} \right]$$

olur. İç çarpım hesaplandığında,

$$\begin{aligned} \langle B' \times B'', B^{*'} \times B'' \rangle &= \langle B', B^{*'} \rangle \langle B'', B'' \rangle - \langle B', B'' \rangle \langle B^{*'}, B'' \rangle \\ \langle B' \times B'', B' \times B^{*''} \rangle &= \langle B', B' \rangle \langle B'', B^{*''} \rangle - \langle B', B^{*''} \rangle \langle B', B'' \rangle \\ t^* [\langle B' \times B'', B' \times B''' \rangle] &= t^* [\langle B', B' \rangle \langle B'', B''' \rangle - \\ & \langle B', B''' \rangle \langle B', B'' \rangle] \end{aligned}$$

eşitlikleri hesaplanır. Yerine yazıldığında binormal vektör alanı

$$\begin{aligned} \widehat{\mathbf{B}} &= \frac{B' \times B''}{\|B' \times B''\|} \\ &+ \varepsilon \left[\begin{aligned} & \frac{(B^{*'} \times B'' + B' \times B^{*''} + t^* B' \times B''')}{\|B' \times B''\|} \\ & - \left[\frac{[\langle B', B^{*'} \rangle \|B''\|^2 + \langle B'', B^{*''} \rangle \|B'\|^2 - \langle B', B'' \rangle (\langle B', B^{*''} \rangle + \langle B^{*'}, B'' \rangle)]}{\|B' \times B''\|^3} \right. \\ & \quad \left. + \frac{t^* (\|B'\|^2 \langle B'', B''' \rangle - \langle B', B'' \rangle \langle B' B''' \rangle)}{\|B' \times B''\|^3} \right] \cdot B' \end{aligned} \right] \\ &\times B'' \end{aligned}$$

olur.

$$\begin{aligned} \widehat{\mathbf{N}} &= \widehat{\mathbf{B}} \times \widehat{\mathbf{T}} \\ &= \left[\frac{\widehat{B}' \times \widehat{B}''}{\|\widehat{B}' \times \widehat{B}''\|} \right] \times \left[\frac{\widehat{B}'}{\|\widehat{B}'\|} \right] \\ &= \left[\frac{(B' + \varepsilon(B^{*'} + t^* B'')) \times (B'' + \varepsilon(B^{*''} + t^* B'''))}{\|(B' + \varepsilon(B^{*'} + t^* B'')) \times (B'' + \varepsilon(B^{*''} + t^* B'''))\|} \right] \times \left[\frac{(B' + \varepsilon(B^{*'} + t^* B''))}{\|(B' + \varepsilon(B^{*'} + t^* B''))\|} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \left[\left(\frac{B' \times B''}{\|B' \times B''\|} \right) + \right. \\
&\quad \left. \varepsilon \left[- \frac{\frac{B^{*'} \times B'' + B' \times B^{*''} + t^* B' \times B^{*''}}{\|B' \times B''\|}}{\frac{\langle (B' \times B''), (B^{*'} \times B'' + B' \times B^{*'} + t^* B' \times B'') \rangle}{\|B' \times B''\|^3}} \cdot B' \times B'' \right] \right] \times \\
&\quad \times \left[\frac{B'}{\|B'\|} + \varepsilon \left[\frac{B^{*'} + t^* B''}{\|B'\|} - \frac{\langle B', B^{*'} + t^* B'' \rangle}{\|B'\|^3} \cdot B' \right] \right] \\
&= \frac{(B' \times B'') \times B'}{\|B' \times B''\| \cdot \|B'\|} + \\
&\quad + \varepsilon \left[\frac{(B' \times B'') \times (B^{*'} + t^* B'')}{\|B' \times B''\| \cdot \|B'\|} - \frac{\langle B', B^{*'} + t^* B'' \rangle}{\|B'\|^3 \|B' \times B''\|} ((B' \times B'') \times B') \right. \\
&\quad \left. + \frac{[B^{*'} \times B'' + B' \times B^{*''} + t^* B' \times B^{*''}] \times B'}{\|B' \times B''\| \cdot \|B'\|} \right. \\
&\quad \left. - \frac{\langle (B' \times B''), (B^{*'} \times B'' + B' \times B^{*'} + t^* B' \times B'') \rangle}{\|B'\| \|B' \times B''\|^3} (B' \times B'') \times B' \right] \\
&= \frac{\langle B', B' \rangle B'' - \langle B', B'' \rangle B'}{\|B'\| \|B' \times B''\|} + \\
&\quad + \varepsilon \left[\frac{\frac{\langle B', B^{*'} \rangle B'' - \langle B', B'' \rangle B' + t^* [\langle B', B'' \rangle B'' - \langle B'', B'' \rangle B']}{\|B' \times B''\| \cdot \|B'\|}}{\|B'\|^3 \cdot \|B' \times B''\|} \right. \\
&\quad \left. + \frac{\langle B^{*'}, B' \rangle B'' - \langle B'', B' \rangle B^{*'} + \langle B', B' \rangle B^{*''} - \langle B^{*''}, B' \rangle B' + t^* (\langle B', B' \rangle B^{*''} - \langle B^{*''}, B' \rangle B')}{\|B' \times B''\| \cdot \|B'\|} \right. \\
&\quad \left. - \frac{[\langle (B' \times B''), (B^{*'} \times B'' + B' \times B^{*''} + t^* B' \times B^{*''}) \rangle]}{\|B' \times B''\|^3 \cdot \|B'\|} (\langle B', B' \rangle B'' - \langle B'', B' \rangle B') \right]
\end{aligned}$$

olarak bulunur.

Dual eğrilik ise aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{aligned}
\hat{\kappa} &= \frac{\|\hat{B}' \times \hat{B}''\|}{\|\hat{B}'\|^3} \\
\hat{\kappa} &= \left[\frac{\| [B' + \varepsilon(B^{*'} + t^* B'')] \times [B'' + \varepsilon(B^{*''} + t^* B''')] \|}{\|\hat{B}'\|^3} \right] \\
\hat{\kappa} &= \frac{\|B' \times B'' + \varepsilon(B' \times B^{*''} + t^* B' \times B^{*''} + B^{*'} \times B'')\|}{\|B'\|^3 + 3\varepsilon \langle B', B^{*'} + t^* B'' \rangle} \\
&= \frac{\|B' \times B''\| + \varepsilon \frac{\langle B' \times B'', B' \times B^{*''} + t^* B' \times B^{*''} + B^{*'} \times B'' \rangle}{\|B' \times B''\|}}{\|B'\|^3 + 3\varepsilon \langle B', B^{*'} + t^* B'' \rangle} \\
&= \frac{\|B' \times B''\|^2 + \varepsilon \langle B' \times B'', B' \times B^{*''} + t^* B' \times B^{*''} + B^{*'} \times B'' \rangle}{\|B' \times B''\| [\|B'\|^3 + 3\varepsilon \langle B', B^{*'} + t^* B'' \rangle]}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{\|B' \times B''\|} \left[\frac{1}{\|B'\|^3} - \varepsilon \frac{3\varepsilon \langle B', B^{*'} + t^* B'' \rangle}{\|B'\|^6} \right] [\|B' \times B''\|^2 + \varepsilon \langle B' \times B'', B' \times \\
&B^{*''} + t^* B' \times B''' + B^{*'} \times B'' \rangle] \\
&\hat{\kappa} = \frac{\|B' \times B''\|}{\|B'\|^3} + \\
&+ \varepsilon \left[\frac{\langle B' \times B'', B' \times B^{*''} + t^* B' \times B''' + B^{*'} \times B'' \rangle}{\|B' \times B''\| \cdot \|B'\|^3} - \frac{3\|B' \times B''\|}{\|B'\|^6} \cdot \langle B', B^{*'} + t^* B'' \rangle \right]
\end{aligned}$$

Dual torsiyonu bulabilmek için öncelikle şu ifadeyi bulalım:

$$\begin{aligned}
&\det(\hat{B}', \hat{B}'', \hat{B}''') \\
&= \det \left[(B' + \varepsilon(B^{*'} + t^* B'')), (B'' + \varepsilon(B^{*''} + t^* B''')), (B''' + \varepsilon(B^{*'''} + t^* B^{*v})) \right] \\
&= \det(B', B'', B''') + \\
&+ \varepsilon [\det(B^{*'}, B'', B''') + \det(B', B^{*''} B''') + \det(B', B'', B^{*'''}) + \\
&t^* \det(B', B'', B^{*v})]
\end{aligned}$$

bulunur. O halde dual torsiyon ise

$$\begin{aligned}
\hat{\tau} &= \frac{\det(\hat{B}', \hat{B}'', \hat{B}''')}{\|\hat{B}' \times \hat{B}''\|^2} \\
&= \frac{\det \left[(B' + \varepsilon(B^{*'} + t^* B'')), (B'' + \varepsilon(B^{*''} + t^* B''')), (B''' + \varepsilon(B^{*'''} + t^* B^{*v})) \right]}{\left\| (B' + \varepsilon(B^{*'} + t^* B'')) \times (B'' + \varepsilon(B^{*''} + t^* B''')) \right\|^2} \\
&= \frac{\det(B', B'', B''') + \varepsilon \left[\det(B^{*'}, B'', B''') + \det(B', B^{*''}, B''') + \det(B', B'', B^{*'''}) + \det(B^{*'}, B'', B^{*v}) \right]}{\left\| B' \times B'' + \varepsilon(B' \times B^{*''} + B^{*'} \times B'' + t^* B' \times B''') \right\|^2} \\
&= \frac{\det(B', B'', B''') + \varepsilon \left[\det(B^{*'}, B'', B''') + \det(B', B^{*''}, B''') + \det(B', B'', B^{*'''}) + \det(B^{*'}, B'', B^{*v}) \right]}{\left[\|B' \times B''\| + \varepsilon \frac{\langle B' \times B'', B' \times B^{*''} + B^{*'} \times B'' + t^* B' \times B''' \rangle}{\|B' \times B''\|} \right]^2} \\
\hat{\tau} &= \frac{\det(B', B'', B''')}{\|B' \times B''\|^2} + \\
&+ \varepsilon \left[\frac{\left(\det(B', B'', B^{*'''}) + \det(B', B^{*''}, B''') \right)}{\|B' \times B''\|^2} + \det(B^{*'}, B'', B^{*v}) \right] \\
&- \frac{2\det(B', B'', B''')}{\|B' \times B''\|^4} \langle B' \times B'', B' \times B^{*''} + B^{*'} \times B'' + t^* B' \times B''' \rangle
\end{aligned}$$

elde edilir.

Bunlarla birlikte aşağıdaki teoremi verebiliriz.

Teorem 16: $\hat{B}(\hat{t}) = B(t) + \varepsilon(B^*(t) + t^*B'(t))$ eğrisi, kontrol noktaları $\hat{P}_i = P_i + \varepsilon P_i^*$ ($i = 0, \dots, n$) olan dual Bezier eğrisi olsun. Bu

taktirde $\hat{t} = t + \varepsilon t^* \in D$ noktasında eğrinin Frenet vektör alanları $\{\hat{T}, \hat{N}, \hat{B}\}$ ve dual eğrilikleri $\{\hat{\kappa}, \hat{\tau}\}$ aşağıdaki gibidir:

a) Dual Teğet Vektör Alanı,

$$\hat{T} = \frac{B'}{\|B'\|} + \varepsilon \left[\frac{B^{*'} + t^* B''}{\|B'\|} - \frac{\langle \hat{B}', B^{*'} + t^* B'' \rangle}{\|B'\|^3} B' \right]$$

b) Dual Binormal Vektör Alanı,

$$\hat{B} = \frac{B' \times B''}{\|B' \times B''\|} + \varepsilon \left[\begin{aligned} & \frac{(B^{*'} \times B'' + B' \times B^{*''} + t^* B' \times B''')}{\|B' \times B''\|} \\ & - \left[\frac{[\langle B', B^{*'} \rangle \|B''\|^2 + \langle B'', B^{*''} \rangle \|B'\|^2 - \langle B', B'' \rangle (\langle B', B^{*''} \rangle + \langle B^{*'}, B'' \rangle)]}{\|B' \times B''\|^3} \right. \\ & \quad \left. + \frac{t^* (\|B'\|^2 \langle B'', B^{*''} \rangle - \langle B', B'' \rangle \langle B' B^{*''} \rangle)}{\|B' \times B''\|^3} \right] \cdot B' \times B'' \end{aligned} \right]$$

c) Dual Normal Vektör Alanı,

$$\hat{N} = \frac{\langle B', B' \rangle B'' - \langle B', B'' \rangle B'}{\|B'\| \|B' \times B''\|} + \varepsilon \left[\begin{aligned} & \frac{\langle B', B^{*'} \rangle B'' - \langle B^{*'}, B'' \rangle B' + t^* [\langle B', B'' \rangle B'' - \langle B'', B'' \rangle B']}{\|B' \times B''\| \cdot \|B'\|} \\ & - \frac{(\langle B', B^{*'} + t^* B'' \rangle) [\langle B', B' \rangle B'' - \langle B'', B' \rangle B']}{\|B'\|^3 \cdot \|B' \times B''\|} \\ & + \frac{\langle B^{*'}, B' \rangle B'' - \langle B'', B' \rangle B^{*'} + \langle B', B' \rangle B^{*''} - \langle B^{*''}, B' \rangle B' + t^* (\langle B', B' \rangle B^{*''} - \langle B^{*''}, B' \rangle B')}{\|B' \times B''\| \cdot \|B'\|} \\ & - \frac{[(\langle B' \times B'' \rangle) \cdot (B^{*'} \times B'' + B' \times B^{*''} + t^* B' \times B''')]}{\|B' \times B''\|^3 \cdot \|B'\|} (\langle B', B' \rangle B'' - \langle B'', B' \rangle B') \end{aligned} \right]$$

d) Dual Eğrilik Alanı

$$\hat{\kappa} = \frac{\|B' \times B''\|}{\|B'\|^3} + \varepsilon \left[\frac{\langle B' \times B'', B' \times B^{*''} + t^* B' \times B^{*'''} + B^{*'} \times B'' \rangle}{\|B' \times B''\| \cdot \|B'\|^3} - \frac{3 \|B' \times B''\|}{\|B'\|^6} \cdot \langle B', B^{*'} + t^* B'' \rangle \right]$$

e) Dual Torsiyon Alanı

$$\hat{\tau} = \frac{\det(B', B'', B''')}{\|B' \times B''\|^2} +$$

$$+ \varepsilon \left[\begin{aligned} & \frac{\left(\det(B', B'', B^{*'''}) + \det((B', B^{*''}, B^{*'''})) \right)}{\|B' \times B''\|^2} \\ & - \frac{2\det(B', B'', B^{*''})}{\|B' \times B''\|^4} \langle B' \times B'', B' \times B^{*''} + B^{*'} \times B'' + t^* B' \times B^{*''} \rangle \end{aligned} \right]$$

dir.

REFERANSLAR

- Farin, G. (1990). Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design A Practical Guide, 2nd edition, San Diago : Academic Press Inc.
- Farouki, R. (1985). Exact offset procedures for simple solids. Computer Aided Geometric Design, 2 (4), 257-279.
- Gursoy, O. (1992). Some Results on Closed Ruled Surfaces and Closed space Curves Mech. Mach. Theory , 27, 323-330
- Gursoy, O. ve Küçük, A. (1999). On the Invariants of Trajectory Surfaces, Mech. Mach. Theory , 34, 587-597.
- Gursoy, O. ve Küçük, A. (2004). On the Invariants of Bertrand Trajectory Surfaces Offsets, Applied Mathematics and Computation, 151 (3), 763-773.
- Güler, F. ve Kasap, E. (2018). A path planning method for robot end effector motion using the curvature theory of the ruled surfaces, Int. J. Geom. Meth. Mod. Phys., 15 1850048.
- Hacısalihoglu, H. H. (1983), Hareket geometrisi ve kuaterniyonlar teorisi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Hacısaliholu, H. H. (1972). On the pitch of a ruled surface, Mech. Mach. Theory, Great Britain 7 (1972) 291–305, doi: 10.1016/0094-114X(72)90039-0.
- Hathout, F., Bekar, M. ve Yaylı, Y.(2017). Ruled surfaces and tangent bundle of unit 2- sphere, Int. J. Geom. Meth. Mod. Phys., 14 1750145.
- Hoschek, J. (1985). Offset curves in the plane, Computer Aided Design, 17 (2) , 77-82.
- Hartshorne, R. (1967). Foundations of Projective Geometry, Newyork :W.A. Benjamin, Inc..
- İncesu, M. (2003). Bezier Eğrileri, Bezier Yüzeyleri ve Sayısal Algoritmalar, Yük. Lis. Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi ,Trabzon,
- İncesu, M. ve Gursoy, O. (2004). Bezier Yüzeylerinde Esas Formlar ve eğrilikler, XVII Ulusal Matematik Sempozyumu, Bolu,146-157.
- Ören, İ., ve İncesu, M. (2020). Recognition of complex polynomial Bezier curves under similarity transformations. *Communications Faculty of Sciences University of Ankara Series A1 Mathematics and Statistics*, 69(2), 1377-1388
- Kazaz, M., Özdemir, A. ve Güroğlu, T. (2008). On the determination of a developable timelike ruled surface, SDÜ Fen-Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi (E-Dergi), 3 (1), 72-79

- Nešović, E., Öztürk, U., Öztürk, E. B. K. ve İlarslan, K. (2016). On ruled surfaces with pseudo null base curve in Minkowski 3-space, *Int. Electron. J. Geom.* 9 (2), 9–20.
- Potmann, H. (1995). Rational curves and surfaces with rational offsets, *Computer Aided Geometric Design*, 12, 175-192.
- Samanci, H. K., Celik, S. ve İncesu, M. (2015). The Bishop frame of Bézier curves. *Life Sci. J.* 12(6), 175-180.
- Samanci, H. K., İncesu, M. (2020). Investigating a quadratic Bezier curve due to NCW and N-Bishop frames. *Turkish Journal of Mathematics and Computer Science*, 12(2), 120-127.
- Samanci, H. K. (2021). The Serret Frenet Frame of the Rational Bezier Curves in the Euclidean -3 Space by Algorith Method, *Journal of Science & Arts*, 21(3), 721- 748.
- Tekgöl F. (2024). Projektif Düzlemde Bezier Eğrileri, Yük. Lis. Tezi, Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Muş.
- Taş, F. (2016). A method of determining dual unit spherical B'ezier curves and line surfaces, *J. Logic Math. Linguistics Appl. Sci.*, 1, 1–6. 46
- Taş, F. ve Gürsoy, O.(2018.) On the line congruences, *Int. Electron. J. Geom.* 11 (2), 47– 53.
- Taş, F. ve İlarslan, K. (2019). A new approach to design the ruled surface, *International Journal of Geometric Methods in Modern Physics* Vol., 16 (6), 1950093 (16 pages)

Kumarin ve Türevleri: Kimyasal Yapıları ve Biyolojik Etkileri

Nesibe ARSLAN BURNAZ ¹
Tuba Eda ARPA ZEMZEMOĞLU ²

- 1- Doç.Dr.; Gümüşhane Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi Beslenme ve Diyetetik Bölümü.
nsbburnaz@gmail.com ORCID No: 0000-0003-1163-4829
- 2- Dr. Öğr. Üyesi; Gümüşhane Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi Beslenme ve Diyetetik
Bölümü.tubaedaarpa@gmail.com ORCID No: 0000-0002-6836-4527

ÖZET

Kumarinler, benzopiron sınıfına ait heterosiklik bileşiklerdir. Bu moleküller birçok farklı yapıya sahiptir. Doğal olarak bitkilerden elde edilebilir veya çeşitli kimyasal reaksiyonlarla sentezlenebilirler. Kumarinler endüstride kozmetik ve parfüm bileşenleri, gıda katkı maddeleri ve özellikle çeşitli hastalıkların tedavisi için ilaç endüstrisinde çok sayıda sentetik farmasötik ürünün sentezinde kullanılabilirler.

Kumarinler çok çeşitli biyolojik aktiviteler ve geniş bir terapötik profil sunarlar. Çeşitli farklı hedef proteinleri ve enzimleri inhibe edebilirler. Kumarinler ve türevleri anti-inflamatuvar, antikoagülan, antioksidan, antitümör, antiviral, antidiyabetik, antidepresif, antibakteriyel, sitotoksik, antiviral, anti-HIV, anti-Alzheimer gibi bir dizi farklı biyolojik aktiviteye sahip önemli bir farmakolojik ajan sınıfını oluştururlar. Yapısal ve fizikokimyasal özellikleri onları tıbbi kimya ve klinik biyokimya alanlarında ayrıcalıklı konuma getirmektedir. Şimdiye kadar, antikoagülan ve antinörodejeneratif ajanlar gibi bazı kumarin bazlı ilaçlar klinikte yaygın olarak kullanılmıştır. Son yıllarda tıbbi kimyagerler çeşitli kumarin türevlerinin farmakolojik potansiyellerinin keşfi üzerine yaptıkları çalışmalarda özellikle kanser, diyabet, kardiyovasküler ve beyin hastalıkları riskini azaltma gibi insan sağlığı üzerinde yararlı etkileri üzerine odaklanmışlardır. Kumarin türevleri umut verici terapötik ajanlardır, bu nedenle kumarin türevlerinin sentezi için yeni ve sürdürülebilir metodolojiler, yeşil ve daha düşük maliyetli bir yaklaşımla daha da önem kazanabilir. Bu bileşikler, özel kimyasal yapıları sayesinde günümüzde ilaç biliminde aktif olarak araştırılmaktadır.

Bu bölüm, kumarin ve türevlerinin kimyasal yapısının yanı sıra bu bileşiklerin sağlık yararlarıyla ilişkili olarak çeşitli biyoaktivite özelliklerini konu alan güncel literatür bilgileri derlenmiştir.

Anahtar Kelimeler – Kumarinler, Kumarin Türevleri, Kimyasal Yapı, Biyolojik Etki, 1,2-Benzopiron, O-Hidroksisinnamik Asit-8 Lakton.

GİRİŞ

Kumarin ve türevleri, kaynaşmış benzen ve α -piron halkalarından oluşan tipik benzopiron iskeletine sahip heterosiklik bileşiklerdir (Sharma vd., 2024).

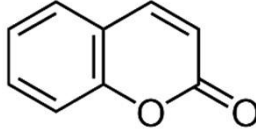
İlk izole edilen ana kumarin 1820 yılında Vogel tarafından edildiği bir Güney Amerika sebzesi olan tonka fasulyesinden (*Dipteryx odorata*, Fabaceae/Leguminosae familyası) elde edilmiştir. Kumarinlerin ismi tonka fasulyesi için kullanılan Fransızca "Coumarou" kelimesinden gelmektedir (Jigar, 2019; Lončar vd., 2020).

Kumarin, tüm bitkiler aleminde yaygın olarak bulunan aromatik ve kokulu özelliklere sahip doğal bir üründür. Sebzeler, baharatlar, meyveler ve tıbbi bitkiler gibi farklı bitki kaynaklarında, bitkilerin tüm kısımları (meyveler, kökler, saplar ve yapraklar) dahil olmak üzere bulunur. İkincil bitki metabolitleri olarak bitkiyi enfeksiyonlardan koruyan, bitki biyokimyası ve fizyolojisinde önemli bir role sahiptirler (Lončar vd., 2020). Bitkiler, bakteriler ve mantarlardan elde edilen 1300'den fazla kumarin tanımlanmıştır. Rutaceae, Asteraceae, Umbelliferae, Clusiaceae, Guttiferae, Caprifoliaceae, Oleaceae, Nyctaginaceae ve Apiaceae gibi birkaç önemli olmak üzere yaklaşık 30 farklı familyaya dağılmış yaklaşık 150 farklı tür içerisinde kumarin bileşiklerinin varlığı rapor edilmiştir (Iranshahi vd., 2009; Venugopala vd., 2013). Özellikle Apiaceae familyasından bazı türler (*Prangos* Lindl., *Ferula* L., *Heracleum* L., *Pachypleurum* Hoff., *Conioselinum* Fisch., *Libanotis* L. ve *Seseli* L.) kumarin içeriği bakımından zengindir. Birçok bitki farklı konsantrasyonlarda kumarin içerir (Sharifi-Rad vd., 2021).

Kumarin ve türevleri, geniş bir biyolojik aktivite spektrumuna sahip en aktif bileşik sınıflarından birini temsil eder. Bu bileşiklerin birçoğunun antikanser (Rawat ve Reddy, 2022), antibakteriyel (Al-Amiery vd., 2014; Al-Amiery vd., 2016a; Al-Amiery vd., 2016b), antiviral (Mishra vd., 2020), antifungal (Al-Amiery vd., 2012), antidepresan (Akwu vd., 2023; Nabeel vd., 2021; Heghes vd., 2022), anti-inflamatuar (Al-Amiery vd., 2013), antikoagülan (Al-Amiery vd., 2011), anti-HIV (Al-Ayed vd., 2011), antidiyabetik (Pan vd., 2022) aktiviteler de dahil olmak üzere çok çeşitli biyolojik özellikleri nedeniyle ayrıcalıklı yapılar olarak kabul edilmektedir. Kumarinlerin bu ilginç özellikleri 2H-kromen-2-on çekirdeğinin kimyasal özelliklerine bağlanabilir. Ayrıca kumarinler, gıda, parfüm, kozmetik ilaçlarda katkı maddesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Al-Majedy vd., 2016).

Kumarinlerin Kimyasal Yapısı

Kumarinler, genellikle bitkiler aleminde bitki ikincil metabolitleri olarak bulunan önemli ve büyük bir oksijen heterosiklikleri sınıfını oluşturur. Kaynaşmış benzen ve α -piron halkalarından oluşur. Kumarinlerin çoğu C-7 pozisyonunda oksijenlenir. Kumarinler ayrıca 1,2-benzopiron veya o-hidroksisinnamik asit-8 lakton olarak da bilinirler (Fylaktakidou vd., 2004; Wu vd., 2009; Garg vd., 2020). Konjuge çift halka sistemleri onları farklı araştırma alanları için ilginç moleküller haline getirmektedir (Carneiro vd., 2021). Kumarinin kimyasal yapısı Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1: Kumarinin Kimyasal Yapısı (Wu vd., 2009).

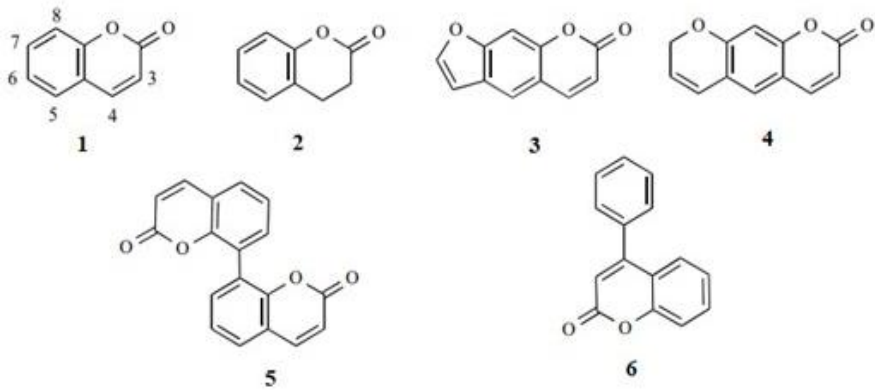
Kumarinler bitkilerin kök, gövde, meyve ve tohum gibi çeşitli bölgelerinde alternatif olarak bulunurlar. Kumarinler genellikle polar yapıları nedeniyle bitkilerde serbest halde bulunurlar ve UV-ışık emiliminde mavi floresan sergilerler (Stefanachi vd., 2018; Rawat ve Reddy, 2022).

Kumarin ve Türevleri

Kumarinler, *Coumarouna odorata*'da (tonka fasulyesi) yüksek konsantrasyonda olmak üzere çok sayıda bitkide doğal olarak bulunmaktadır. Bunlardan bazıları, vanilya otu (*Anthoxanthum odoratum*) (Tava, 2001), tatlı yoncada (*Melilotus cinsi*) (Luo vd., 2016), sinameki tarçını (*Cinnamomum cassia*) (Blahová ve Svobodová, 2012) ve çok sayıda kiraz çiçeği ağacında (*Prunus cinsi*) (Poonam vd., 2011) yüksek oranda bulunur.

Literatürde, kumarin aroması genellikle tatlı kokulu, ağır fındık benzeri tonlara sahip kremsi bir vanilya fasulyesi aroması olarak tanımlanmıştır. Kumarinler ayrıca duş jelleri, şampuan, diş macunu, tuvalet sabunları, mahrem sabunlar, tıraş köpükleri, vücut kremleri, yüz kremleri, el kremleri, deodorantlar, güneş kremleri, tıraş sonrası ve rujlar gibi diğer kozmetik preparatlarda da koku maddesi olarak kullanılmıştır. Ayrıca, bazı ürünlere daha iyi bir tat ve aroma vermek ve böylece bu ürünlerin çekiciliğini artırmak için kullanılmıştır (Lončar vd., 2020). Bununla birlikte kumarinler, gıda, parfüm, kozmetik ilaçlarda katkı maddesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Al-Majedy vd., 2016).

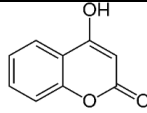
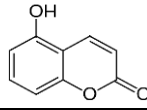
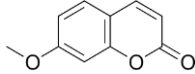
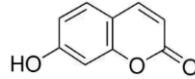
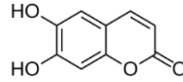
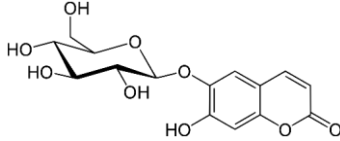
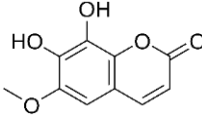
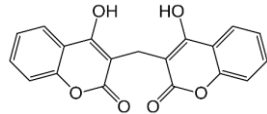
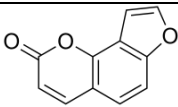
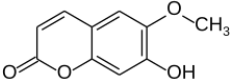
Yeni ve bilinen kumarin türevleri, sentezlenmiş veya doğal kaynaklardan izole edilmiştir. Doğal kumarinler altı temel gruba ayrılabilir: basit kumarinler, furanokumarinler, pirano kumarinler, dikumarinler, fenil kumarinler ve dihidrofurano kumarinler (Venugopala vd., 2013; Detsi, vd., 2017). Doğal kumarinlerin sınıflandırılması Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2: Kumarinlerin kimyasal yapısı: 1)basit kumarinler, 2)furanokumarinler, 3)pirano kumarinler, 4)dikumarinler, 5)fenil kumarinler ve 6)dihidrofurano kumarinler (Wu, vd., 2009; Wang vd., 2023).

Kumarinden türetilen bileşiklere kumarinler veya kumarinoidler de denir (Parvej vd., 2022). Kumarin ve bazı türevleri Tablo 1’de gösterilmiştir. Kumarin bileşiklerinin çoğu termal olarak kararlıdır ve kayda değer optik aktiviteye sahiptir. Orto-hidroksilasyon, bitkilerdeki doğal kumarinlerin biyosentezi için kilit bir noktadır (Sharifi-Rad vd., 2021).

Tablo 1: Kumarin ve Bazı Türevlerinin Kimyasal Yapısı

Kumarin ve Türevleri	Kimyasal Yapısı
1 4-Hidroksikumarin (Coumarinol)	
2 5- Hidroksikumarin (Vicinal)	
3 7-Metoksikumarin (Herniarin)	
4 7-Hidroksikumarin (Umbelliferon)	
5 6,7-Dihidroksikumarin (Esculetin)	
6 6,7-Dihidroksikumarin 6-β-D-glukozid (Esculin)	
7 7,8-Dihidroksi-6-metoksikumarin (Fraxetin)	
8 4-hidroksi-3-[(4-hidroksi-2-okzokromen-3-il)metil]kromen-2-on (Dicoumarol)	
9 2H-Furo[2,3-h][1]benzopiran-2-on (Angelicin)	
1 7-Hidroksi-6-metoksi-2H-1-benzopiran- 0 2-on (Scopoletin)	

Kaynak: Fylaktakidou vd., 2004

Kumarin ve Türevlerinin Biyolojik Etkileri

Kumarin ve türevlerinin birçoğu antikanser (Rawat ve Reddy, 2022), antibakteriyel (Al-Amiery vd., 2014; Al-Amiery vd., 2016a; Al-Amiery vd., 2016b), antiviral (Mishra vd., 2020), antifungal (Al-Amiery vd., 2012), antioksidan (Al-Amiery vd., 2016; Hassanein, vd., 2020; Yang vd., 2022), antidepresan (Akwu vd., 2023; Nabeel vd., 2021; Heghes vd., 2022), anti-inflamatuar (Al-Amiery vd., 2013; Kirsch vd., 2016), antikoagülan (Al-Amiery vd., 2011; Gao vd., 2021), anti-HIV (Al-Ayed vd., 2011), antidiyabetik (Pan vd., 2022) aktiviteler de dahil olmak üzere çok çeşitli biyolojik özellikleri nedeniyle ayrıcalıklı yapılar olarak kabul edilmektedir. Kumarinlerin bu ilginç özellikleri 2H-kromen-2-on çekirdeğinin kimyasal özelliklerine bağlanabilir (Al-Majedy vd., 2016).

Kumarinler ayrıca çeşitli farklı hedef proteinleri ve enzimleri inhibe ederek tıbbi fayda sağlar. Örneğin prostaglandin biyosentezini inhibe ederek ödem ve inflamasyonu azaltır (Detsi, vd., 2017; Garg vd., 2020). İnsülini önemli ölçüde baskılayarak pankreatik adacık hücreleri sayısını artırır ve diyabet gelişiminin azaltır. Bununla ilişkili sinyal yollarını baskılayarak otoimmün diyabet gelişimini önler (Wang vd., 2013). Gerekli durumlarda K vitamini redüktaz enzimini inhibe ederek antikoagülan olarak rol oynar, vb. (Garg vd., 2020).

Antioksidan Etki

Bazı kumarinler (hidroksikumarinler) metal iyonlarını şelatlama yoluyla serbest radikallerin oluşumunu önleyebilir. Kumarinlerin çoğu ise iyi antioksidanlar olarak 2H-kromen-2-on çekirdeğindeki radikal delokalizasyonu sayesinde serbest radikal temizleyici olarak hareket eder (Torres vd., 2014).

Serbest radikaller, eşleşmemiş bir elektron taşıyan bir reaktif türdür. Reaktif türler önemli hücresel süreçlerin yan ürünleridir ve reaktif oksijen türleri (ROS) ve reaktif nitrojen türlerini (RNS) içerir. Reaktif türler yaşam süreçleri sırasında nefes alma, hücre sinyalizasyonu, bağışıklık koruması, patojenlere karşı sitotoksiste gibi çok sayıda metabolik olayla bağlantılıdır. Bununla birlikte, proteinlere, lipitlere ve DNA'ya zarar verebilirler. Fizyolojik koşullar altında, aşırı üretilen reaktif türler, zararlı etkilerini azaltabilen antioksidanlar tarafından nötralize edilir (Parcheta vd., 20121; Todorov vd., 2023). Doğal olarak oluşan bileşiklerin iyi bilinen bir sınıfı olan kumarinler, antioksidan özellikte olup ROS üreten enzimlerin inhibisyonunu sağlamanın yanı sıra hem süpürücü hem de şelatlayıcı antiradikal etki ile ilişkilendirilmiştir (Filipsky vd., 2015; Al-Amiery vd., 2016). Kumarin iskeletinin spesifik yapısı, mükemmel yük ve elektron taşıma özelliklerine sahip konjuge bir sistem içerir. Doğal kumarinlerin antioksidan aktivitesi en az yirmi yıldır yoğun bir çalışma konusu olmuştur (Todorov vd., 2023).

Kumarinin yüksek dozlarının hepatotoksik olduğu bilinmektedir, ancak kanser ve diğerk nronal ve kardiyovasküler rahatsızlıkların riskini azaltarak faydalı etkiler gösterirler. Bu etkilerin çoğu serbest radikal temizleyici, yani antioksidan etkilerine atfedilebilir (Garg vd., 2020).

Kumarin türevlerinden katekol hidroksil grubu içeren yapılar, DPPH serbest radikalini etkili bir şekilde temizleyebilmektedir. 4-metil-7-aminokumarinler ve dikumarinler de oksijen radikali temizleme aktivitesine sahiptir (Pan vd., 2022).

Umbelliferon, esculetin ve kuersetin gibi kumarinler antioksidan özellikler gösterir ve hücreSEL DNA'yı oksidatif hasardan korur (Garg vd., 2020). Umbelliferone, farmakolojik olarak aktif bir ajan olan 7-hidroksikumarindir. Umbelliferon, resorsinol ve formil asetik asidin Pechmann yoğunlaşma reaksiyonu kullanılarak sentezlenir. Umbelliferonun, iltihaplanma, dejeneratif hastalıklar, mikrobiyal enfeksiyonlar ve kanser hücreleri gibi pro-oksidanlar ve ROS ile ilgili durumlar da dahil olmak üzere sağlıkla ilgili çeşitli koşullara karşı çeşitli farmakolojik aktiviteler sergilediğı gösterilmiştir. Literatürde DPPH, hidroksil, süperoksit anyon ve ABTS radikallerinin iyi bir temizleyicisi olduğu bildirilmiştir (Mazimba, 2017).

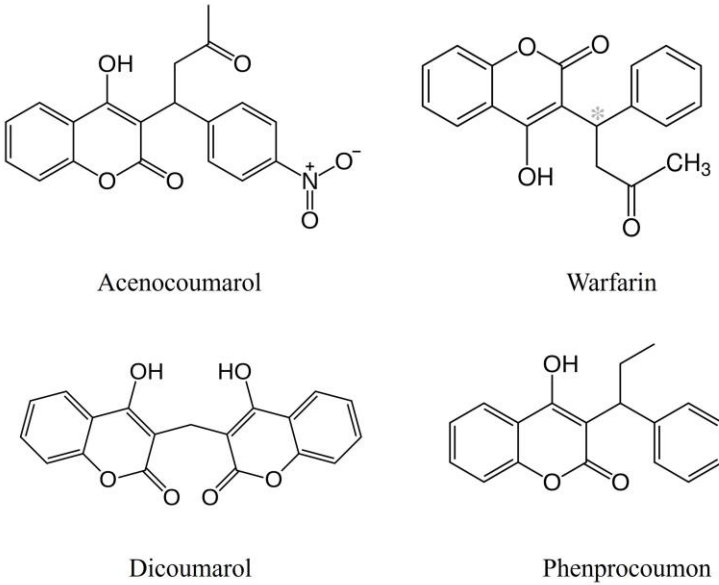
Antitrombotik Etki

Tromboz, insan sağlığı ve yaşamı için ciddi bir risk oluşturmaktadır. Günümüzde klinik uygulamada sık karşılaşılan sorunların çoğu trombozla ilgilidir. Miyokard enfarktüsü ve inmede altta yatan nihai patofizyolojik süreç trombogenez, yani trombüs oluşumudur. Atriyal fibrilasyon ve kalp yetmezliğı gibi yaygın kardiyovasküler bozukluklar da trombogenez ile ilişkilidir (Blann vd., 2002). Kardiyovasküler hastalıkların lezyonları ve şiddeti de atriyal fibrilasyon oluşumu ile ilişkilidir. Bu iki hastalık arasında güçlü bir korelasyon olduğu bildirilmiş olup ortak risk faktörleri mevcuttur. (Liang ve Wang, 2021).

Koroner kalp hastalığı, hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerde önde gelen ölüm nedenidir ve son yıllarda bu hastalıktan muzdarip insanların ölüm oranı %27,3'ten %31,4'e yükselmiştir (WHO, 2018). Birçok çalışma, Koroner kalp hastalarının akut miyokard enfarktüsünü takiben atriyal fibrilasyon geliştirme eğiliminde olduğunu göstermiştir (Romanov vd., 2018). Antitrombotik ilaçlar (antiplateletler ve antikoagülanlar) esas olarak tromboz ve onun neden olduğu hastalıkların önlenmesi ve tedavisinde temel dayanak noktalarıdır (Mackman vd., 2020). Antitrombotik ilaçlar trombotik bozuklukların başlangıcını ve ilerlemesini önleyebildiğinden, trombotik hastalıkların yönetiminde önemli bir rol oynarlar. Kumarinler, trombosit agregasyon inhibisyonu da dahil olmak üzere çeşitli farmakolojik aktivitelere sahip bir polifenolik bileşik ailesidir (Fan ve Watanabe, 2022). Doğal ve sentetik kumarinlerin antitrombotik etkiye, özellikle antikoagülasyona ve antiplatelet agregasyonuna sahip olduğu gösterilmiştir (Kalyoncu, 2004; Gao vd., 2021). Acenocoumarol, dicoumarol, warfarin ve

phenprocoumon (FDA) onaylı kumarin bazlı antikoagölan ilaçlar olup Şekil 3'te verilmiştir (Sharma vd., 2024). Özellikle, warfarin, fenprocoumon ve klorikromen gibi kumarin bazlı ilaçlar trombozun klinik tedavisinde tedavisinde uzun süredir kullanılmaktadır. Bu ilaçlar kan pıhtılaşması riskini ortadan kaldırır veya azaltır. Ayrıca kan pıhtılarını parçalayarak tedavi edebilirler (Ramsis vd., 2023). Örneğin, warfarin K Vitamini redüktaz enzimini bloke ederek pıhtılaşma mekanizmasını bozar (Garg vd., 2020).

Kumarin içeren bu ilaçlar, klinik olarak protez kalp kapakçığı veya atriyal fibrilasyonu olan hastalarda uzun süreli venöz tromboembolizm tedavisi veya sistemik emboli veya inmenin önlenmesi gibi farklı endikasyonlar için reçete edilmektedir (Kraimi vd., 2021).



Şekil 3: Kumarin bazlı Gıda ve İlaç İdaresi onaylı antikoagölan ilaçlar (Sharma vd., 2024).

Kumarinler, trombosit agregasyon inhibisyonu da dahil olmak üzere çeşitli farmakolojik aktivitelere sahip bir polifenolik bileşik ailesidir (Fan ve Watanabe, 2022).

Dicoumarol, bitki ve mantar kökenli doğal antikoagölan ve kumarinin bir türevidir. Dicoumarol, K vitamininin etkisini inhibe ederek antikoagölan özellikler gösterir. Dicoumarolun keşfi, modern antikoagölan ilaçların geliştirilmesine yol açmıştır (Garg vd., 2020). 4-Hidroksikumarin, kumarin öncülünden elde edilen önemli bir mantar metabolitidir ve dicoumarolün daha fazla fermentatif üretimine yol açar (Costa Tavares ve de Oliveira, 2016). 4-Hidroksikumarin türevidir olan warfarin, agregasyonlarını inhibe etmek için proteinlerle etkileşime girebilir ve kanın antikoagölanı olarak

kullanılır. 4-Hidroksikumarinler ayrıca antikoagülan ve K vitamini antagonistleridir (Ramsis vd., 2023). Yeni, güçlü ve güvenli antiplatelet ajanların ve antikoagülanların geliştirilmesine yönelik ilgi giderek artmaktadır.

Anti-HIV Etki

İnsan bağışıklık yetmezliği virüsü (HIV) vücudun bağışıklık sistemine, özellikle de beyaz kan hücrelerine saldıran bir enfeksiyondur. Bu enfeksiyonun sonucu olarak ortaya çıkan bağışıklık fonksiyonlarının ciddi şekilde baskılanmasına yol açan edinilmiş immün yetmezlik sendromu (AIDS), dünya çapında büyük bir sağlık tehdididir. HIV beyaz kan hücrelerini yok ederek kişinin tüberküloz ve mantar enfeksiyonları gibi fırsatçı enfeksiyonlara, ağır bakteriyel enfeksiyonlara ve bazı kanserlere karşı bağışıklığını zayıflatır (WHO, 2024). Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) tahminlerine göre şu anda dünya genelinde yaklaşık 38 milyon kişi HIV ile yaşamakta ve her yıl yaklaşık 2 milyon yeni vaka ortaya çıkmaktadır (WHO, 2020). Bitki kaynaklı bileşikler yapısal çeşitliliğe sahiptir. Bunlar arasında kumarin türevleri, çeşitli proteinler, enzimler ve reseptörler ile hidrojen bağları, şelasyon, hidrofobik etkileşimler ve Van der Waals kuvvetleri gibi çeşitli kovalent olmayan etkileşimler oluşturabilir. Bu nedenle, kumarin türevleri HIV proteaz, ters transkriptaz ve integrazın inhibisyonu gibi geleneksel hedeflerin yanı sıra virüs-konak hücre bağlanması, hücre zarı füzyonu, entegrasyon, birleşme dahil olmak üzere HIV replikasyon döngüsündeki farklı aşamaları inhibe etme potansiyeline sahiptir (Brahmachari vd., 2014; Garg vd., 2020).

Anti-HIV ajanları HIV/AIDS tedavisi için kritik öneme sahiptir, ancak viral mutantların oluşumu ve anti-HIV ajanlarının ciddi yan etkileri HIV enfeksiyonunun tedavisinde ciddi engeller oluşturmakta ve yeni doğal kaynaklı anti-HIV ajanlarının geliştirilmesine acil ihtiyaç duyulmaktadır (Xu vd., 2021). Doğal bir kumarin olan Calanolides ((+)-calanolide-A) *Calophyllum* cinsinden izole edilen, güçlü anti-HIV aktivitesine sahip bir bileşiktir (Kostova, 2005).

Antibakteriyel ve Antiviral Etki

Günümüzde patojen bakterilerin sık kullanılan ilaçlara ve antibiyotiklere karşı direnç paternleri dünya çapında artan morbidite ve mortalite ile halk sağlığını tehdit eden bir olay haline gelmiştir. Patojen bakteri suşlarının daha önce sık kullanılmayan ilaçlara/antibiyotiklere karşı direnç kazanarak sürekli genetik gelişim göstermesi nedeniyle her yeni nesil antibiyotikle veya yeni sunulan ilaçlarla birlikte yeni dirençli bakteriler gelişmektedir. Her yıl yaklaşık 17 milyon insan bulaşıcı hastalıklardan ölmekte ve her yaş grubundan yaklaşık 50.000 kişi bu hastalıklardan etkilenmektedir (Holmes vd., 2017; Sahoo vd., 2021). Sonuç olarak, dirençli bakterilerin geniş spektrumuna karşı daha yeni potansiyel ilaç adaylarının

geliştirilmesi gerekmektedir. Nitekim, fitokimyasal kumarin ve türevlerinin güçlü antibakteriyel aktivitelere sahip olduğu bildirilmiştir. Yeni antibakteriyel ajanların geliştirilmesi için daha çok kumarinin C-3 ve C-4 pozisyonlarındaki süstituentleri tercih edilmektedir. Novobiocin, chlorobiocin ve minocoumarin ticari olarak önerilen antibakteriyel ilaçlardır (Kasperkiewicz vd., 2020; Sahoo vd., 2021). Bununla birlikte, son yıllarda bitkisel kaynaklardan izole edilen kumarin bileşiklerinin antibakteriyel etkileri sıklıkla araştırılmaktadır. Umbelliferone, Rutaceae ve Apiaceae (Umbelliferae) familyaları içinde yaygın olarak dağılır. Umbelliferone, güneş koruyucu madde olarak kullanılan floresan bir bileşiktir ve bruselloza karşı antibiyotik özelliklere sahiptir (Mazimba, 2017). Esculetin ayrıca bakteriyostatik ve antifungal özelliklere sahipken, dafnoretin ve 3-phenylcoumarins hepatit B virüsüne karşı antiviral ve anti-HIV özelliklere sahiptir (Li vd., 2022; Ye vd., 2023).

Antidepresan Etki

Kumarinler ve türevleri farklı yapılarda bileşikler olup şizofreni, depresyon ve anksiyete gibi ruhsal sağlık sorunlarının tedavisinde kullanılmaktadır (Akwu vd., 2023). Skopoletin, umbelliferon ve 7-hidroksikumarin bileşiklerinin antidepresan etkileri olduğu bildirilmiştir (Nabeel vd., 2021; Heghes vd., 2022; Sinha vd., 2022). Günümüzde pek çok insan majör depresif bozuklukla başetmek durumundadır. Dünya Sağlık Örgütü, yetişkinlerin %5'inin ve 60 yaş üstü yetişkinlerin %5.7'si dahil olmak üzere nüfusun %3.8'inin depresyonda olduğunu tahmin etmektedir. Dünyada yaklaşık 280 milyon kişinin depresyon hastası olduğu düşünülmektedir (WHO, 2023). Mevcut antidepresan ilaçların maliyetinin yüksek olması, etki gücünü az olması ve yan etkileri gibi dezavantajları araştırmacıları antidepresan özelliklere sahip bitkileri araştırmaya yönlendirmiştir (Pathak vd., 2016; Kenda vd., 2022). Kumarin ve türevleri antidepresan potansiyeli ile dikkat çekmektedir (Wang vd., 2019). Akwu ve arkadaşları (2023), kumarin ve türevlerinin antidepresan özelliğini araştıran meta analiz çalışmalarında, konuyla ilgili 46 makale incelemişlerdir. Çalışma sonucunda antidepresan etkileri en çok incelenen kumarinlerin skopoletin, psoraleni 7-hidroksikumarin, meranszin hidrat, ostrol ve eskuletin olduğunu bildirmişlerdir. Çalışmalar sonucunda kumarin ve türevlerinin monoamin oksidaz-B inhibisyonu sağlayarak antidepresan etki gösterdiğini vurgulamışlardır. Bağırsak mikrobiyotası, beyin ve depresyon arasında bir bağlantı olduğunu ve meranzin hidrat bileşiğinin gastrointestinal sistemi düzenleyerek antidepresan bir aktivite gösterdiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar çalışmaların sınırlı olduğunu ve güvenli doz aralığının henüz tam olarak belirlenemediğini bildirmişlerdir (Akwu vd., 2023). Wang ve arkadaşları (2021), fareler üzerinde yapmış oldukları çalışmada, sentezlemiş oldukları aktivite gösteren kumarin türevlerinin fare beyinlerindeki 5-hidroksitriptamin seviyesi üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir.

Farmakolojik deneyler sonrası çoğu kumarin türevinin antidepresan aktivite sergilediğinin belirtmişlerdir. En yüksek aktivite gösteren bileşiği -(2-(4-(4-florobenzil) piperazin-1-il)-2-oksoetoksi)-2H-kromen-2-on (6i) olduğunu vurgulamışlardır. Fare beyinlerindeki 5-hidroksitriptamin seviyelerinin ölçümü, kumarin türevlerinin antidepresan aktivitesinin artan 5-hidroksitriptamin seviyeleriyle aracılık edilebileceğini bildirmişlerdir (Wang vd., 2021).

Antikanserojen Etki

Kanser, dünyada en yüksek morbidite ve mortalite oranına sahip hastalıklardan biri olup insan sağlığı için en büyük tehditlerden biridir (Gangopadhyay, 2023). Günümüze kadar kanser tedavisinde kullanmak üzere birçok ilaç geliştirilmiştir. Malign lenfoma tedavisi için klormetin keşfinden bu yana, alkileyici ajanlar (Ralhan & Kaur, 2007; Tang vd., 2010; Kapuriya vd., 2019), platin kompleksleri (Zhou vd., 2009; Zhou vd., 2010), porfirin ilaçlar (Yu vd., 2008) ve azol ajanları (Liang vd., 2021; Wang ve Zhou, 2011) gibi birçok ilaç bunlara örnek verilebilir. Klinik ilaçların çoğu yüksek maliyete, zayıf tedavi edici etkiye, yüksek toksisiteye ve düşük seçiciliğe sahiptir. Kemoterapinin asıl dezavantajı, organizmanın sağlıklı hücreleri için de toksisite oluşturmastır. Buna bağlı olarak yorgunluk, saç dökülmesi, anemi, kolay morarma ve kanama gibi ciddi yan etkiler ortaya çıkmaktadır (Prakash vd., 2013; Gangopadhyay, 2021). Bu nedenle, hastaların acısını en aza indirmek ve günümüzün pahalı tedavilerinin maliyetlerini düşürmek amacıyla kanser tedavileri için yeni stratejiler aramak büyük önem taşımaktadır. Bitkiler ve bitki ürünleri, önemli antikanser aktivitelerinden dolayı giderek daha fazla dikkat çekmektedir (Gangopadhyay & ark, 2022). Biyolojik olarak aktif doğal ürünler arasında, doğal kumarinler, bitki dünyasında geniş dağılımları ve antikanser de dahil olmak üzere önemli biyolojik aktiviteleri nedeniyle bilim insanlarının ilgisini çekmektedir (Peng vd., 2013). Gangopadhyay (2023), kumarinlerin antikanser özelliklerini araştırdığı makalesinde literatür doğrultusunda 135 yeni doğal kumarinin antikanser özelliklerini araştırmıştır. Bitki kaynaklı kumarinlerin, çeşitli moleküler mekanizmalar yoluyla farklı kanser hücrelerinin büyümesini, çoğalmasını ve metastazını inhibe edebildiği ileri sürmüştür. Karatuğ Kaçar ve arkadaşları (2020), bir kumarin bileşiği olan eskületin için geliştirmiş oldukları nano eskületin formülasyonunun, normal beta hücrelerinden daha fazla insülin salgılayan insülinoma INS-1 hücrelerine karşı tedavi edici özellikler taşıdığını belirtmişlerdir. Polilaktitko-glikolit nano-misel formülasyonu in vitro hücre canlılığını serbest eskületinden daha etkili bir şekilde azalttığını bildirmişlerdir. Serbest eskületin de in vitro koşullarda hücre canlılığını azaltmış olsa da nano-formülasyonların, gelişmiş geçirgenlik ve retansiyon etkisi sayesinde in vivo koşullarda üstün etkinlik gösterdiği bilinmektedir. Bu nedenle, eskületinin nano-formülasyonunun, in vivo koşullarda serbest eskületine göre daha etkili

olduğu düşünülmektedir. Kumarin ve türevlerinin antikanser aktivitesi üzerine yapılan çalışmalar, bu bileşiklerin etki mekanizmasının genellikle kaspaz bağımlı apoptoz olduğunu bildirmiştir (Küpelı-Akkol vd., 2020).

Antidiyabetik Etki

Diabetes mellitus (DM), glikoz homeostazındaki dengesizlikle karakterize edilen kronik bir metabolik hastalıktır ve bu durum, kandaki glikoz seviyesinin artmasına yol açar. Son yıllarda, diyabetin görülme sıklığı dünya genelinde keskin bir şekilde artmış olup güçlü antidiyabetik aktiviteye sahip küçük moleküllerin incelenmesi, en ilgi çekici araştırma alanlarından biri haline gelmiştir (Basappa vd., 2020; Ohkuma vd., 2021). Kumarin ve türevlerinin diyabetik nefropati ve kardiyovasküler hastalık gibi diyabet komplikasyonlarının tedavisinde etkili olduğunu savunan pek çok çalışma bulunmaktadır. Wang ve arkadaşları (2013), *Urtica dentata* bitkisinden izole ettikleri kumarinlerin Tip-1 diyabet üzerine etkisini araştırdıkları çalışmalarında, obez olmayan diyabetik fareleri dört gruba ayırmışlardır. Farelere düşük, orta ve yüksek doz kumarini dört hafta boyunca verdikten sonra 8 fareyi rastgele seçerek intraperitoneal glikoz tolerans testi yapmışlardır. Kumarin ile beslenen farelerin insülinin önemli ölçüde baskılandığını, pankreatik adacık sayısının arttığını, diyabet gelişiminin azaldığını bildirmişlerdir. Kumarinlerin, toll-benzeri reseptör (TLR4) sinyal yollarını baskılayarak diyabetik farelerde otoimmün diyabet gelişimini önlediğini vurgulamışlardır (Wang vd., 2013). *Umbelliferon Citrus aurantium* ve *Aegle marmelos Correa* bitkilerinden kumarin ekstraksiyonu ve saflaştırılması için birincil kaynak olarak kullanılmaktadır (Wu vd., 2020). Streptozotosin (STZ) ile indüklenen diyabetik sıçanlarda, 30 mg/kg oral umbelliferon tedavisinin, açlık kan şekeri ve glikolize hemoglobin A1c (HbA1c) seviyelerinde düşüşe neden olduğunu bildirmişlerdir (Ramesh ve vd., 2006;2007). Pan ve arkadaşları (2022), çeşitli kumarin bileşiklerinden, 3-arilkumarin türevlerinin, antidiyabetik ilaç adayları ve ileri çalışmalar için umut vadeden moleküller olduğunu bildirmişlerdir. Bu türevler arasında, 5,7-dihidroksil ve 4'-OH yapılarında hidroksil gruplarına sahip bileşikler de anlamlı derecede α -glukozidaz inhibitör aktivitesi sergilemiştir Ayrıca, 3-arilkumarinler, İleri Glikasyon Son Ürünlerinin (AGEs) inhibitör aktivitesine sahip olduğu bulunmuştur Osthol, diyabetik sıçanlarda P2X3 ekspresyonuna karşı koyarak diyabetik bir komplikasyon olan DNP'nin (diyabetik nöropati) oluşumunu ve gelişimini yavaşlatmaktadır. Ayrıca, kumarin kalkan hibritleri insülin direnci üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir (Pan vd., 2022).

Anti-inflamatuar Etki

Kumarinler anti-inflamatuar ve düz kas gevşetici özelliklere sahiptir ve ödem tedavisi için kullanılabilirler. 5-hidroksikumarin veya vicinal dihidroksi kumarinler gibi hidroksil aromatik süstitüe türevlerin de güçlü anti-inflamatuar ajanlar olduğu bulunmuştur (Garg vd., 2020).

Kestane yapraklarında (*Aesculus hippocastanum*) bulunan bir kumarin olan esculetin, aglikon esculetin nedeniyle kılcal damarların geçirgenliğini azaltır ve direncini artırır; anti-inflamatuar ve flebotonik etkilere sahiptir. Bu bileşikler venöz tonusu iyileştirir (Sharifi-Rad vd., 2021).

Tatlı yoncanın (*Melilotus officinalis*) çiçeklerinden elde edilen esculetin, hayvan modelleri kullanılarak in vivo antiödematöz özellikler göstermiştir. Bu özellikleri nedeniyle, flavonoidlerle birlikte esculetin, kronik venöz yetmezliğin tedavisinde ve profilaksisinde flebotonik bir yardımcı olarak önerilmektedir (Hsia vd., 2019).

Esculetin ayrıca prostaglandinlerin, tromboksanların ve lökotrienlerin sentezini ve astımlı, alerjik ve inflamatuvar reaksiyonlarda yer alan proinflamatuvar molekülleri inhibe eder (Liang vd., 2017).

SONUÇ

Son zamanlarda yapılan bilimsel araştırmalar, kumarinlerle ilişkili çok sayıda biyolojik aktiviteyi ortaya çıkarmıştır. Kumarin iskeletinin spesifik kimyasal yapısı çeşitli türevlerinin oluşumuna izin verir. Kumarinler çok çeşitli biyolojik aktiviteler ve geniş bir terapötik profil sunarlar. Çeşitli farklı hedef proteinleri ve enzimleri inhibe edebilirler. Kumarinler ve türevleri anti-inflamatuar, antikoagülan, antioksidan, antitümör, antiviral, antidiyabetik, antidepresan, antibakteriyel, antikanser, antiviral, anti-HIV aktiviteler dahil olmak üzere çok çeşitli biyolojik özellikleri nedeniyle ayrıcalıklı yapılar olarak kabul edilmektedir. Kumarinlerin bu ilginç özellikleri 2H-kromen-2-on çekirdeğinin kimyasal özelliklerine bağlanabilir.

Günümüzde özellikle farklı etki mekanizmalarına sahip yeni antitrombotik ilaçlar oluşturmak için düşük toksisiteye sahip olan kumarin türevleri araştırılmaktadır. Doğal ya da sentez yoluyla oluşturulan kumarinler ve türevleri antikoagülan, anti-inflamatuar, antibakteriyel, antiviral, anti-HIV, antidiyabetik, antikanser, antidepresan, antioksidan ve immünomodülatör etkileri de dahil olmak üzere geniş kapsamlı biyoaktiviteleri nedeniyle fitokimyasıların başlıca ilgi alanlarından biri olmaya devam etmektedir.

REFERANSLAR

- Akwu, N. A., Lekhooa, M., Deqiang, D., & Aremu, A. O. (2023). Antidepressant effects of coumarins and their derivatives: A critical analysis of research advances. *European Journal of Pharmacology*, 175958.
- Al-Amiery, A. A., Al-Majedy, Y. K., Kadhum, A. A. H., & Mohamad, A. B. (2016a). Synthesis of new coumarins complemented by quantum chemical studies. *Research on Chemical Intermediates*, 42, 3905-3918.

- Al-Amiery, A. A., Al-Majedy, Y. K., Kadhum, A. A. H., & Mohamad, A. B. (2014). New coumarin derivative as an eco-friendly inhibitor of corrosion of mild steel in acid medium. *Molecules*, 20(1), 366-383.
- Al-Amiery, A. A., Kadhum, A. A. H., & Mohamad, A. B. (2012). Antifungal activities of new coumarins. *Molecules*, 17(5), 5713-5723.
- Al-Amiery, A. A., Kadhum, A. A. H., Mohamad, A. B., Musa, A. Y., & Li, C. J. (2013). Electrochemical study on newly synthesized chlorocurcumin as an inhibitor for mild steel corrosion in hydrochloric acid. *Materials*, 6(12), 5466-5477.
- Al-Amiery, A. A., Musa, A. Y., Kadhum, A. A. H., & Mohamad, A. B. (2011). The use of umbelliferone in the synthesis of new heterocyclic compounds. *Molecules*, 16(8), 6833-6843.
- Al-Amiery, A., Al-Majedy, Y., Al-Duhaidahawi, D., Kadhum, A. A., & Mohamad, A. B. (2016b). Green antioxidants: synthesis and scavenging activity of coumarin-thiadiazoles as potential antioxidants complemented by molecular modeling studies. *Free Radicals and Antioxidants*, 6(2), 173-177.
- Al-Ayed, A. S. (2011). Synthesis, spectroscopy and electrochemistry of new 3-(5-aryl-4, 5-dihydro-1H-pyrazol-3-yl)-4-hydroxy-2H-chromene-2-one 4, 5 as a novel class of potential antibacterial and antioxidant derivatives. *International Journal of Organic Chemistry*, 1(03), 87-96.
- Al-Azawi, K. F., Al-Baghdadi, S. B., Mohamed, A. Z., Al-Amiery, A. A., Abed, T. K., Mohammed, S. A., ... & Mohamad, A. B. (2016). Synthesis, inhibition effects and quantum chemical studies of a novel coumarin derivative on the corrosion of mild steel in a hydrochloric acid solution. *Chemistry Central Journal*, 10, 1-9.
- Al-Majedy, Y. K., Al-Amiery, A. A., Kadhum, A. A. H., & Mohamad, A. B. (2016). Efficient Catalyst One-Pot Synthesis of 7-(Aryl)-10, 10-dimethyl-10, 11-dihydrochromeno [4, 3-b] chromene-6, 8 (7H, 9H)-dione Derivatives Complemented by Antibacterial Activity. *BioMedical Research International*, 2016(1), 5891703.
- Basappa VC, Kameshwar VH, Kumara K, et al. Design and synthesis of coumarin-triazole hybrids: biocompatible anti-diabetic agents, in silico molecular docking and ADMEScreening. *Heliyon* 2020;6:e05290.
- Blahová, J., & Svobodová, Z. (2012). Assessment of coumarin levels in ground cinnamon available in the Czech retail market. *The Scientific World Journal*, 2012(1), 263851.
- Blann, A. D., Landray, M. J., & Lip, G. Y. (2002). An overview of antithrombotic therapy. *Bmj*, 325(7367), 762-765.
- Carneiro, A., Matos, M. J., Uriarte, E., & Santana, L. (2021). Trending topics on coumarin and its derivatives in 2020. *Molecules*, 26(2), 501.
- Carneiro, A., Matos, M. J., Uriarte, E., & Santana, L. (2021). Trending topics on coumarin and its derivatives in 2020. *Molecules*, 26(2), 501.
- Costa, T. M., Tavares, L. B. B., & de Oliveira, D. (2016). Fungi as a source of natural coumarins production. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100, 6571-6584.
- Detsi, A., Kontogiorgis, C., & Hadjipavlou-Litina, D. (2017). Coumarin derivatives: an updated patent review (2015-2016). *Expert Opinion on Therapeutic Patents*, 27(11), 1201-1226.

- Fan, J., & Watanabe, T. (2022). Atherosclerosis: Known and unknown. *Pathology International*, 72(3), 151-160.
- Filipsky, T., Riha, M., Macakova, K., Anzenbacherová, E., Karlickova, J., & Mladenka, P. (2015). Antioxidant effects of coumarins include direct radical scavenging, metal chelation and inhibition of ROS-producing enzymes. *Current Topics in Medicinal Chemistry*, 15(5), 415-431.
- Fylaktakidou, K. C., Hadjipavlou-Litina, D. J., Litinas, K. E., & Nicolaides, D. N. (2004). Natural and synthetic coumarin derivatives with anti-inflammatory/antioxidant activities. *Current Pharmaceutical Design*, 10(30), 3813-3833.
- Gangopadhyay, A. (2021). Natural flavans and (Iso) flavanones with anticancer activity: a review. *Current Organic Chemistry*, 25(9), 1028-1046.
- Gangopadhyay, A. (2023). Plant-derived natural coumarins with anticancer potentials: Future and challenges. *Journal of Herbal Medicine*, 100797.
- Gangopadhyay, A., Chakraborty, S., Jash, S. K., & Gorai, D. (2022). Cytotoxicity of natural flavones and flavonols against different cancer cells. *Journal of the Iranian Chemical Society*, 19(5), 1547-1573.
- Gao, L., Wang, F., Chen, Y., Li, F., Han, B., & Liu, D. (2021). The antithrombotic activity of natural and synthetic coumarins. *Fitoterapia*, 154, 104947.
- Garg, S. S., Gupta, J., Sharma, S., & Sahu, D. (2020). An insight into the therapeutic applications of coumarin compounds and their mechanisms of action. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 152, 105424.
- Hassanein, E. H., Sayed, A. M., Hussein, O. E., & Mahmoud, A. M. (2020). Coumarins as modulators of the Keap1/Nrf2/ARE signaling pathway. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2020(1), 1675957.
- Heghes, S. C., Vostinaru, O., Mogosan, C., Miere, D., Iuga, C. A., & Filip, L. (2022). Safety profile of nutraceuticals rich in coumarins: An update. *FRONTIERS in Pharmacology*, 13, 803338.
- Hsia, C. W., Lin, K. C., Lee, T. Y., Hsia, C. H., Chou, D. S., Jayakumar, T., ... & Sheu, J. R. (2019). Esculetin, a coumarin derivative, prevents thrombosis: inhibitory signaling on PLC γ 2–PKC–AKT activation in human platelets. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(11), 2731.
- Holmes, K. K., Bertozzi, S., Bloom, B. R., Jha, P., Gelband, H., DeMaria, L. M., & Horton, S. (2017). Major infectious diseases: key messages from disease control priorities. *Major Infectious Diseases*.
- Iranshahi, M., Askari, M., Sahebkar, A., & Hadjipavlou, L. D. (2009). Evaluation of antioxidant, anti-inflammatory and lipoxygenase inhibitory activities of the prenylated coumarin umbelliprenin. *DARU*, 17(2), 99-103.
- Jigar, L. P. (2019). The Introduction of Coumarin. (1. Baskı). India: Blue Rose Publishers.
- Kalyoncu, N. İ. (2004). Antitrombotik İlaçlar: Antikoagülan İlaçlar, Antitrombotik (Antiplatelet) İlaçlar, Fibrinolitik (Trombolitik) İlaçlar. *Türkiye Klinikleri Pharmacology-Special Topics*, 2(4), 295-317.
- Kapuriya, N., Kakadiya, R., Dong, H., Kumar, A., Lee, P. C., Zhang, X., ... & Su, T. L. (2011). Design, synthesis, and biological evaluation of novel water-soluble N-mustards as potential anticancer agents. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 19(1), 471-485.

- Karatug Kacar, A., Bahadori, F., Kepekci Tekkeli, S. E., Topcu, G., & Bolkent, S. (2020). Investigation of cell death mechanism and activity of esculetin-loaded PLGA nanoparticles on insulinoma cells in vitro. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 72(4), 592-606.
- Kasperkiewicz, K., Ponczek, M. B., Owczarek, J., Guga, P., & Budzisz, E. (2020). Antagonists of vitamin K—popular coumarin drugs and new synthetic and natural coumarin derivatives. *Molecules*, 25(6), 1465.
- Kenda, M., Koćevar Glavač, N., Nagy, M., Sollner Dolenc, M., 2022. Medicinal plants used for anxiety, depression, or stress treatment: an update. *Molecules* 27, 6021.
- Kirsch, G., Abdelwahab, A. B., & Chaimbault, P. (2016). Natural and synthetic coumarins with effects on inflammation. *Molecules*, 21(10), 1322.
- Kostova, I. (2005). Synthetic and natural coumarins as cytotoxic agents. *Current Medicinal Chemistry-Anti-Cancer Agents*, 5(1), 29-46.
- Kostova, I., Bhatia, S., Grigorov, P., Balkansky, S., S Parmar, V., K Prasad, A., & Saso, L. (2011). Coumarins as antioxidants. *Current medicinal chemistry*, 18(25), 3929-3951.
- Kraimi, A., Belboukhari, N., Sekkoum, K., & Aboul-Enein, H. Y. (2021). Chiral anticoagulants drugs based on coumarin. *Aditum Journal of Clinical and Biomedical Research*, 2(1).
- Küpeli Akkol, E., Genç, Y., Karpuz, B., Sobarzo-Sánchez, E., & Capasso, R. (2020). Coumarins and coumarin-related compounds in pharmacotherapy of cancer. *Cancers*, 12(7), 1959.
- Li, Z., Kong, D., Liu, Y., & Li, M. (2022). Pharmacological perspectives and molecular mechanisms of coumarin derivatives against virus disease. *Genes & Diseases*, 9(1), 80-94.
- Liang, C., Ju, W., Pei, S., Tang, Y., & Xiao, Y. (2017). Pharmacological activities and synthesis of esculetin and its derivatives: a mini-review. *Molecules*, 22(3), 387.
- Liang, F., & Wang, Y. (2021). Coronary heart disease and atrial fibrillation: a vicious cycle. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 320(1), H1-H12.
- Liang, T., Sun, X., Li, W., Hou, G., & Gao, F. (2021). 1, 2, 3-Triazole-containing compounds as anti-lung cancer agents: Current developments, mechanisms of action, and structure–activity relationship. *Frontiers in Pharmacology*, 12, 661173.
- Lončar, M., Jakovljević, M., Šubarić, D., Pavlić, M., Buzjak Služek, V., Cindrić, I., & Molnar, M. (2020). Coumarins in food and methods of their determination. *Foods*, 9(5), 645.
- Luo, K., Jahufer, M. Z. Z., Wu, F., Di, H., Zhang, D., Meng, X., ... & Wang, Y. (2016). Genotypic variation in a breeding population of yellow sweet clover (*Melilotus officinalis*). *Frontiers in Plant Science*, 7, 972.
- Mackman, N., Bergmeier, W., Stouffer, G. A., & Weitz, J. I. (2020). Therapeutic strategies for thrombosis: new targets and approaches. *Nature Reviews Drug Discovery*, 19(5), 333-352.
- Mazimba, O. (2017). Umbelliferone: Sources, chemistry and bioactivities review. *Bulletin of Faculty of Pharmacy, Cairo University*, 55(2), 223-232.

- Mishra, S., Pandey, A., & Manvati, S. (2020). Coumarin: An emerging antiviral agent. *Heliyon*, 6(1).
- Nabeel, Z., Jaber, Q.A.-H., Abdul-Rida, N.A., 2021. Novel benzo [f] coumarin derivatives as probable acetylcholinesterase inhibitors: synthesis, in vitro, and in silico studies for evaluation of their anti-AChE activity. *Indonesian Journal of Chemistry*. 22, 35–46.
- Ohkuma, T., Chalmers, J., Cooper, M., Hamet, P., Harrap, S., Marre, M., ... & Woodward, M. (2021). The comparative effects of intensive glucose lowering in diabetes patients aged below or above 65 years: Results from the ADVANCE trial. *Diabetes, Obesity and Metabolism*, 23(6), 1292-1300.
- Pan, Y., Liu, T., Wang, X., & Sun, J. (2022). Research progress of coumarins and their derivatives in the treatment of diabetes. *Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry*, 37(1), 616-628.
- Parcheta, M., Świsłocka, R., Orzechowska, S., Akimowicz, M., Choińska, R., & Lewandowski, W. (2021). Recent developments in effective antioxidants: The structure and antioxidant properties. *Materials*, 14(8), 1984.
- Parvej, H., Begum, S., Dalui, R., Paul, S., Mondal, B., Sardar, S., ... & Halder, U. C. (2022). Coumarin derivatives inhibit the aggregation of β -lactoglobulin. *RSC Advances*, 12(27), 17020-17028.
- Pathak, A., K Srivastava, A., K Singour, P., & Gouda, P. (2016). Synthetic and natural monoamine oxidase inhibitors as potential lead compounds for effective therapeutics. *Central Nervous System Agents in Medicinal Chemistry (Formerly Current Medicinal Chemistry-Central Nervous System Agents)*, 16(2), 81-97.
- Peng, X. M., LV Damu, G., & He Zhou, C. (2013). Current developments of coumarin compounds in medicinal chemistry. *Current Pharmaceutical Design*, 19(21), 3884-3930.
- Poonam, V., Kumar, G., S Reddy L, C., Jain, R., K Sharma, S., K Prasad, A., & S Parmar, V. (2011). Chemical constituents of the genus *Prunus* and their medicinal properties. *Current Medicinal Chemistry*, 18(25), 3758-3824.
- Prakash, O. M., Kumar, A., & Kumar, P. (2013). Anticancer potential of plants and natural products. *Am J Pharmacol Sci*, 1(6), 104-115.
- Ralhan, R., & Kaur, J. (2007). Alkylating agents and cancer therapy. *Expert Opinion on Therapeutic Patents*, 17(9), 1061-1075.
- Ramesh, B., & Pugalendi, K. V. (2006). Antihyperglycemic effect of umbelliferone in streptozotocin-diabetic rats. *Journal of medicinal food*, 9(4), 562-566.
- Ramesh, B., Viswanathan, P., & Pugalendi, K. V. (2007). Protective effect of Umbelliferone on membranous fatty acid composition in streptozotocin-induced diabetic rats. *European Journal of Ppharmacology*, 566(1-3), 231-239.
- Ramsis, T. M., Ebrahim, M. A., & Fayed, E. A. (2023). Synthetic coumarin derivatives with anticoagulation and antiplatelet aggregation inhibitory effects. *Medicinal Chemistry Research*, 32(11), 2269-2278.
- Rawat, A., & Reddy, A. V. B. (2022). Recent advances on anticancer activity of coumarin derivatives. *European Journal of Medicinal Chemistry Reports*, 5, 100038.
- Romanov, A., Martinek, M., Pürerfellner, H., Chen, S., De Melis, M., Grazhdankin, I., ... & Pokushalov, E. (2018). Incidence of atrial fibrillation detected by

- continuous rhythm monitoring after acute myocardial infarction in patients with preserved left ventricular ejection fraction: results of the ARREST study. *EP Europace*, 20(2), 263-270.
- Sahoo, C. R., Sahoo, J., Mahapatra, M., Lenka, D., Sahu, P. K., Dehury, B., ... & Paidasetty, S. K. (2021). Coumarin derivatives as promising antibacterial agent (s). *Arabian Journal of Chemistry*, 14(2), 102922.
- Sharifi-Rad, J., Cruz-Martins, N., López-Jornet, P., Lopez, E. P. F., Harun, N., Yeskaliyeva, B., ... & Cho, W. C. (2021). Natural coumarins: exploring the pharmacological complexity and underlying molecular mechanisms. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2021(1), 6492346.
- Sharma, V., Sharma, A., Wadje, B. N., & Bharate, S. B. (2024). Benzopyrone, a privileged scaffold in drug discovery: An overview of FDA-approved drugs and clinical candidates. *Medicinal Research Reviews*.
- Sinha, S., Singh, K., Ved, A., Hasan, S.M., Mujeeb, S., 2022. Therapeutic journey and recent advances in the synthesis of coumarin derivatives. *Mini Rev. Med. Chem.* 22, 1314–1330.
- Stefanachi, A., Leonetti, F., Pisani, L., Catto, M., & Carotti, A. (2018). Coumarin: A natural, privileged and versatile scaffold for bioactive compounds. *Molecules*, 23(2), 250.
- Tang, Y. D., Geng, R. X., & Zhou, C. H. (2010). N2, N2, N5, N5-Tetrakis (2-chloroethyl)-3, 4-dimethylthiophene-2, 5-dicarboxamide. *Acta Crystallographica Section E: Structure Reports Online*, 66(1), o100-o100.
- Tava, A. (2001). Coumarin-containing grass: volatiles from sweet vernalgrass (*Anthoxanthum odoratum* L.). *Journal of Essential Oil Research*, 13(5), 367-370.
- Todorov, L., Saso, L., & Kostova, I. (2023). Antioxidant activity of coumarins and their metal complexes. *Pharmaceuticals*, 16(5), 651.
- Torres, F. C., Brucker, N., Fernandes Andrade, S., Fabio Kawano, D., Cristina Garcia, S., Lino von Poser, G., & Lucia Eifler-Lima, V. (2014). New insights into the chemistry and antioxidant activity of coumarins. *Current Topics in Medicinal Chemistry*, 14(22), 2600-2623.
- Venugopala, K. N., Rashmi, V., & Odhav, B. (2013). Review on natural coumarin lead compounds for their pharmacological activity. *BioMed Research International*, 2013(1), 963248.
- Wang, C., Lin, H., Yang, N., Wang, H., Zhao, Y., Li, P., Liu, J., Wang, F., 2019. Effects of platycodins folium on depression in mice based on a UPLC-Q/TOF-MS serum assay and hippocampus metabolomics. *Molecules*, 24, 1712.
- Wang, J., Lu, J., Lan, Y., Zhou, H., Li, W., & Xiang, M. (2013). Total coumarins from *Urtica dentata* Hand prevent murine autoimmune diabetes via suppression of the TLR4-signaling pathways. *Journal of ethnopharmacology*, 146(1), 379-392.
- Wang, X., Zhou, H., Wang, X., Lei, K., & Wang, S. (2021). Design, synthesis, and in vivo and in silico evaluation of coumarin derivatives with potential antidepressant effects. *Molecules*, 26(18), 5556.
- Wang, Y., & Zhou, C. H. (2011). Recent advances in the researches of triazole compounds as medicinal drugs. *Scientia Sinica Chemica*, 41, 1429-1456.

- Wang, Y., Shi, F., Lu, Z., Zhang, M., Zhang, Z., Jia, F., ... & Shi, S. (2023). Seven new 3, 4-dihydro-furanocoumarin derivatives from *Angelica dahurica*. *Chinese Herbal Medicines*, 15(3), 457-462.
- WHO, World Health Organization, (2020). People (all ages) living with HIV Estimates by WHO region. <https://apps.who.int/gho/data/view.main.22100WHO?lang=en> (Erişim tarihi: 24 Aralık 2024)
- WHO, World Health Organization, (2023). Institute of Health Metrics and Evaluation. Global Health Data Exchange (GHDx). <https://vizhub.healthdata.org/gbd-results/> (Erişim tarihi: 20 Aralık 2024).
- WHO, World Health Organization, (2024). HIV, Overview https://www.who.int/health-topics/hiv-aids#tab=tab_1 (Erişim tarihi: 24 Aralık 2024)
- WHO, World Health Organization, S. (2018). Global health estimates 2016: deaths by cause, age, sex, by country and by region, 2000–2016. *Geneva: World Health Organization*, 1242-7.
- Wu, J., Huang, G., Li, Y., & Li, X. (2020). Flavonoids from *Aurantii Fructus Immaturus* and *Aurantii Fructus*: promising phytochemicals for the treatment of liver diseases. *Chinese Medicine*, 15, 1-18.
- Wu, L., Wang, X., Xu, W., Farzaneh, F., & Xu, R. (2009). The structure and pharmacological functions of coumarins and their derivatives. *Current Medicinal Chemistry*, 16(32), 4236-4260.
- Yang, Y., Tan, W., Zhang, J., Guo, Z., Jiang, A., & Li, Q. (2022). Novel coumarin-functionalized inulin derivatives: Chemical modification and antioxidant activity assessment. *Carbohydrate Research*, 518, 108597.
- Ye, Z., Zhao, T. S. Y., Li, S. B., Zhou, X. L., Luo, Q., Qin, J. K., ... & Ge, G. B. (2023). Synthesis and biological evaluation of esculetin derivatives as potential anti-HBV agents. *Medicinal Chemistry Research*, 32(5), 899-909.
- Zhou, C. H., Zhang, F. F., Gan, L. L., Zhang, Y. Y., & Geng, R. X. (2009). Research in supramolecular chemical drugs. *Sci China Ser B*, 39, 208-252.
- Zhou, C. H., Zhang, Y. Y., Yan, C. Y., Wan, K., Gan, L. L., & Shi, Y. (2010). Recent researches in metal supramolecular complexes as anticancer agents. *Anti-Cancer Agents in Medicinal Chemistry (Formerly Current Medicinal Chemistry-Anti-Cancer Agents)*, 10(5), 371-395.

Kaz Dağları ve Yakın Çevresinin Ciğerotları (Marchantiophyta) Biyçeşitliliği

Özcan ŞİMŞEK¹

1- Dr.Öğr.Üyesi.; Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Yenice MYO Ormancılık Bölümü.
ozcan.simsek@gmail.com ORCID No: 0000-0002-3210-7641

ÖZET

Biyolojik çeşitlilik ekosistemlerin sağlıklı işlemesi, doğal dengenin devamlılığının sağlanması ve insanların ekosistem hizmetlerinden sürdürülebilir faydalanması için olmazsa olmaz bir unsurdur. Bu sebeple biyolojik çeşitliliğin ve endemizmin yoğunlaştığı bölgelerin korunarak gelecek nesillere aktarılması hususunda tüm insanların sorumluluğu bulunmaktadır. Ülkemizin önemli biyolojik çeşitlilik noktalarından biri de Kaz Dağlarıdır. Kaz Dağları gerek barındırdığı flora ve fauna türleri gerekse endemik türlerinin çokluğu ile biyolojik zenginlik bakımından öne çıkan bir değerimizdir. Zengin bir tohumlu bitki florasına sahip olan Kaz Dağlarının ciğerotları florasının da zengin olması beklenen bir durumdur. Basit yapılı ve tohumuz bitkiler olan ciğerotları 400 milyon yıldan fazladır karasal yaşamın vazgeçilmez bileşenleri olmuşlardır. Gerçekleştirilen bu araştırmada “Kaz Dağlarında ciğerotlarının biyolojik çeşitliliği ne durumdadır?” sorusundan hareketle, alanda ve yakın çevresinde yapılmış olan araştırmalar irdelenmiştir. Gerçekleştirilen literatür taraması neticesinde Kaz Dağları ve yakın çevresinde ciğerotları florasına yönelik 4 araştırma yapıldığı ve bu araştırmalarda alandan toplamda 42 ciğerotu (Marchantophyta) ile 1 boynuzotu (Anthocerotophyta) taksonu bildirildiği tespit edilmiştir. Yapılan çalışma neticesinde Kaz Dağları ve yakın çevresinde çok daha kapsamlı ciğerotu florası araştırmalarının yapılmasına ihtiyaç olduğu ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler – Marchantiophyta, Ciğerotları, Biyolojik Çeşitlilik, Biyoçeşitlilik, Kaz Dağları.

GİRİŞ

Biyolojik Çeşitlilik

Ekosistemlerin sağlıklı bir şekilde işleyebilmesi, canlılığın doğal seyrinde sağlıklı bir şekilde devam edebilmesi, gezegenin doğal dengesinin korunması ve insanların sürdürülebilir faydalanmasının devamlılığı için biyolojik çeşitliliğin önemi yadsınamaz bir gerçektir. Biyolojik çeşitlilik kaybı ile ortaya çıkan sorunlar gezegenin işleyişi ve insan sağlığı açısından ciddi bir tehlike oluşturmaktadır.

Biyoçeşitlilik, kara, deniz ve iç su ekosistemleri gibi çeşitli kaynaklarda bulunan canlı organizmalar arasındaki farklılıkları ve bunların oluşturduğu ekolojik yapıları ifade eder. Bu kavram; türler içindeki, türler arasındaki ve türler ile ekosistemler arasındaki çeşitliliği kapsar. Başka bir deyişle, biyoçeşitlilik, belirli bir alandaki genlerin, türlerin, ekosistemlerin ve ekolojik olayların bütünü tanımlar. Ayrıca, biyolojik çeşitlilik genetik, tür, ekosistem ve ekolojik işlevlerde çeşitlilik olmak üzere dört ana hiyerarşik gruba ayrılmaktadır (Doğan, 2019).

Biyolojik çeşitlilik, büyükten küçüğe veya genelden özele şeklinde tariflenebilecek 3 kısım ve bu üç kısmı birbirine bağlayan dördüncü bir bileşenden oluşmaktadır (Doğan, 2019).

Genetik çeşitlilik, çoğunlukla türlerin içindeki gen farklılıklarını tanımlayan bir ifadedir. Bu çeşitlilik türü bir tür içindeki tüm genlerin toplamının oluşturduğu genetik bilginin ortalamasının değeridir. Bununla birlikte genetik çeşitlilik belli bir popülasyon, tür, alt tür, varyete veya ırk içindeki genetik farklılıkları ifade etmek için de kullanılmaktadır (Doğan, 2019).

Tür çeşitliliği, belirli bir bölgede bulunan farklı türlerin çeşitliliğini ve sayısını ifade eder (Doğan, 2019).

Ekosistem çeşitliliği, farklı ekosistem türlerini ve bunların işleyişini ifade eder. Ekosistem çeşitliliği, habitat ve tür çeşitliliğinin artmasını sağlayan bir etkidir. Ekosistem çeşitliliği, birbirinden farklı türlerin yaşayabilmesini sağlayan farklı tiplerde habitatlar, farklı ekolojik fonksiyonlar ve tüm bunların bir denge içinde varlığını sürdürmesini teminat altına alan klimaks canlı birliklerinin oluşmasını sağlar (Doğan, 2019).

Ekolojik süreç çeşitliliği ise bir ekosistemde, uzun evrimsel süreçler neticesinde ortaya çıkmış ve günümüzde de devam eden çeşitli olaylar ve etkileşimleri ifade eder. Ekolojik süreçlerden en çok bilinenleri av-avcı ilişkisi, karbon döngüsü, su döngüsü, üreme süreçleri, parazitlik, simbiyozluk, mutualizm gibi ekosistemlerde görülen çeşitli olaylardır (Doğan, 2019).

Doğal kaynaklar gerek dengeli bir ekolojik işleyiş gerekse insanoğlunun sağlıklı bir çevrede yaşaması ve doğadan sürdürülebilir faydalanma ile kaliteli bir yaşam sürmesi için vazgeçilmez unsurlardır. Doğal kaynakların en önemlileri arasında bitki ve hayvanlar gelmektedir. Zira ülkelerin biyolojik zenginliklerinden bahsedilirken genellikle kastedilen şey bitki ve hayvan türlerinin biyolojik çeşitliliğidir. Biyolojik çeşitliliğin önemli göstergelerinden biri de endemizm oranıdır. Çok sayıda endemik tür içeren ve yüksek endemizm oranına sahip alanlar genellikle hassas habitatlar olup mutlaka korunması gereken bölgelerdir. Bu canlıların neslinin tükenmesinin önlenmesi ve biyolojik çeşitliliğin korunması ekosistemdeki doğal dengenin işleyişi yönünden çok önemlidir. Ancak bu sayede ekolojik süreçlerin devamlılığı sağlanabilir, ekosistem hizmetlerinden sürdürülebilir yararlanma ve sağlıklı bir gezegende yaşama imkanı mümkün kılınabilir.

Buna karşılık özellikle sanayi devrimi ile birlikte gezegendeki biyolojik çeşitlilik ciddi bir tehdit altına girmiş ve artan bir ivme ile nesli tükenen türlerin sayısı artışa geçmiştir. Biyolojik çeşitliliği tehdit eden birçok faktör olmakla birlikte bunların büyük çoğunluğu insan kaynaklıdır. Biyoçeşitlilik kaybının nedenleri arasında yer alan canlıların doğal habitatlarının yok edilmesi, ekosistemlere yabancı istilacı türlerin girmesi, çevre kirliliği, tabii kaynakların aşırı ve kontrolsüz kullanılması gibi sebeplerle besin zinciri ve doğal döngülerin bozulması, küresel iklim değişikliği gibi etmenler biyolojik çeşitliliği tehdit eden en önemli unsurlardır.

Görüldüğü gibi tüm bu etmenlerin kökeninde insan faaliyetleri bulunmaktadır. Bu nedenle ekosistemlerin sağlıklı bir işleyişe sahip olması ve doğadan sürdürülebilir yararlanmanın teminat altına alınması için biyolojik çeşitliliği korumakta tüm insanlığa önemli bir sorumluluk düşmektedir.

Dünyada her noktada aynı oranda biyolojik çeşitlilik görülmesi mümkün değildir. Değişen ekolojik şartlarla birlikte bir alanda yaşayan canlı türleri de değişiklik gösterir. Bu sebeple kimi alanların biyolojik çeşitliliği oldukça kısıtlı iken kimi alanlarda ise yüksek bir biyoçeşitlilik oranı görülür. Bu tip yüksek biyoçeşitliliğe sahip alanların korunarak gelecek nesillere aktarılması sağlıklı bir gezegen için son derece önemlidir. Çünkü yüksek endemizm görülen ve biyoçeşitlilik bakımından zengin olan alanlar genellikle hassas ekosistemlerdir ve antropojenik etmenler ile ekolojik bozulmalardan kolayca etkilenebilmektedirler. Bu da beraberinde canlıların neslinin tükenmesi ve ekosistemin işleyişinin sekteye uğraması sorunlarını doğurmaktadır.

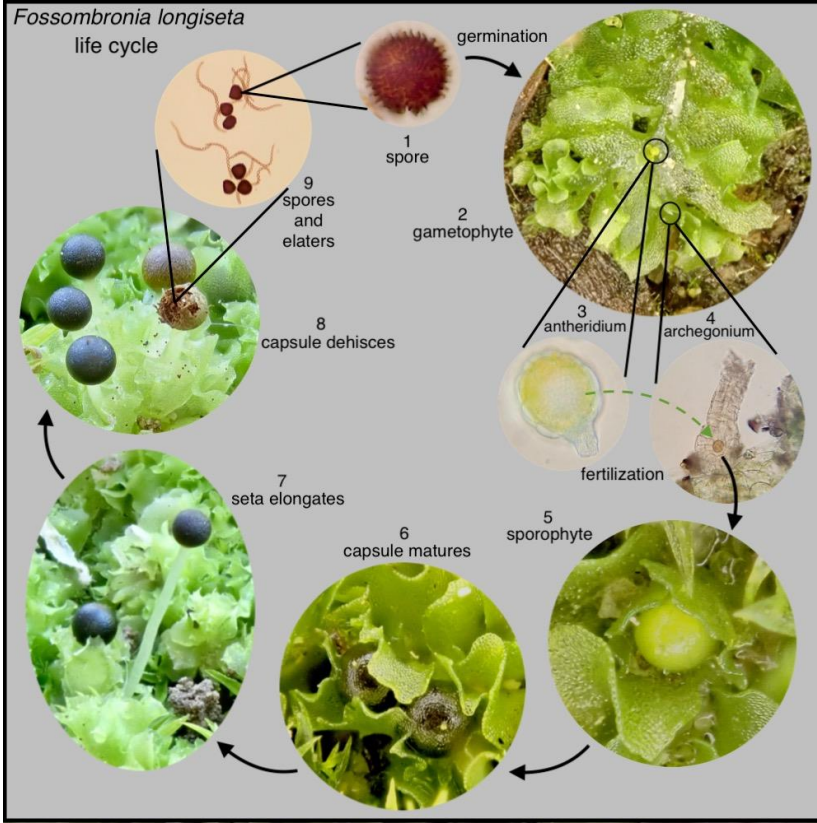
Ciğerotları (Marchantiopyta)

Ciğerotları (Marchantiopyta) da biyolojik çeşitliliğin önemli birer bileşenidir. Basit yapı ve sporla üreyen karasal bitkiler olmalarının yanında bu canlıların üremeleri suya bağımlıdır (Keçeli, 2004). Dünyadaki ciğerotu ve boynuzotlarının araştırılarak yayınlandığı araştırmalarında Söderström vd. (2015) dünyada toplam 7486 tür ciğerotu (Marchantiopyta) ve boynuzotunun (Anthocerotophyta) bulunduğunu bildirmişlerdir. Bu türleri barındıran toplam 92 familya ve 398 cins olduğu belirtilirken toplam tür sayısının yalnızca 215'inin boynuzotu olduğu kaydedilmiştir. Kalan 7271 tür ise ciğerotlarıdır.

Ciğerotları diğer bir briyofit grubu olan karayosunlarından (Bryophyta) tür zenginliği bakımından daha küçük bir grup olmasına rağmen form olarak bu bitkilerden daha fazla çeşitliliğe sahiptirler. Ciğerotları form yapıları sebebiyle yapraksı (Jungermanniopsida sınıfı) ve tallussu (Marchantiopsida sınıfı) şeklinde alt bölümlere ayrılabilirken bunlara ek olarak hem yapraksı hem de tallussu ciğerotlarının özelliklerini gösteren Haplomitriopsida sınıfı da üçüncü bir form olarak dikkat çeker (Hodgets vd, 2019).

Ciğerotlarının yaşam döngüsü iki aşamadan oluşmaktadır. Bunlardan ilki birey gelişiminin gerçekleştiği “n” kromozomlu “haploid” aşama, ikincisi ise üremenin gerçekleştiği “2n” kromozomlu “diploid” aşamadır. Ciğerotlarının yaşam döngüsünde bu iki aşama birbirini takip ederek “haplodiplobiyont” diye tanımlanan bir döş almaşının görülmesine neden olur. (Şekil 1). Bununla birlikte ciğerotları mevcudiyetlerini teminat altına alabilmek için vejetatif üremeyi sağlayan gemma adında yapılar geliştirmişlerdir. Gemmalar, eşeyli üremenin mümkün olmadığı koşullarda bitkinin eşeysiz üremesini sağlayan sigorta niteliğinde yapılardır. Ayrıca iletim demetleri gibi gelişmiş sistemleri olmadığı gibi kökleri de bulunmaz. Yalnızca substrata tutunmayı sağlayan fakat kökler gibi su ve mineral iletimi

görevi bulunmayan rizoid adında yapılar barındırırlar. Stoma içermezler ancak bazı tallussu ciğerotu taksonları stomayı andıran por adında açıklıklara sahiptirler (Şimşek, 2023). Çiçekli bitkilere göre oldukça basit ve küçük yapıları olan ciğerotları bu özellikleri sayesinde milyonlarca yıldır bu gezegende varlıklarını başarılı bir şekilde sürdürebilmişlerdir.



Şekil 1 Bir ciğerotunun hayat döngüsü (URL 1)

Ciğerotları (Marchantiophyta), biyoçeşitlilik açısından önemli bir grup olarak kabul edilmektedir. Bu bitkiler, ekosistemlerde çeşitli ekolojik işlevler üstlenirler ve birçok fayda sağlarlar. Toprak erozyonunun önlenmesi, suyun temizlenmesi ve karbon döngüsündeki yeri gibi çeşitli ekosistem hizmetleri sağlayarak doğal yaşamın sürdürülebilirliğine destek olurlar. Bunun yanında su tutma kapasiteleri ve toprak örtme özellikleri ile diğer küçük canlılara habitat sağlarlar, tohumların çimlenmesini kolaylaştırıcı ortam oluştururlar. Ayrıca ekosisteme genetik çeşitlilik katarak bu ekosistemlerin çevresel değişikliklere karşı adaptasyon gücünü, dolayısıyla dayanıklılıklarını artırırlar. Tüm bu özellikleri ile ciğerotları ekosistemler için önemli bir biyoçeşitlilik bileşeni olarak dikkati çekmektedirler.

Kaz Dağları

Ülkemizin biyolojik çeşitlilik ve endemizm bakımından önemli alanlarından bir tanesi Kaz Dağlarıdır. Kaz Dağları, ülkemizin batı-kuzeybatısı kesiminde, Edremit Körfezi'nin kuzey kıyılarında yer almakta olup Ege Bölgesi ile Marmara Bölgesi arasındaki sınırı teşkil etmektedir. Yaklaşık olarak 1000 km² alana yayılan dağlık kütleinin güneyi ve doğusu Balıkesir, kuzeyi ve batısı ise Çanakkale ili sınırları içinde kalmaktadır. Kaz Dağlarında biyotik faktörler (hayvanlar, doğal bitkiler ve insanlar) ile abiyotik faktörlerin (kayaçlar, yeryüzü şekilleri, toprak, iklim, sular vb) birbirleriyle ilişkileri oldukça hassastır. Buna rağmen Türkiye'de doğallığını büyük ölçüde koruyabilmiş ender alanlardan bir tanesidir. Bunda sahanın iklim ve hidrolojik özelliklerinin önemli bir rolü vardır. Saha yeterli miktarda yağış alır ve yer altı suları bakımından zengindir. Hava ve toprak nemi sayesinde tahrip edilen alanlarda bitkilerin jeneratif gelişimi daha hızlı olur. Kaz Dağları silsilesinde yer alan milli park ve tabiatı koruma alanının ekosistemin sürdürülebilir olmasındaki işlevi büyüktür (Cürebal vd, 2012).

Kaz Dağlarında ekosistemin işleyişini ve ekolojisini belirleyen faktörlerin başında iklim, doğal bitki örtüsü ve sular gelir. Büyük bir kısmı Akdeniz ikliminin etkisinde olan sahanın kuzey kesimlerine Marmara geçiş iklimi hakimdir. Dağların doğu-batı yönünde uzanması bu iklim farklılığını ortaya çıkarır. Kuzeye bakan yamaçlarda yıllık ortalama sıcaklık daha düşük ve yağış miktarı daha fazla, güneye bakan yamaçlarda sıcaklık yüksek ve yağış miktarı daha azdır. Bunun sonucu olarak Kaz Dağlarının kuzey ve güney yamaçlarında farklı ekolojik şartlar ve ekosistemler oluşmuştur. Orografik şartlar, sıcaklık ve yağış şartlarında değişime yol açarak yüksek kesimlerde biraz daha soğuk ve nemli iklimin hâkimiyetini sağlamıştır. Böylece deniz seviyesinden başlayarak 800 metrelere kadar tipik Akdeniz ikliminin etkisinde olan kesim “alt zon” bunun üzerinde yer alan saha ise “üst zon” olarak ortaya çıkmıştır (Cürebal vd, 2012).

Kaz Dağlarının vejetasyonu güney yamaçların kuru, kuzey yamaçların nemli ormanları olmak üzere ikiye ayrılır. Ayrıca yükselti nedeniyle her iki yüzde de alt ve üst zon oluşmuştur. Güney yüzün alt zonunda kızılçam, üst zonunda ise karaçam hâkimdir. Zonları ayıran yükselti basamağı güneye bakan yamaçlarda 800 m'lerden geçer. Kuzey yüzün üst zonunda Kazdağı göknarı-kayın, alt zonu ise meşe hakimdir. İkisi arasındaki sınır 500 m'lerden geçer. Kaz Dağları'nda 1650 m'nin üzerindeki ormansız alan pseudoalpin bir kat karakterindedir. Kaz Dağları fiziki ve biyolojik unsurlarıyla birini bütünleyen ve karşılıklı ilişkilerle birlikte çalışan büyük bir doğal mekanizma yani bir ekosistemdir. Bu sistemin herhangi bir unsurunun çeşitli nedenlerle işlevini yitirmesi, mekanizmada aksaklıklara, tahribatlara, çöküntülere hatta geri döndürülemeyecek şekilde yok oluşa yol açar. Kaz Dağları ekosistemi canlı ve cansız öğelerin oluşturduğu bir temel üzerine

kurulmuştur. Bunlar jeomorfolojik ve jeolojik yapı, iklim, toprak ve sular, bitki örtüsü, yaban hayvanları ve insandır (Cürebal vd, 2012).

Kazdağı Milli Parkı bu ekosistem üzerinde alanın Edremit körfezine bakan güney kısmında yer almaktadır. Kaz Dağları ekosistemi 100 bin hektardan fazla bir büyüklüğe sahip olmakla birlikte 17.04.1994 tarihinde milli park olarak ilan edilen alanın büyüklüğü 20,935 ha'dır. Milli Park'ın 2014 yılında yapılan amenajman planına göre alanın 19.819,0 ha'lık kısmı ormanlık, 1.120,2 ha'lık kısmı ise ormansız alanlardan oluşmaktadır (Anonim, 2023).

Kaz Dağlarının biyolojik çeşitliliğinin ne kadar zengin olduğunu milli park olarak ayrılan alanın floristik özelliklerinden de anlamak mümkündür. Zira Kazdağı Milli Parkı Uzun Devreli Gelişme Planına göre milli park sınırları içerisinde tür ve tür altı düzeyde toplam 86 familyaya ait 427 bitki taksonu tespit edilmiştir. Tespit edilen bu aksonların 60 tanesi endemiktir. Alandaki endemizm oranı % 14,05'tir. Bununla birlikte yaklaşık 1000 km²'den büyük bir alana yayılan Kaz Dağları silsilesinin tamamında 800'den fazla bitki olduğu düşünülmektedir (Anonim, 2023).



Şekil 2 Kaz Dağlarının Konumu (URL 2)

Tüm bu nedenler ile Kaz Dağlarının ciğerotları bakımından da zengin bir biyoçeşitliliğe sahip olabileceği düşünülmektedir. Bu maksatla literatürdeki Kaz Dağları ve yakın çevresinde gerçekleştirilen ciğerotu florası çalışmaları araştırılmış ve bu bölgede var olan ciğerotları belirlenmiştir. Böylelikle Kaz Dağlarının ciğerotları florası bakımından nasıl bir biyolojik zenginliğe sahip olduğu sorusuna cevap aranmış ve bulgular ortaya konmuştur.

KAZ DAĞLARI VE YAKIN ÇEVRESİNDE YAPILMIŞ CİĞEROTU FLORA ARAŞTIRMALARI

Kaz Dağları ve yakın çevresinde gerçekleştirilen ciğerotları florası çalışmalarına bakıldığında bu konuda yapılmış olan 4 araştırma öne çıkmaktadır.

Bölgede gerçekleştirilen çalışmalardan ilki Gökler ve Özenoğlu (1999) tarafından yapılan araştırmadır. Araştırmacılar yaptıkları çalışmada Kazdağı Milli Parkı ve çevresinde bulunan ciğerotlarının taksonomisini ve ekolojisini araştırmışlardır. Araştırmacılar milli park ve yakın çevresinde gerçekleştirdikleri bu çalışma neticesinde alandan toplamda 22 ciğerotu taksonu tespit etmişlerdir (Gökler ve Özenoğlu, 1999).

Gökler, 2015 yılında yaptığı çalışma ile Çanakkale ilinin boynuzotları ve ciğerotları üzerine taksonomik ve ekolojik bir araştırma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada örnekleme noktalarının büyük çoğunluğu Kaz Dağlarının kuzey kesimlerinde yer alan Bayramiç, Kalkım ve Yenice civarlarından seçilmiştir. Araştırmada yalnızca 3 istasyon Kaz Dağlarına biraz daha uzak olan Çan ve yakın civarından seçilmiştir. Yapılan araştırma neticesinde toplamda 23 ciğerotu taksonu tespit edilmiştir (Gökler, 2015).

Arslan ve ark. (2015), gerçekleştirdikleri araştırma ile Kaz Dağı Milli Parkı ve Ayazma Pınarı Tabiat Parkından ciğerotu örnekleri toplayarak teşhis etmişlerdir. Yaptıkları araştırma neticesinde 22 ciğerotu taksonu tespit etmişlerdir.

Şimşek (2024), yaptığı araştırmada Kaz Dağlarının kuzey kesiminde yer alan Çanakkale'nin Yenice ilçesi ciğerotları florasını araştırmıştır. Yaptığı araştırma neticesinde alandan toplamda 29 ciğerotu taksonu bildirmiştir.

Gerçekleştirilen bu dört çalışmanın neticesinde tespit edilmiş olan ciğerotu türlerinin familyalara dağılımları irdelenerek Tablo 2'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bununla birlikte bu araştırmalarda tespit edilen ciğerotu türlerinin hepsi listelendiğinde Kaz Dağları ve yakın çevresinde toplamda 42 ciğerotu (Marchantiophyta) taksonu ile 1 boynuzotu (Anthocerotophyta) taksonunun yayılış gösterdiği anlaşılmıştır (Tablo 1).

Kaz Dağları ve yakın çevresinde tespit edilen türlerin listelendiği Tablo 1 hazırlanırken okuyucuya kolaylık olması amacıyla familya ve türler alfabetik olarak sıralanmıştır. Literatürde bulunan kaynaklar numaralandırılarak tabloda hangi türün hangi referansta tespit edildiği bilgisi verilmiştir. Kaynakların referans numaraları aşağıdaki gibidir:

Ref.No 1: Gökler, İ., ve Özenoğlu, H. (1999). Kazdağı Milli Parkı ve çevresi ciğerotlarının taksonomisi ve ekolojisi. Ekoloji Çevre Dergisi, 8:30, 22-26.

Ref.No 2: Gökler İ. (2015). Çanakkale İli Boynuzsu Otları ve Ciğerotları Üzerine Taksonomik ve Ekolojik Bir Araştırma. Anadolu Doğa Bilimleri Dergisi. 6:2, 35-43.

Ref.No 3: Arslan, G.T., Karabulut, M. ve Keçeli, T. (2015). Ayazma Tabiat Parkı (Çanakkale), Kaz Dağları Milli Parkı (Balıkesir) Ciğerotu Florasına Katkıları, XII. Ulusal Ekoloji Ve Çevre Kongresi, Muğla. Konferans bildirisi.

Ref.No 4: Şimşek, Ö. (2024). Liverwort (Marchantiophyta) and Hornwort (Anthocerotophyta) Flora of Yenice District (Çanakkale): New Floristic Findings from the Northern Part of Mount Ida (Kaz Dağı). *Anatolian Bryology*, 10(2), 95-109.

Tablo 1 Kaz Dağları ve yakın çevresinden tespit edilmiş ciğerotu (Marchantiophyta) ve boynuzotu (Anthocerotophyta) türleri

Fam · No	Familiya	Tür No	Tür Adı	Ref. No
1*	Notothyladaceae*	1*	<i>Phaeoceros laevis</i> (L.) Prosk*.	2,4
1	Aneuraceae	1	<i>Aneura pinguis</i> (L.) Dumort.	4
2	Aytoniaceae	2	<i>Mannia gracilis</i> (F. Weber) D.B. Schill & D.G. Long	4
		3	<i>Plagiochasma rupestre</i> (Forst.) Steph.	1,2
		4	<i>Reboulia hemisphaerica</i> (L.) Raddi	1,2,3,4
3	Calypogeiaceae	5	<i>Calypogeia fissa</i> (L.) Raddi	1,2
4	Conocephalaceae	6	<i>Conocephalum conicum</i> (L.) Dumort.	1,2,3,4
5	Fossombronaceae	7	<i>Fossombronina pusilla</i> (L.) Nees	1,2,4
6	Frullaniaceae	8	<i>Frullania dilatata</i> (L.) Dumort.	1,2,3,4
		9	<i>Frullania tamarisci</i> (L.) Dum.	3
		10	<i>Frullania teneriffae</i> (F.Weber) Nees	4
7	Jungermanniaceae	11	<i>Barbilophozia barbata</i> (Schmid. ex Schreb.) Loeske	3
		12	<i>Barbilophozia hatcheri</i> (Evans) Loeske	3
		13	<i>Jungermannia</i> sp.	3
		14	<i>Mesoptychia turbinata</i> (Raddi) L. Söderstr. & Vána	3,4
8	Lejeuneaceae	15	<i>Lejeunea cavifolia</i> (Ehrh.) Lindb.	1,2,3,4
		16	<i>Lejeunea lamacerina</i> (Steph.) Schiffn.	1,2,4
9	Lophocoleaceae	17	<i>Chiloscyphus polyanthos</i> (L.) Corda	1,2,3,4
		18	<i>Lophocolea bidentata</i> (L.) Dum.	1,2,3

Fam · No	Familya	Tür No	Tür Adı	Ref. No
10		19	<i>Lophocolea heterophylla</i> (Schrad.) Dumort.	1,2,4
11	Lophoziaaceae	20	<i>Lophozia longidens</i> (Lindb.) Konstant. & Vilnet	3
12	Lunulariaceae	21	<i>Lunularia cruciata</i> (L.) Dumort. ex Lindb.	1,2,3,4
13	Marchantiaceae	22	<i>Marchantia polymorpha</i> L.	4
14	Metzgeriaceae	23	<i>Metzgeria conjugata</i> Schiffn.	1,2
		24	<i>Metzgeria furcata</i> (L.) Corda	1,2,3,4
15	Pallaviciniaceae	25	<i>Pallavicinia lylei</i> (Hook.) Gray	4
16	Pelliaceae	26	<i>Apopellia endiviifolia</i> (Dicks.) Nebel & D. Quandt	1,2
		27	<i>Pellia epiphylla</i> (L.) Corda	3,4
		28	<i>Pellia neesiana</i> (Gottsche) Limpr.	2
17	Plagiochilaceae	29	<i>Plagiochila porelloides</i> (Torr. ex Nees) Lindenb.	1,2,3,4
18	Porellaceae	30	<i>Porella arboris-vitae</i> (With.) Grolle	1,2,3,4
		31	<i>Porella baueri</i> (Schiffn.) C.E.O.Jensen	1,2
		32	<i>Porella cordaeana</i> (Huebener) Moore	1,2,4
		33	<i>Porella pinnata</i> L.	4
		34	<i>Porella platyphylla</i> (L.) Pfeiff.	1,2,3,4
19	Radulaceae	35	<i>Radula complanata</i> (L.) Dumort.	3,4
		36	<i>Radula lindenbergiana</i> Gottsche ex C.Hartm.	3,4
20	Scapaniaceae	37	<i>Diplophyllum albicans</i> (L.) Dumort.	4
		38	<i>Scapania aequiloba</i> (Schwägr.) Dumort.	3
		39	<i>Scapania compacta</i> (Roth) Dumort	3,4
		40	<i>Scapania irrigua</i> (Nees) Nees	4
		41	<i>Scapania undulata</i> (L.) Dumort.	1,2,4
21	Targioniaceae	42	<i>Targionia hypophylla</i> L.	1,2

* Boynuzotu (Anthocerotophyta) türü

Tablo 2 Kaz Dağları ve yakın çevresinde yapılmış araştırmalarda tespit edilen ciğerotu taksonlarının familyalara dağılımı (Şimşek, 2024)

Çanakkale Yenice İlçesi Ciğerotları ve Boynuzotları Florası (Şimşek, 2024)			Kazdağı Milli Parkı ve Yakın Çevresi Ciğerotları (Gökler ve Özenoğlu, 1999)			Çanakkale Ciğerotları ve Boynuzotları (Gökler, 2015)			Ayazma Tabiat Parkı ve Kazdağı Milli Parkı Ciğerotları (Arslan vd., 2015)		
Familya	Tür Sayısı	Oran (%)	Familya	Tür Sayısı	Oran (%)	Familya	Tür Sayısı	Oran (%)	Familya	Tür Sayısı	Oran (%)
Porellaceae	4	13,79	Porellaceae	4	18,18	Porellaceae	4	17,39	Anastrophyllaceae	2	9,09
Scapaniaceae	4	13,79	Lophocoleaceae	3	13,64	Lophocoleaceae	3	13,04	Frullaniaceae	2	9,09
Lophocoleaceae	3	10,34	Aytoniaceae	2	9,09	Aytoniaceae	2	8,70	Jungermanniaceae	2	9,09
Aytoniaceae	2	6,90	Lejeuneaceae	2	9,09	Lejeuneaceae	2	8,70	Lophocoleaceae	2	9,09
Frullaniaceae	2	6,90	Metzgeriaceae	2	9,09	Metzgeriaceae	2	8,70	Porellaceae	2	9,09
Lejeuneaceae	2	6,90	Calypogeiaceae	1	4,55	Pelliaceae	2	8,70	Radulaceae	2	9,09
Radulaceae	2	6,90	Conocephalaceae	1	4,55	Calypogeiaceae	1	4,35	Scapaniaceae	2	9,09
Aneuraceae	1	3,45	Fossombroniaceae	1	4,55	Conocephalaceae	1	4,35	Aytoniaceae	1	4,55
Conocephalaceae	1	3,45	Frullaniaceae	1	4,55	Fossombroniaceae	1	4,35	Conocephalaceae	1	4,55
Fossombroniaceae	1	3,45	Lunulariaceae	1	4,55	Frullaniaceae	1	4,35	Lejeuneaceae	1	4,55
Jungermanniaceae	1	3,45	Pelliaceae	1	4,55	Lunulariaceae	1	4,35	Lophoziaaceae	1	4,55
Lunulariaceae	1	3,45	Plagiochilaceae	1	4,55	Plagiochilaceae	1	4,35	Lunulariaceae	1	4,55
Marchantiaceae	1	3,45	Scapaniaceae	1	4,55	Scapaniaceae	1	4,35	Metzgeriaceae	1	4,55
Metzgeriaceae	1	3,45	Targioniaceae	1	4,55	Targioniaceae	1	4,35	Pelliaceae	1	4,55
Pallaviciniaceae	1	3,45	TOTAL:	22	100	TOTAL:	23	100	Plagiochilaceae	1	4,55
Pelliaceae	1	3,45							TOTAL:	22	100
Plagiochilaceae	1	3,45									
TOTAL:	29	100									

SONUÇ

Biyolojik çeşitlilik ekolojik dengenin devamlılığı, ekosistem hizmetlerinden sürdürülebilir faydalanma ve sağlıklı bir çevrede yaşamak için son derece önemli olup bu doğal kaynakların korunup gelecek nesillere aktarılmasında her insanın sorumluluğu bulunmaktadır. Bu kapsamda özellikle biyolojik çeşitliliğin yoğunlaştığı bölgelerin korunması son derece kritik öneme sahiptir. Buna bağlı olarak endemizm ve biyoçeşitliliğin hangi bölgelerde yoğunlaştığını tespit edebilmek için flora ve fauna araştırmalarının artmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Biyoçeşitliliğe katkı sağlayan canlı gruplarından biri de ciğerotlarıdır (Marchantiophyta). Basit yapılı tohumlu bitkiler olan ciğerotları 400 milyon yıldan fazla zamandır gezegende karasal hayata uyum sağlamış önemli bir bitki grubudur (Hernick vd. 2008).

Ülkemizin önemli biyoçeşitlilik noktalarından biri Kaz Dağlarıdır. Kaz Dağları gerek flora gerekse fauna elemanları bakımından önemli bir biyolojik zenginliğe sahiptir. Bu sebeple Kaz Dağları ve civarında ciğerotlarının da zengin bir tür sayısı ile temsil ediliyor olması beklenen bir durumdur. Zira Kaz Dağları ve yakın çevresinde yapılmış olan çalışmalar irdelendiğinde bu alanda yayılış gösterdiği bilenen toplamda 42 ciğerotu ve 1 boynuzotu türü ile bu bölgenin ciğerotları bakımından son derece önemli bir biyolojik çeşitliliğe sahip olduğunu söylemek mümkündür.

Ülkemiz florasının önemli bir bileşeni olan ciğerotları ile ilgili taksonomik araştırmalar ülkemizde halen tamamlanmış durumda değildir. Biyolojik zenginliklerimizden olan bu bitki grubu hakkında çok daha fazla araştırma yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Yüksek biyolojik çeşitliliğe sahip Kaz Dağları ve yakın çevresinde her ne kadar ciğerotu florası araştırmaları yapılmış olsa da bunların sayısı ve araştırmaların kapsamı alanın gerçek ciğerotu tür zenginliğini ortaya koyacak seviyede değildir. Tüm bu gerekçelerle Kaz Dağlarının 42 takson ile önemli bir ciğerotu tür çeşitliliği barındırdığı ancak bu rakamın çok daha fazla olabileceği ve alanda kapsamlı flora araştırmalarının yapılmasına ihtiyaç olduğu düşünülmektedir.

REFERANSLAR

- Anonim. (2023). Tarım ve Orman Bakanlığı Doğa Koruma ve Milli Parklar Genel Müdürlüğü, Kazdağı Milli Parkı Uzun Devreli Gelişme Planı.
- Arslan, G.T., Karabulut, M. ve Keçeli, T. (2015). Ayazma Tabiat Parkı (Çanakkale), Kaz Dağları Milli Parkı (Balıkesir) Ciğerotu Florasına Katkıları, XII. Ulusal Ekoloji Ve Çevre Kongresi, Muğla. Konferans bildirisi.
- Cürebal, İ., Efe, R., Sönmez, S., & Soykan, A. (2012). Kazdağları Ekosistemi ve Ekolojisi. *Kazdağları Ulusal Çalıştayı Bildiriler Kitabı*, s, 93-110.
- Doğan, E., (2019). Biyolojik çeşitlilik ve odun dışı orman ürünleri veri tabanı (biyod-Amasya Orman Bölge Müdürlüğü örneği) (Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü),

- Gökler İ. (2015). Çanakkale İli Boynuzsu Otları ve Ciğerotları Üzerine Taksonomik ve Ekolojik Bir Araştırma. *Anadolu Doğa Bilimleri Dergisi*. 6:2, 35-43.
- Gökler, İ., ve Özenoğlu, H. (1999). Kazdağı Milli Parkı ve çevresi ciğerotlarının taksonomisi ve ekolojisi. *Ekoloji Çevre Dergisi*, 8:30, 22-26.
- Hernick, L. V., Landing, E., & Bartowski, K. E. (2008). Earth's oldest liverworts—*Metzgeriothallus sharonae* sp. nov. from the Middle Devonian (Givetian) of eastern New York, USA. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 148(2-4), 154-162.
- Hodgetts, N., Cáliz, M., Englefield, E., Fettes, N., García Criado, M., Patin, L., Nieto, A., Bergamini, A., Bisang, I., Baisheva, E. and Campisi, P., (2019). A miniature world in decline European Red List of Mosses, Liverworts and Hornworts. IUCN
- Keçeli T. (2004). Batı Karadeniz Bölgesi (BoluZonguldak-Bartın-Kastamonu) Ciğerotları (Hepaticae) Florası. Doktora tezi. 206 s., Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- Söderström L, Hagborg A, von Konrat M, Bartholomew-Began S, Bell D, Briscoe L, Brown E, Cargill DC, Costa DP, Crandall-Stotler BJ, Cooper ED, Dauphin G, Engel JJ, Feldberg K, Glenney D, Gradstein SR, He X, Heinrichs J, Hentschel J, Ilkiu-Borges AL, Katagiri T, Konstantinova NA, Larraín J, Long DG, Nebel M, Pócs T, Felisa Puche F, Reiner-Drehwald E, Renner MAM, Sass-Gyarmati A, Schäfer-Verwimp A, Moragues JGS, Stotler RE, Sukkharak P, Thiers BM, Uribe J, Váňa J, Villarreal JC, Wigginton M, Zhang L, Zhu R-L (2015) World checklist of hornworts and liverworts. *PhytoKeys* 59: 1–828. doi: 10.3897/phytokeys.59.6261
- Şimşek, Ö. (2023). Liverworts, Etnobriology and Etnobriological Properties of Some Liverworts in Turkey. In: Akpınar, A. (ed.), *Research on Mathematics and Science*. Özgür Publications. DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub81.c474>
- Şimşek, Ö. (2024). Liverwort (Marchantiophyta) and Hornwort (Anthocerotophyta) Flora of Yenice District (Çanakkale): New Floristic Findings from the Northern Part of Mount Ida (Kaz Dağı). *Anatolian Bryology*, 10(2), 95-109.
- URL 1. Website: <https://bryophytessb.com/liverwort-life-cycle/> (Erişim tarihi: 23.04.2024)
- URL 2. Website: <http://www.kazdaglari.com/yeri/yeri.html> (Erişim tarihi: 23.12.2024)

Alpin Habitatlardaki Karbon Döngü Süreçleri

Sevda TÜRKiŞ¹

1- Doç. Dr., (Ordu Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi Bölümü),
sevdaturkis@gmail.com, ORCID: [0000-0002-1853-8437](https://orcid.org/0000-0002-1853-8437))

ÖZET

Hızlı Arktik çevresel değişim, çözülen permafrost ekosistemlerinin atmosfere sera gazları salmasıyla tüm Dünya sistemini etkiler. Ne kadar permafrost karbonunun salınacağını, hangi zaman diliminde ve karbondioksit ve metanın göreceli emisyonlarının ne olacağını anlamak, küresel iklim üzerindeki etkiyi anlamak için önemlidir. Ek olarak, ısınan bir iklimdeki bitki örtüsünün tepkisi, permafrost karbonundan iklime gelen hızlanan geri bildirimin en azından bir kısmını telafi etme potansiyeline sahiptir. Tüm derinliklerdeki hava ve toprak sıcaklıklarındaki artışlar, daha fazla ısınmaya önemli bir geri bildirim olacak olan yeni bir CO₂ salınımı yörüngesini tetikleyebilir. Sıcaklık, organik karbon ve yer buzu, permafrost ekosistemlerinin küresel karbon döngüsü üzerindeki etkisini belirlemek için temel düzenleyicilerdir. Bunlar birlikte, küresel toplum ve bölgede yaşayan insanlar için önemli olan permafrost hizmetlerini kapsar ve bu bölgenin değişen iklime karşı manzara düzeyindeki tepkisini belirlemeye yardımcı olur. Antropojenik ve doğal bozulmalar ani çözölmeyi hızlandırabilir ve yüzey suyu bağlantısı üzerinde derin etkilere sahip olabilir. Ani çözölme, permafrostu tek başına kademeli yukarıdan aşağıya ısınmadan önemli ölçüde daha hızlı bozan bir eşik değişikliğini temsil eder. Arktik arazisinin önemli bir kısmı (%20) yüksek yer altı buz içeriğine sahiptir ve ısınmayla birlikte ani çözölmeye karşı hassastır. Dünya üzerinde yer alan tipping points (=eşik noktaları)'ler olarak tanımlanan ekstrem hassas koşullardaki habitatların karbon kaynak ve havuz girdi çıktılarının anlaşılması ve iklim değişikliğine yönelik çalışmaların donmuş topraklardaki karbon döngü eğilimleri üzerine gerçekleştirilmesi hedeflenmelidir.

Anahtar Kelimeler – Permafrost, Karbon Döngüsü, Alpin, Arktik, Isınma.

GİRİŞ

Ekosistemler arasında, hızlı iklim değişikliğine karşı en savunmasız olanlar, Arktik ve Alp ekosistemleri de dahil olmak üzere 'tundra biyomu' olarak nitelendirilen yaşamın en soğuk alanlarıdır (Ernakovic ve diğ., 2014). Tundranın kapladığı alan tahminleri, Dünya'nın karasal yüzeyinin yaklaşık %15-24'ü arasındadır (Zhao ve Running, 2010). Arktik ve alpin tundra, büyüme mevsimi boyunca bitki örtüsünün büyümesini ve ayrışmasını sınırlayan düşük sıcaklıklar da dahil olmak üzere birçok ortak özelliğe sahiptir ve bunun sonucunda kısa boylu çalılar, otlar ve graminoidlerin hakim olduğu habitatlar ortaya çıkar. Bu soğuk ekosistemler, biyolojik ve kimyasal süreçlerin daha soğuk ortamlarda sıcaklığa daha duyarlı olması nedeniyle iklim değişikliğinin etkilerine karşı özellikle hassastır (Kirschbaum, 1995). Tundra ekosistemlerinde ısınmanın biyolojik sonuçları

arasında bitki ve hayvan yaşam döngülerinin mevsimsel zamanlamasındaki kaymalar (Hollinger ve Richardson, 2005), değişen tür kompozisyonu (Walker ve ark., 2006) ve tür göçü, yok oluşu (Grabherr ve ark., 1994; Walker ve ark., 2006) yer alır. Buna karşılık, bu biyolojik tepkiler biyojeokimyasal döngüleri ve ekosistem hizmetlerini değiştirebilir, topraklarda ve permafrostta depolanan karbonun (C) artan ayrışması yoluyla iklim geri bildirimlerine neden olabilir (Schuur vd., 2008), biyolojik çeşitliliğin kaybına yol açabilir (Pauli vd., 2012) ve introfik dinamikleri değiştirerek diğer organizmaları etkileyebilir (Wookey ve diğ., 2009).

İklim değişikliği veya insan faaliyetleri ve arazi kullanımındaki değişiklik nedeniyle toprak organik karbon (SOC [Soil Organic Carbon]) havuzlarında meydana gelen küçük değişiklikler bile küresel C döngüsü üzerinde büyük bir etkiye sahip olabilir (Johnson ve diğ., 2007; Don ve diğ., 2009). Yükselen atmosferik CO₂'nin ve ilişkili küresel ısınmanın etkilerini azaltmada veya artırmada oynayabilecekleri rol nedeniyle (Johnston ve diğ., 2004), SOC havuzlarının ve zaman içindeki değişikliklerinin doğru değerlendirilmesi hayati önem taşımaktadır (Don ve diğ., 2007).

En az iki yıl üst üste sıcaklığı ≤ 0 C olan herhangi bir zemini ifade eden permafrost, kuzey yarımkürede şu anda maruz kalan karasal alanın yaklaşık %21'ini kaplar ve atmosferde şu anda bulunan karbon havuzunun iki katı miktarını içerir (Meredith ve diğ., 2019; Church ve diğ., 2013). Toprak organik karbonunun (SOC) çoğu, iklim ısınmasına karşı savunmasız olan yüzeye yakın (üst 3 m) topraklarda korunur. Son birkaç on yılda, Arktik bölgeleri dünya ortalamasından iki ila dört kat daha hızlı ısındı (Schuur ve diğ., 2015; Biskaborn ve diğ., 2019). Sonuç olarak, permafrost bozulması yaygın bir şekilde gerçekleşti ve 2007'den 2016'ya kadar küresel ortalama permafrostun 0,29 C'ın ısınmasına yol açtı (Schuur ve Mack, 2018). Büyük ölçeklerde kademeli, uzun vadeli ve yukarıdan aşağıya çözülmeye ek olarak, termokarst ve termoerozyonel süreçlerle tetiklenen hızlı/ani permafrost çözülmesi Arktik'in birçok yerinde belirgindir (Sjöberg ve diğ., 2020). Qinghai-Tibet Platosu'nda (QTP), yamaçlardaki permafrost çöküşü 1969'dan 2017'ye kadar hızlandı ve bunun sonucunda yerel yer termal ve hidrolojik koşullarında meydana gelen değişim üç büyük sera gazının (GHG'ler, yani CO₂, CH₄ ve N₂O) üretimini teşvik etti (Harris ve diğ., 1988). Bu donmuş karbon havuzunun yalnızca küçük bir kısmının atmosfere salınması iklim ısınmasını daha da kötüleştirir; Bu nedenle, büyük miktardaki karbon ve mikrobiyal karbon dönüşümü küresel iklim açısından büyük önem taşımaktadır.

Devam eden iklimsel ısınma, permafrostu yaygın olarak çözdü ve aktif tabakanın kalınlaşması ve termokarst manzaralarının oluşması şeklinde kendini gösterdi (Olefeldt vd., 2016; Röbger vd., 2022; Smith vd., 2022b). Bu süreçler, permafrost C'yi hızla atmosfere salacaktır (Martens vd., 2022; Miner vd., 2022). Son bir senteze dayanarak, Arktik'in 2100 yılına kadar

8,5'lik Temsili Konsantrasyon Yolu (RCP) (Schuur vd., 2022) altında çözülen permafrosttan 0,5–2,0 Pg C yr⁻¹ karbondioksit (CO₂) ve metan (CH₄) formunda salabileceği öngörülmektedir. Çözülen permafrosttan yayılan bu önemli miktardaki C, güçlü pozitif C-iklim geri bildirimini tetikleyebilir (Koven vd., 2011; Schuur vd., 2022) ve ayrıca insanların küresel ısınmayı 1,5 veya 2°C'nin altında tutmak için salabileceği sera gazı miktarını büyük ölçüde azaltabilir (Natali vd., 2021; Schädel vd., 2024). Permafrost C döngüsünün özelliklerini ve dinamiklerini açıklamak, permafrost C-iklim geri bildirimini doğru bir şekilde tahmin etmek ve iklim değişikliğini azaltmak için doğa temelli çözümler geliştirmek için çok önemlidir.

Net ekosistem karbon dengesi karbon salınımı ile alımı arasındaki ilişkiye göre hangi yöne giderse gitsin, bir şey son derece açıktır: İklim hafifletme yoluyla insan karbon emisyonlarını azaltmak Arktik'teki değişimi azaltacak, donmuş toprakların erimesini yavaşlatacak ve karbon döngüsündeki değişiklikleri azaltarak potansiyel olarak Arktik karbon emisyonlarını azaltacaktır. Örneğin, yüzey yakınındaki donmuş toprak alanının 2100 yılına kadar hiçbir iklim politikası olmadan 69 ± 20 oranında azalması öngörülmektedir (RCP8.5 [Representative Concentration Pathways]), buna karşın küresel ısınmayı 2°C'nin altında sınırlamayı hedefleyen iklim politikalarıyla 24 ± 16 oranında azalacaktır (RCP2.6) (Slater ve Lawrence, 2013). Isınmayı sınırlasa bile bazı donmuş topraklar yine de kaybolacaktır, ancak hafifletme çabaları olmadan %145 daha fazla kayıp olacaktır. En son ESM'ler bu bulguları desteklemekte ve ortalama küresel ısınma derecesi başına yüzey yakınındaki donmuş toprak hacminde doğrusal bir kayıp öngörmektedir (Fox ve diğ., 2021). Şu anda kuzeyin yüksek enlemlerindeki çalılık genişlemesinin ekosistem C bütçelerini nasıl etkileyeceği konusunda bir fikir birliği yoktur. Ancak, yer üstü biyokütlesindeki artışların daha fazla bitki biyokütlesi, daha fazla litter düşmesi ve dolayısıyla daha fazla toprak C'si nedeniyle daha büyük C depolamasıyla sonuçlandığı öne sürülmüştür (Qian ve diğerleri 2010). Yer üstü biyokütlesindeki artış daha fazla net CO₂ sekestrasyonuna yol açar ve aslında, net C alımındaki böyle bir değişiklik yirmi birinci yüzyıl için birkaç C döngüsü modeli tarafından da öngörülmüştür (Qian ve diğerleri 2010; Todd-Brown ve diğerleri 2014). Bu modeller, C akışlarının büyüklüğünü etkileyebilecek sıcaklık ve yağış desenlerindeki tüm ince ölçekli değişiklikleri tahmin edemese de (Cahoon ve diğerleri 2012), ekosistem C havuzlarında tutarlı bir artış tahmin ediyor gibi görülmektedirler.

Çalı genişlemesi ve bitki örtüsündeki değişikliklerin neden olduğu C döngüsünün ekosistem düzeyindeki değişikliklerini daha iyi anlamak için çalışmalar aynı anda ekosistem C akışlarına ve C havuzlarına odaklanmalıdır. Çalı genişlemesinin tundra ekosistemindeki C havuzları üzerindeki etkilerini anlamak, çeşitli ekosistem süreçleri nedeniyle

karmaşıktır (Myers-Smith ve diğerleri 2011). Çalı genişlemesi ayrıca toprak sıcaklıklarını değiştirir (Myers-Smith ve Hik, 2013), bu da toprak solunumunu daha da değiştirebilir (Cahoon ve diğerleri 2012). Çalılarının tundra fundalığına doğru genişlemesi kar derinliğini artırabilir çünkü çalı kanopisi daha kısa tundra bitki örtüsünden daha fazla kar tutar. Daha fazla kar toprağı yalıtır, kış toprak sıcaklığını artırır ve kış toprak solunumunu, yani "çalı-kar hipotezini" uyarır. (Sturm ve diğerleri 2001; Grogan ve Jonasson 2006; Myers-Smith ve Hik 2013). Yazın, çalılar gölgelenme nedeniyle yaz toprak sıcaklıklarını düşürür (Myers-Smith ve Hik 2013). Ek olarak, çalı genişlemesi mantar ve mikrobiyal topluluğı değiştirebilir, çünkü yaprak döken çalılar ektomikorizal mantarlarla ilişkilendirilirken, tundra fundalığı ve çayır bitki örtüsü genellikle sırasıyla ericoid ve arbusküler mikoriza ile ilişkilendirilir. Büyüme mevsimi boyunca nispeten yüksek yer üstü biyokütlesinin C'yi tutmasının, çayır ve fundalık topluluklarına kıyasla çalı ağırlıklı topluluklarda yüksek C depolamasıyla ilişkili olmadığını göstermektedir. Bunun yerine, çalı ağırlıklı alanlar yüksek ayrışma oranları nedeniyle karbon açısından zengin alpin topraklarını boşaltıyor olabilir.

Toplam birincil üretimin başlıca bileşenlerinden biri olan bitkilerin yer altı biyokütlesi, bitkilerin verimliliğinde ve bitki örtüsü C'nin depolanmasında önemli bir rol oynar (Wu vd., 2011). Kök sistemi, toprak ve bitkiler arasında dinamik bir arayüz görevi görür (Cai ve Shen, 2002) ve ekosistemin önemli bir yapısal ve işlevsel bileşenidir. Toprak C devir hızının, su dengesinin ve minerallerin biyojeokimyasal döngüsünün büyük ölçüde kök morfolojisi, yapılandırması ve baskın bitkilerin dağılımı tarafından belirlendiğı gösterilmiştir. Kök ve tüm bitki fizyolojisini etkileyebilecek farklı abiyotik faktörlerden sıcaklığın genellikle derin etkileri vardır. Örneğin, iklim ısınmasıyla ilişkili artan sıcaklık, doğrudan kök büyümesini uyarabilir veya yer altı C tahsisini artırarak dolaylı olarak uyarabilir. Bu nedenle, kök dinamiklerinin artan sıcaklığa verdiği tepkiyi anlamak, ekosistemin gelecekteki küresel ısınmaya verdiği tepkileri tahmin etmek için kritik öneme sahiptir.

Dünyanın iklimi hızla ısınıyor ve ısınma oranı özellikle yüksek enlemlerde ve rakımlarda, kış iklimindeki değişikliklerin genel ısınma eğiliminin en önemli bileşeni olduğu yerlerde hızlıdır (ACIA 2005; IPCC 2007). Bu kış değişiklikleri kar yağışı miktarında ve kar örtüsünün süresindeki kaymalar (genellikle azalmalar); sıcaklık değişkenliğinde ve aşırı kış ısınma olaylarının sıklığında artış; bu değişikliklerin yönü ve dinamiklerinde büyük mekansal değişkenlik (ACIA 2005; Callaghan ve diğerleri 2011; Makoto ve diğerleri 2013) ile karakterize edilebilir. Birçok yakın tarihli saha deneysel çalışması, doğal eğim çalışmaları ve uzun vadeli izleme çalışmalarına dayanarak, bilim insanları bitki örtüsünün değişen kış iklimine verdiği doğrudan tepkileri kavramaya başlıyorlar, ancak çoğı çalışmada kışın ısınma etkilerinin kar erimesi ve büyüme mevsimlerindeki

ısınma etkilerinden ayırmanın mümkün olmadığını belirtiyorlar (Keuper ve ark. 2011). Çalıların dünya çapında birçok soğuk iklim ekosistemine yayılması, hem kışın hem de yazın ısınmasının birleşik etkilerinden kaynaklanıyor gibi görünmektedir. Isınma sınırlı olsa bile bu sürekli permafrost kaybı, düşük emisyon senaryolarında karbon emisyonlarını anlama ihtiyacını vurgular. Azaltma çabaları yalnızca insan kaynaklı karbon emisyonlarını sınırlamakla kalmayacak, aynı zamanda izin verilen karbon bütçeleri dahilinde Arktik karbon emisyonları gibi kontrolsüz kaynakları da hesaba katmalıdır (Canadell ve diğ., 2021; Gasser ve diğ., 2018).

SONUÇLAR

Arktik karasal karbon depolamasını kontrol eden faktörler değişiyor. Yüzey hava sıcaklığı değişimi, sıcaklık artışının küresel ortalama artıştan yaklaşık 2-3 kat daha hızlı olduğu Arktik bölgelerinde daha da artıyor. Permafrost sıcaklıkları son 40 yıldır artıyor ve şu anda rekor seviyelerde. Küresel olarak insan faaliyetlerinin bir sonucu olarak artan karbondioksit ve metan emisyonlarına sahip bir arka plan atmosferine karşı ekosistem sera gazı emisyonlarındaki bölgesel değişimi tespit etmek için gelişmiş yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Gelecekteki modelleme çalışmaları için kullanılabilecek permafrost ekosistem dinamiklerinin bir dizi gözlemsel kıyaslama ölçütünün standartlaştırılması, çeşitli modelleme yaklaşımlarının karşılaştırılabileceği ölçütlerin geliştirilmesi gerekmektedir.

KAYNAKÇA

ACIA (2005). Arctic climate impact assessment, 2005. Cambridge University Press, Cambridge

Biskaborn BK, Smith SL, Noetzli J, et al. (2019). Permafrost is warming at aglobal scale. Nat Commun. 2019;10(1):264. doi:10.1038/s41467-018-08240-4

Cahoon SMP, Sullivan PF, Shaver GR, Welker JM, Post E (2012). Interactions among shrub cover and the soil microclimate may determine future Arctic carbon budgets. Ecology Letters, 15, 1415–1422.

Callaghan TV, Johansson M, Brown RD, Groisman PY, Labba N, Radionov V, Barry RG, Bulygina ON, Essery RLH, Frolov DM, Golubev VN, Grenfell TC, Petrushina MN, Razuvaev VN, Robinson DA, Romanov P, Shindell D, Shmakin AB, Sokratov SA, Warren S, Yang D (2011). The changing face of arctic snow cover: a synthesis of observed and projected changes. Ambio 40:17–31

Canadell JG, Montiero PMS, Costa MH, Cotrim da Cunha L, Cox PM, et al. (2021). Global carbon and other biogeochemical cycles and feedbacks. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate

Change, ed. V Masson-Delmotte, P Zhai, A Pirani, SL Connors, C Péan, et al., pp. 673–816. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press

Church JA, Clark PU, Cazenave A, Gregory JM, Jevrejeva S, et al. (2013). Sea level change. In *Climate Change (2013): The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, ed. TF Stocker, D Qin, G-K Plattner, M Tignor, SK Allen, et al., pp. 1137–1216. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press 3.

Don, A., Scholten, T., Schulze, E.D., (2009). Conversion of cropland into grassland: implications for soil organic-carbon stocks in two soils with different texture. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 172, 53–62.

Ernakovich, J. G., Hopping, K. A., Berdanier, A. B., Simpson, R. T., Kachergis, E. J., Steltzer, H., & Wallenstein, M. D. (2014). Predicted responses of arctic and alpine ecosystems to altered seasonality under climate change. *Global Change Biology*, 20(10), 3256-3269.

Fox-Kemper B, Hewitt HT, Xiao C, Aðalgeirsdóttir G, Drijfhout SS, et al. 82021). Ocean, cryosphere and sea level change. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, ed. V Masson-Delmotte, P Zhai, A Pirani, SL Connors, C Péan, et al., pp. 1211–362. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press

Gao TG, Zhang YL, Kang SC, et al. (2021). Accelerating permafrost collapse on the eastern Tibetan plateau. *Environ Res Lett.* 2021;16(5):054023

Gasser T, Kechiar M, Ciais P, Burke EJ, Kleinen T, et al. (2018). Path-dependent reductions in CO₂ emission budgets caused by permafrost carbon release. *Nat. Geosci.* 11(11):830–35

Grabherr G, Gottfried M, Pauli H (1994). Climate effects on mountain plants. *Nature*, 369, 448

Harris SA, French HM, Heginbottom JA, Johnston GH, Ladanyi B, et al. (1988). Glossary of permafrost and related ground-ice terms. Tech. Memo. 142, Natl. Res. Counc. Can., Ottawa, Can

Hollinger DY, Richardson AD (2005). Uncertainty in eddy covariance measurements and its application to physiological models. *Tree Physiology*, 25, 873–885

Hugelius G, Strauss J, Zubrzycki S, et al. (2014). Estimated stocks of circum-polar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps. *Biogeosciences*. 11(23):6573-6593. doi:10.5194/bg-11-6573-20142.

IPCC (2007). *Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge

IPCC, (2013): Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Stocker TF, et al. (eds). 2013. p 1535-4.

Johnson, D.W., Todd, D.E., Trettin, C.F., Sedinger, J.S., (2007). Soil carbon and nitrogen changes in forests of Walker Branch watershed, 1972 to 2004. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71, 1639–1646.

Johnston, C.A., Groffman, P., Breshears, D.D., Cardon, Z.G., Currie, W., Emanuel, W., Gaudinski, J., Jackson, R.B., Lajtha, K., Nadelhoffer, K., Nelson, D., Post, W.M., Retallack, G., Wielopolski, L., (2004). Carbon cycling in soil. *Front. Ecol. Environ.* 2, 522–528.

Jonas T, Rixen C, Sturm M, Stoeckli V (2008). How alpine plant growth is linked to snow cover and climate variability. *J Geophys Res B* 113:G03013

Keuper F, Dorrepaal E, van Bodegom PM, Aerts R, van Logtestijn RSP, Callaghan TV, Cornelissen JHC (2011). A race for space? How *Sphagnum fuscum* stabilizes vegetation composition during long-term climate manipulations. *Glob Change Biol* 17:2162–2171

Keuper F, Dorrepaal E, van Bodegom PM, Aerts R, van Logtestijn RSP, Callaghan TV, Cornelissen JHC (2011). A race for space? How *Sphagnum fuscum* stabilizes vegetation composition during long-term climate manipulations. *Glob Change Biol* 17:2162–2171

Kirschbaum MUF (1995). The temperature-dependence of soil organic-matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic-C storage. *Soil Biology & Biochemistry*, 27, 753–760

Makoto K, Kajimoto T, Koyama L, Kudo G, Shibata H, Yanai Y, Cornelissen JHC (2013). Winter climate change in plant-soil system: summary of recent findings and future perspectives. *Ecol Res.* doi:10.1007/s11284-013-1115-0

Meredith M, Sommerkorn M, Cassotta S, Derksen C, Ekaykin A, et al. (2019). Polar regions. In IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, ed. H.-O. Pörtner, DC Roberts, V Masson-Delmotte, P Zhai, M Tignor, et al., pp. 203–320. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press 2.

Myers-Smith IH, Forbes BC, Wilmsking M et al. (2011). Shrub expansion in tundra ecosystems: dynamics, impacts and research priorities. *Environmental Research Letters*, 6, 045509, doi: 10.1088/1748-9326/6/4/045509.

Myers-Smith IH, Hik DS. (2013). Shrub canopies influence soil temperatures but not nutrient dynamics: An experimental test of tundra snow-shrub interactions. *Ecology and Evolution* 3:3683–3700.

Pauli H, Gottfried M, Dullinger S. (2012). Recent plant diversity changes on Europe's mountain summits. *Science*, 336, 353–355

Qian H, Joseph R, Zeng N (2010). Enhanced terrestrial carbon uptake in the Northern high latitudes in the 21st century from the coupled carbon cycle climate

model intercomparison project model projections. *Global Change Biology*, 16, 641–656.

Ran YH, Li X, Cheng GD, et al. (2022). New high-resolution estimates of the permafrost thermal state and hydrothermal conditions over the northern hemisphere. *Earth Syst Sci Data*. 14(2):865-884. doi:10.5194/essd-14-865-2022

Rantanen M, Karpechko AY, Lipponen A, et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since (1979). *Commun Earth Environ*. 2022;3(1):168. doi:10.1038/s43247-022-00498-35.

Schuur EAG, Bockheim J, Canadell JG et al. (2008). Vulnerability of permafrost C to climate change: implications for the global C cycle. *BioScience*, 58, 701–714

Schuur EAG, Mack MC. (2018). Ecological response to permafrost thaw and consequences for local and global ecosystem services. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 49:279–301

Schuur EAG, McGuire AD, Schädel C, Grosse G, Harden JW, et al. (2015). Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature* 520(7546):171–79

Biskaborn BK, Smith SL, Noetzi J, Matthes H, Vieira G, et al. 2019. Permafrost is warming at a global scale. *Nat. Commun.* 10(1):264

Sjöberg Y, Siewert MB, Rudy ACA, Paquette M, Bouchard F, et al. (2020). Hot trends and impact in permafrost science. *Permafrost Periglac. Process.* 31(4):461–71

Slater AG, Lawrence DM. (2013). Diagnosing present and future permafrost from climate models. *J. Clim.* 26(15):5608–23

Strauss J, Schirrmeister L, Grosse G, et al. (2017). Deep Yedoma permafrost: a synthesis of depositional characteristics and carbon vulnerability. *Earth Sci Rev.* 172:75–86. doi:10.1016/j.earscirev.2017.07.0077.

Sturm M, McFadden JP, Liston GE, Chapin FS III, Racine CH, Holmgren J. (2001). Snow-Shrub Interactions in Arctic Tundra: A Hypothesis with Climatic Implications. *Journal of Climate* 14:336–344.

Todd-Brown KEO, Randerson JT, Hopkins F et al. (2014). Changes in soil organic carbon storage predicted by Earth system models during the 21st century. *Biogeosciences*, 11, 2341–2356.

Wahren CHA, Walker MD, Bret-Harte MS (2005). Vegetation responses in Alaskan arctic tundra after 8 years of a summer warming and winter snow manipulation experiment. *Glob Change Biol* 11:537–552

Walker MD, Wahren CH, Hollister RD et al. (2006). Plant community responses to experimental warming across the tundra biome. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103, 1342–1346

Wipf S, Stoeckli V, Bebi P (2009). Winter climate change in alpine tundra: plant responses to changes in snow depth and snowmelt timing. *Clim Change* 94:105–121

Wookey PA, Aerts R, Bardgett RD et al. (2009). Ecosystem feedbacks and cascade processes: understanding their role in the responses of Arctic and alpine ecosystems to environmental change. *Global Change Biology*, 15, 1153–1172

Zhao, M., & Running, S. W. (2010). Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *science*, 329(5994), 940-943.

Antrakınonlar ve Kinizarın Türevlerinin Biyoaktif Özellikleri

Ülkü YILMAZ¹

¹ Prof. Dr. Ülkü YILMAZ, Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mühendislik Temel Bilimleri Bölümü, Malatya, Türkiye, ulku.yilmaz@ozal.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-2806-4781

ÖZET

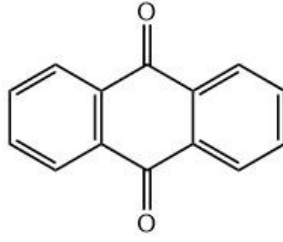
Antrasen türevi olan antrakinonlar doğal kaynaklardan izole edilebilirler ya da sentetik olarak elde edilmektedirler. Doğal antrakinonlar halk tıbbında yüz yıllardır bazı hastalıklar için ilaç olarak kullanılmaktadırlar. Bunun yanı sıra 9,10-antrasendion türevleri dayanımları yüksek olduğu için boyar madde olarak kullanımları da yaygındır. Sentetik olarak elde edilen antrakinon türevleri farmakoloji alanında oldukça dikkat çekmektedirler. Zaten günümüzde ilaç olarak kullanılan doksorubisin, daunomisin ve mitoksantron (antikanser ajanlar) kinizarin türevi ilaçlardır. Bu bölümde özellikle üzerinde durulan konu ise son zamanlarda kinizarin (1,4-dihidroksiantrakinon) çekirdeğinden yola çıkılarak sentezlenmiş olan bileşiklerin ligant olarak ya da metal kompleksleri halinde enzim inhibitörü, antitümöral ve antikanser ajanları olarak kullanılmaları ve ilgi çekiçi yüksek aktiviteler sergilemeleri anlatılmaktadır.

Anahtar Kelimeler – Antrakinon, Kinizarin, Biyoaktif Özellik, Dihidroksiantrakinon, Antikanser Ajan.

GİRİŞ

Antrakinonlar

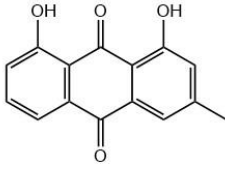
Antrakinonlar ilk olarak 1840 yılında Laurent tarafından antrasen oksitlenerek elde edilmiştir. Grabe ve Liberman tarafından 1868 de antrakinon adı önerilmiştir (Malik vd., 2021:35806; Demselden, 1840:287; Graebe, 1890:3739). Antrakinonlar genellikle ya serbest halde ya da glikozitleri halinde doğal olarak bitkiler ve mantarlarda bulunur. Antrakinon türevlerinin antikanser, anti-inflamatuvar, antibakteriyel ve antiviral gibi birçok biyoaktif özelliğe sahip olduğu yapılan çalışmalar ile ispatlanmıştır (Xia vd., 2023; ve Zhang vd., 2021; Xie vd., 2022; Qi vd., 2022; Dai vd., 2017). Antrakinonlar (9,10-dioksoantrasenler) içerecekleri süstitüentler ve onların antrakinon çekirdeğindeki konuma bağlı olarak farklı biyoaktif özellikler sergilemektedirler (Fang vd., 2022).



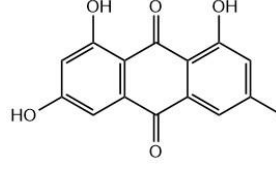
Şekil 1. Antrakininon çekirdeği

Antrakininonlar ve türevleri yani antrasen-9,10-dionlar (Şekil 1) doğada böcek, bitki ve mantarların doğal olarak oluşturduğu ve anti-inflamatuar, antioksidan, antibakteriyel, antiviral, antitümöral ve anti-osteoporoz özellikleriyle birçok farmakolojik etkinliğe sahiptirler (Xin vd., 2022; Malik ve Müller, 2016).

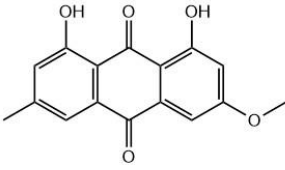
1,8-Dihidroksi-3-metilantrasen-9,10-dion



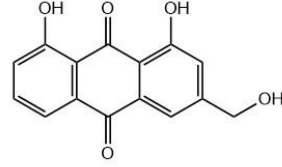
1,3,8-trihidroksi-6-metilantrasen-9,10-dion



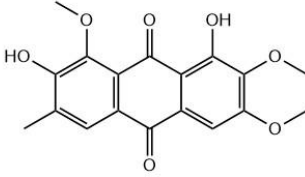
1,8-Dihidroksi-3-metoksi-6-metilantrasen-9,10-dion



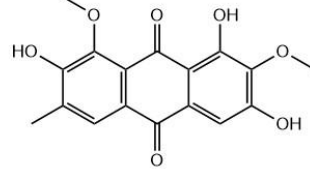
1,8-dihidroksi-3-(hidroksimetil)antrakion



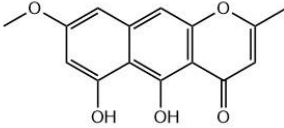
1,7-dihidroksi-2,3,8-trimetoksi-6-metilantrasen-9,10-dion



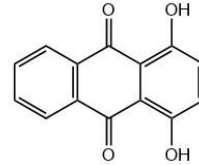
1,3,7-trihidroksi-2,8-dimetoksi-6-metilantrasen-9,10-dion



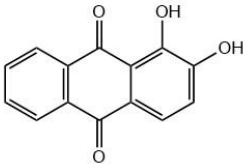
5,6-Dihidroksi-8-metoksi-2-metil-benzo[g]chromen-4-on



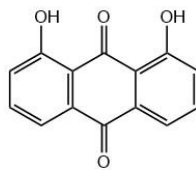
1,4-Dihidroksiantrakion



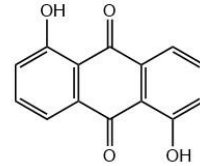
1,2-Dihidroksiantrakion



1,8-Dihidroksiantrakion



1,5-Dihidroksiantrakion

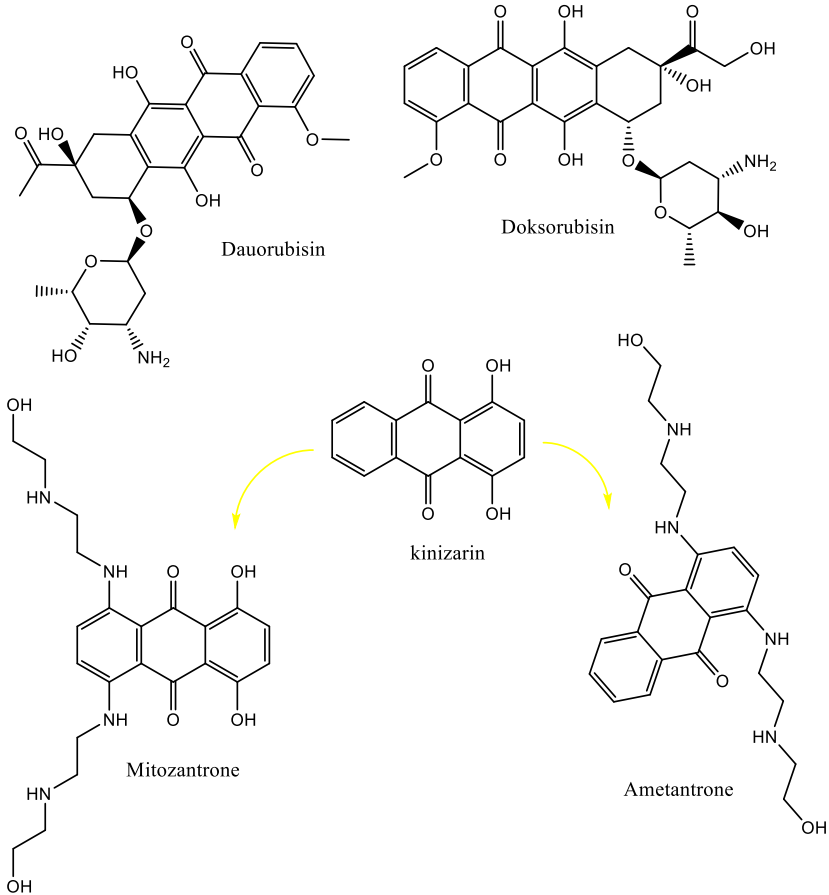


Şekil 2. Bazı doğal oluşumlu antrakionlar.

Çin de yüzyıllardır *Cassia tora* L. tohumları karaciğer rahatsızlıklarını tedavi etmek ve görme keskinliğini artırmak için geleneksel tıpta kullanılmaktadır (Yen vd., 2000; Duke, 1992). Bu bitkinin kimyasal içeriği araştırıldığında krizofanol, emodin, aloe-emodin, rhein, parietin, obtusin, aurantio obtusin, torakrizon, toralakton ve rubrofusarin içerdiği kaydedilmiştir. Alizarin,

kinizarin, krizasin ve antrarufin de doğal olarak mantar ve *Rubia* cinsi bitkilerde oluşmaktadır (Mech vd., 2014). Sıkça karşılaşılan bazı antrakınon türevleri Şekil 2 de görülmektedir.

Antrakınonlar antrasenin önemli kinon türevleridir. Leguminosae, Liliaceae, Polygonaceae, Rubiaceae ve Rhamnaceae gibi çoğu bitki ailesinde doğal olarak mevcuttur (Cheuk vd., 2015; Locatelli vd., 2009). Antakinon türevleri ister doğal olarak oluşum gösteren ister sentetik olsun uzun yıllardan beri boyar maddeler olarak kullanılmaktadırlar (Jacquemin vd., 2005). Hatta son zamanlarda olarak kullanılan amentatron ve mitoxantron antikanser ilacı olarak (Şekil 3) kullanılmaktadırlar (Cheuk vd., 2015; Xie vd., 2010; Chiang vd., 2010).



Şekil 3. Antikanser antitümör ajanları olarak kinizarin türevleri

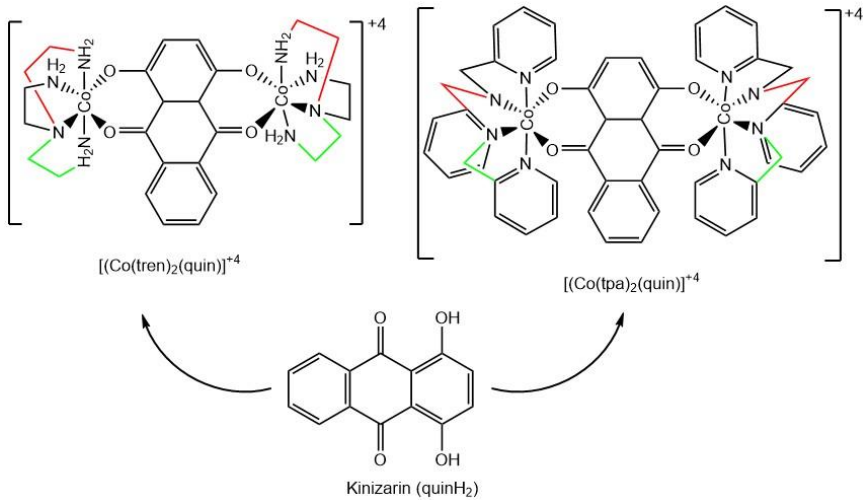
Kinizarin Türevlerinin Biyoaktif Özellikleri

Özellikle dihidroksiantrakinonlar hem doğal oluşum olarak bitki ve mantarlarda sıkça karşımıza çıkarken aynı zamanda sentetik türevleri de boyar madde ve ilaç etkin maddeleri olarak kaydedilmektedirler (Rossi vd., 2010).

Kinizarin diğer adıyla 1,4-dihidroksiantrakinon da diğer antrakinonlar gibi birçok alada kullanılmaktadır. Özellikle son zamanlarda yapılan çalışmalarda farmakolojik özellikleri kaydedilmiştir.

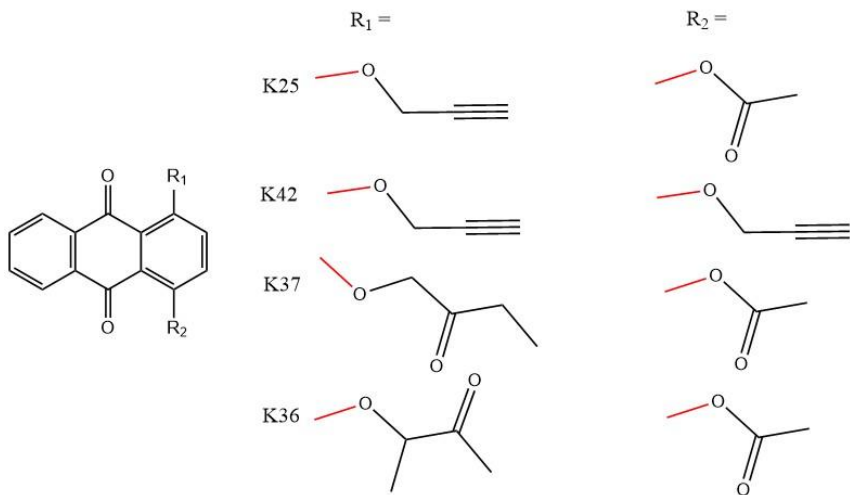
Örneğin, (Crlikova vd., 2020:339) yapılan çalışmada kinizarin, tren ve tpa ligandlarını içeren dinükleer Co(III) kompleks bileşiklerinin (Şekil 4) DNA bağlanma ve ayrılma testleri yapılmıştır.

Test verilerine göre özellikle birinci kompleks $[(Co(tren)_2(quin))]^{+4}$ daha sterik engelli olan ikinci kompleks $[(Co(tpa)_2(quin))]^{+4}$ ile kıyaslandığında DNA etkileşimi daha yüksek olduğu görülmüştür. Fakat antitümöral aktivite açısından ikinci kompleks bileşik daha aktiftir. Bu çalışma sonucu kinizarin ligandi içeren kobalt komplekslerinin oldukça dikkat çekici antitümöral ajanlar olabileceğini göstermektedir.



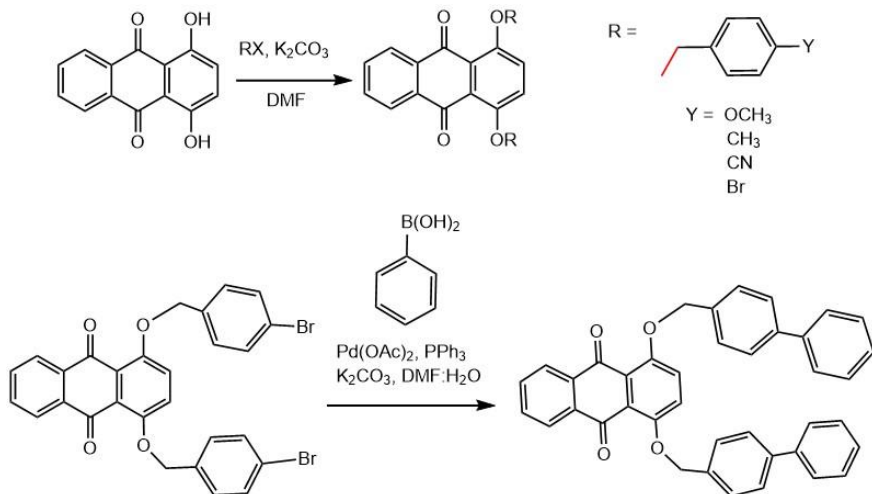
Şekil 4. Antitümöral ajanlar olarak kinizarin ligantlı kobalt kompleksleri

Bazı sentetik kinizarin türevleri HCV ve HIV-I polimeraz inhibitörü olarak test edildiklerinde özellikle propinoksi alkil grupları içeren K25 ve K42 numaralı bileşiklerin (Şekil 5) dikkate değer inhibisyon aktivitesi gösterdikleri kaydedilmiştir. Ayrıca K42 kısmi DNA etkileşimi göstermiştir (Tramontano vd., 2011:273-276).



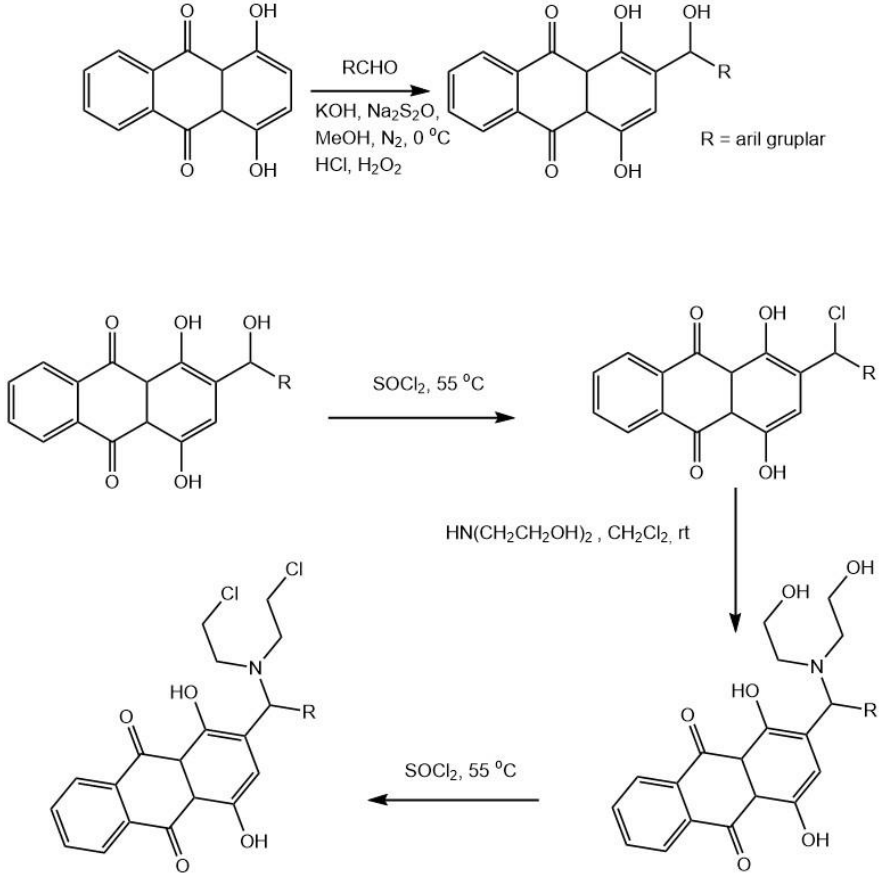
Şekil 5. Kinizarin türevi antiviral ajanlar

Çalışma grubumuz tarafından kaydedilen çalışmada ise (Parladı vd., 2022:158) sentezlenen 6 kinizarin türevinin (Şekil 6) yapısal özellikleri belirlendikten sonra bileşikler standart olarak allopri nolün kullanıldığı deneylerde ksantin oksidaz inhibitörü aktiviteleri ölçülmüştür. Deney verilerine göre süstitüent olarak 4-siyanobenziloksi ve 4-bromobenziloksi gruplarını içeren kinizarin türevleri allopri nolde n çok daha aktif ksantin oksidaz inhibisyon aktivitesi göstermişlerdir.



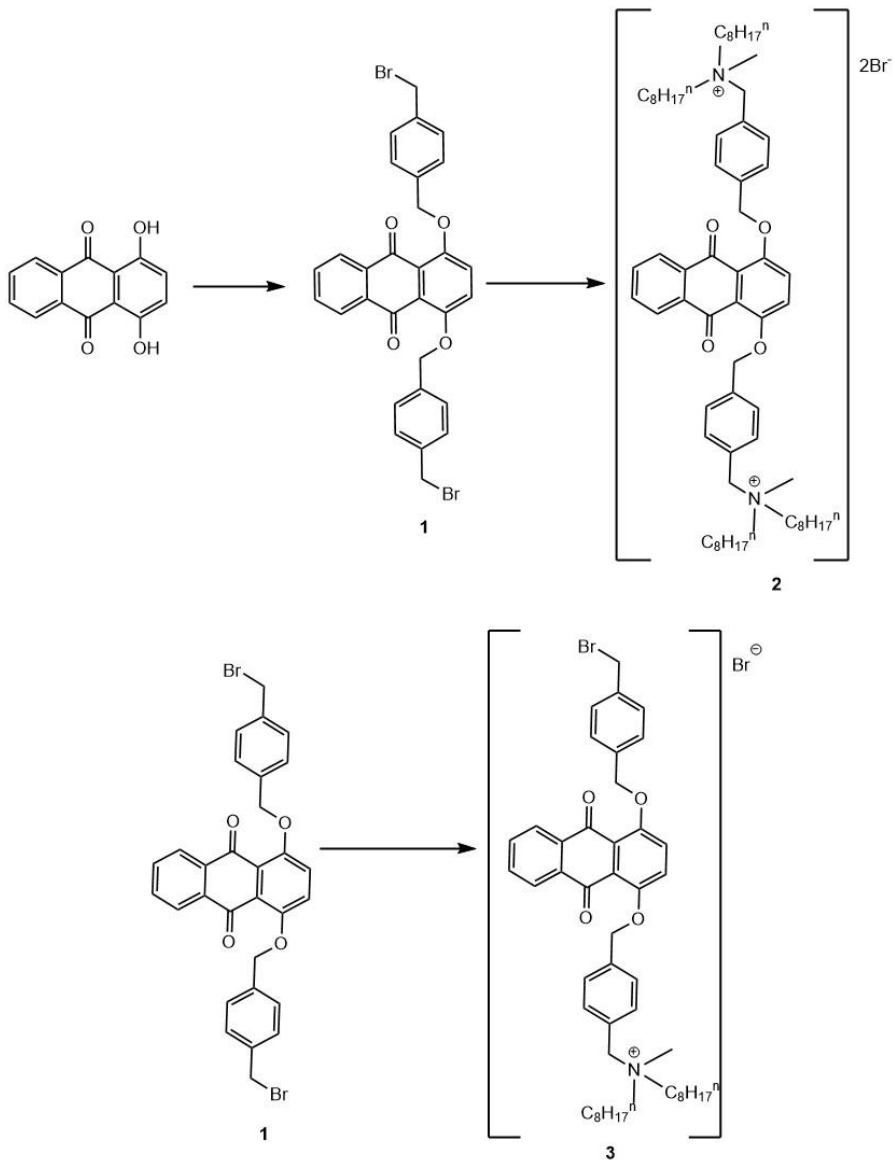
Şekil 6. Ksantin oksidaz inhibitörü kinizarin türevleri

Yeni sentezlenmiş 3-alkil-1,4-dihidroksiantrakinon türevleri (Şekil 7) HeLa, A549, CNE-1, MCF-7, MDA-MB-231 ve HepG-2 insan karaciğer kanseri, karşı antikanser aktiviteleri ölçülmüş (Liu vd., 2019:1120) ve 2-(*m*-diklorofenil-hidroksimetil)-1,4-dihidroksiantrakinon bileşiğinin bütün kanser hücre hatlarında en yüksek sitotoksik aktivite gösterdiği kaydedilmiştir.



Şekil 7. 3-Alkil-1,4-dihidroksiantrakinon türevlerinin sentezi (Liu vd., 2019:1120-1126)

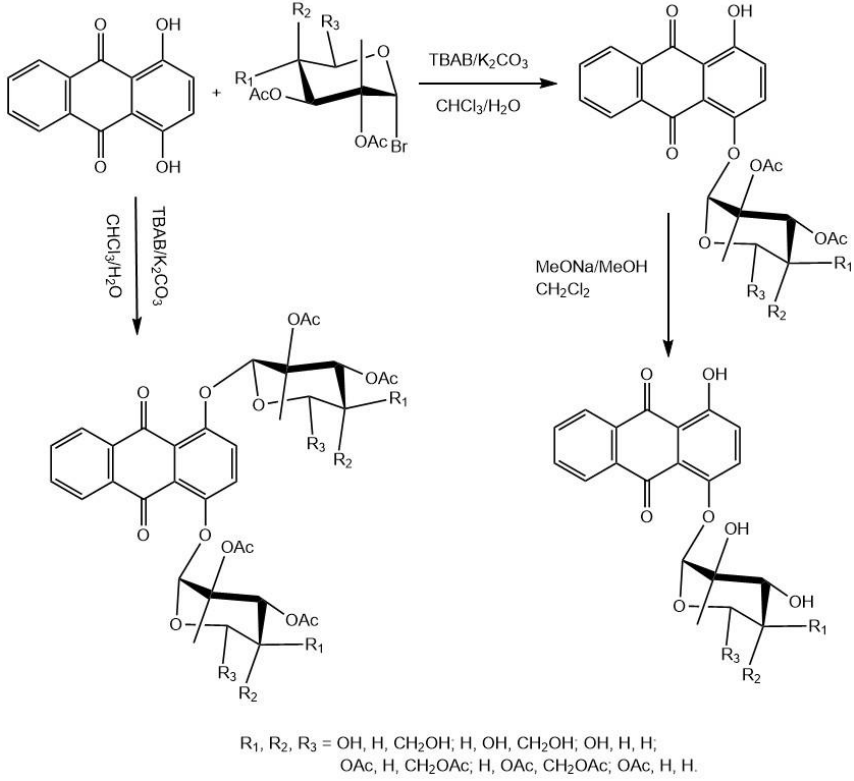
Bromometil benzil gruplarından yola çıkılarak sentezlenen kuaterner amonyum tuzu içeren bir grup kinizarin türevi sentezlenerek (Şekil 8) akut T lenfoblastik lösemi hücre hatlarına karşı antikanser aktiviteleri araştırılmıştır (Hu vd., 2019:1362-1369). Bileşik 3 en yüksek kanser hücrelerinin proliferasyonunu güçlü bir şekilde inhibe etmiştir.



Şekil 8. Kuaterner amonyum tuzu içeren kinizarin türevlerinin sentezi
(Hu vd., 2019:1362-1369)

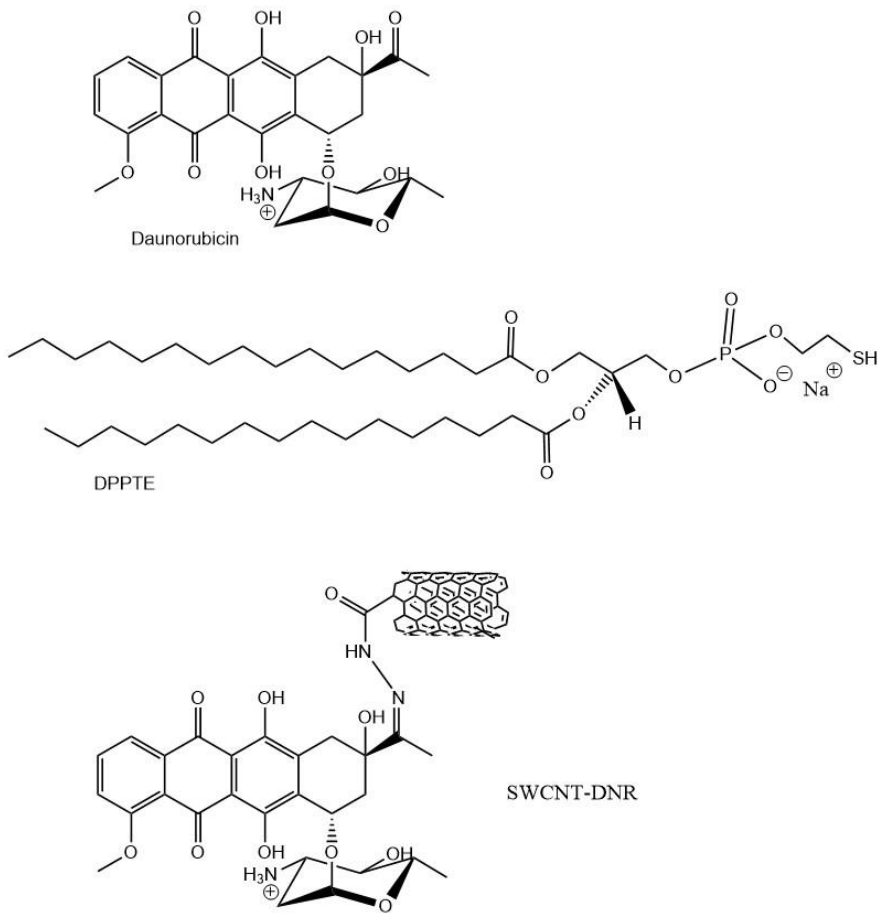
Kinizarinden glikozit grubu içeren yeni bir seri bileşik sentezlenmiş (Şekil 9) ve yapıları spektroskopik yöntemlerle aydınlatıldıktan sonra insan ve fare lösemi hücrelerine (HL-60 ve P388) karşı *in vitro* antitümöral etkileri test edilmiştir (Sun vd., 2008:4116). Monoglikozit ve diglikozit gruplara

sahip kinizarin türevlerinin genel olarak ılımlı düzeyde antitümöral etkinlik gösterdikleri gözlemlenmiştir.



Şekil 9. Glikozit bağlı kinizarin türevlerinin sentezi (Sun vd., 2008:4116-4124)

Son zamanlarda nanopartiküller yeni sistem ilaçların geliştirilmesinde önemli roller oynamaktadırlar. Daunorubisin (DAU) çeşitli kanser hücrelerinin inhibisyonunda etkili bir kanser ilacıdır. Yapılan çalışmada polimer bazlı DAU-nanopartikülü sentezlenmiş (Şekil 10) ve ilaç salınımları kontro edilmiştir. Artık klasik ajanlardan çok nanopartikül destekli ilaçların daha yararlı olacağı önerilmiştir (Pourmadadi vd., 2023:115547).



Şekil 10. Polimer destekli daunorubusin (Pourmadadi vd., 2023:115547)

SONUÇ

Bu araştırma sonucunda görülmektedir ki kinizarin olarak bilinen 1,4-dihidroksiantrakinon çekirdeği birçok farmakolojik etkiye sahip olmasının yanı sıra bu temel çekirdekten çıkılarak sentezlenen yeni kinizarin türevi bileşiklerin de oldukça yüksek biyoaktivitelere sahip oldukları kaydedilmiştir. Bu durum araştırma gruplarını ileride sentezi planlanan ve farmakolojik açıdan incelenecek olan yeni antrakinon türevlerini geliştirmek için cesaretlendirecektir.

REFERANSLAR

- Cheuk, D., Svard, M., Seaton, C., McArdle, P., ve Rasmuson, A.C. (2015). Investigation into solid and solution properties of quinizarin. *CrystEngComm*, 17, 3985-3997.
- Chiang, J.-H., Yang, J.-S., Ma, C.-Y., Yang, M.-D., Huang, H.-Y., Hsia, T.-C., Kuo, H.-M., Wu, P.-P., Lee, T.-H., ve Chung, J.-G. (2010). Danthron, an anthraquinone derivative, induces DNA damage and caspase cascades-mediated apoptosis in SNU-1 human gastric cancer cells through mitochondrial permeability transition pores and Bax-triggered pathways. *Chemical Research Toxicology*, 24, 20-29.
- Crlikova, H., Kostrhunova, H., Pracharova, J., Kozsup, M., Nagy, S., Buglyo, P., Brabec, V., ve Kasparkova, J. (2020). Antiproliferative, DNA binding, and cleavage properties of dinuclear Co(III) complexes containing the bioactive quinizarin ligand. *Journal of Biological Inorganic Chemistry*, 25, 339-350.
- Dai, J.-P., Wang, Q.-W., Su, Y., Gu, L.-M., Zhao, Y., Chen, X.-X., et al. (2017). Emodin inhibition of influenza A virus replication and influenza viral pneumonia via the Nrf2, TLR4, p38/JNK and NF-kappaB pathways. *Molecules* 22, 1754.
- Demselben (1840). Ueber verschiedene Verbindungen des Anthracen's. *Justus Liebigs Annalen der Chemie*, 34, 287-296.
- Duke, J.A. (1992). *Handbook of phytochemical constituents of GRAS herbs and other economic plants*. Boca Raton, FL: CRC Press (pp. 143-144).
- Fang, J.-Y., Huang, T.-H., Chen, W.-J., Aljuffali, I. A., and Hsu, C.-Y. (2022). Rhubarb hydroxyanthraquinones act as antiobesity agents to inhibit adipogenesis and enhance lipolysis. *Biomedicine and Pharmacotherapy*, 146, 112497.
- Graebe, C. (1890). Ueber Bildung von Chinalizarin aus Alizarin. *Berichte der Deutschhen Chemischen Gesellschaft*, 23, 3739-3740.
- Hu, X., Cao, Y., Yin, X., Zhu, L., Chen, Y., Wang, W., ve Hu, J. (2019). Design and synthesis of various quinizarin derivatives as potential anticancer agents in acute T lymphoblastic leukemia. *Bioorganic and Medicinal Chemistry*, 27, 1362-1369.
- Jacquemin, D., Preat, J., Wathélet, V., André, J.-M., ve Perpète, E.A. (2005). Substitution effects on the visible spectra of 1,4-diNHP-9,10-anthraquinones. *Chemical Physics Letters*, 405, 429-433.
- Liu, Y., Liang, Y., Jiang, J., qin, Q., Wang, L., ve Liu, X. (2019). Design, synthesis and biological evaluation of 1,4-dihydroxyanthraquinone derivatives as anticancer agents. *Bioorganic and Medicinal Chemistry*, 29, 1120-1126.
- Locatelli, M., Tammara, F., Menghini, L., Carlucci, G., Epifano, F. ve Genovese, S. (2009). Anthraquinone profile and chemical fingerprint of *Rhamnus saxatilis* L. from Italy. *Phytochemistry Letters*, 2, 223-226.
- Malik, E.M., Müller, C.E. (2016). Anthraquinones as Pharmacological Tools and Drugs. *Medicinal Research Reviews*, 36, 705-748.
- Malik, M.S., Alsantali, R.I., Jassas, R.S., Alsimaree, A.A., Syed, R., Alsharif, M.A., Kalpana, K., Morad, M., Althagafi, I.I., ve Ahmed, S.A. (2021). Journey of anthraquinones as anticancer agents a systematic review of recent literature. *RSC Advances*, 11, 35806-35827.

- Mech, J., Grela, M.A., ve Szacilowski, K. (2014). Ground and excited state properties of alizarin and its isomers. *Dyes and Pigments*, 103, 202-213.
- Parladi, U., Yılmaz, Ü., Noma, S.A.A., Ateş, B., Küçükbaş, H. (2022). Synthesis of new anthraquinone compounds and evaluation of their considerable xanthine oxidase inhibitory activities. *Arkivoc*, 9, 158-167.
- Pourmadadi, M., Ghaemi, A., Shamsabadipour, A., Rajabzadeh-Khosroshahi, M., Shaghaghi, M., Rahdar, A., ve Pandey, S. (2023). Nanoparticles loaded with Daunorubicin as an advanced tool for cancer therapy. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 258, 115547, 1-12.
- Qi, Y., Liu, Y., Zhang, B., Wang, M., Cao, L., Song, L., et al. (2022). Comparative antibacterial analysis of the anthraquinone compounds based on the AIM theory, molecular docking, and dynamics simulation analysis. *Journal of Molecular Modeling*, 29, 16, 1-14.
- Rossi, S., Tabolacci, C., Lentini, A., Provenzano, B., Carlomosti, F., Frezzotti, S., ve, Beninati, S. (2010). Anthraquinones Danthron and Quinizarin Exert Antiproliferative and Antimetastatic Activity on Murine B16-F10 Melanoma Cells. *Anticancer Research*, 30, 445-450.
- Sun, X., Ji, L., Ren, S., Wan, S., ve Jiang, T. (2008). Chemical Synthesis and In Vitro Antitumor Activity of Quinizarin Glycoside Analogs. *Synthetic Communications*, 38, 4116-4124.
- Tramontano, E., Kharlamova, T., Zinzula, L., ve Esposito, F. (2011). Effects of new quinizarin derivatives on both HCV NS5B RNA polymerase and HIV-1 reverse transcriptase associated ribonuclease H activities. *Journal of Chemotherapy*, 23(5), 273-276.
- Xia, W., Li, S., Li, L., Zhang, S., Wang, X., Ding, W., Ding, L., Zhang, X., ve Wang, Z. (2023). Role of anthraquinones in combating insulin resistance. *Frontiers in Pharmacology*, 14, 1275430, 1-16.
- Xie, G.E., Zhu, X., Li, Q., Gu, M., He, Z., Wu, J., Li, J., Lin, Y., Li, M., ve She, Z. (2010). SZ-685C, a marine anthraquinone, is a potent inducer of apoptosis with anticancer activity by suppression of the Akt/FOXO pathway. *British Journal of Pharmacology*, 159, 689-697.
- Xie, P., Yan, L.-J., Zhou, H.-L., Cao, H.-H., Zheng, Y.-R., Lu, Z.-B., et al. (2022). Emodin protects against lipopolysaccharide-induced acute lung injury via the JNK/Nur77/c-Jun signaling pathway. *Frontiers in Pharmacology*, 13, 717271.
- Xin, D., Li, H., Zhou, S., Zhong, H., Pu, W. (2022). Effects of Anthraquinones on Immune Responses and Inflammatory Diseases. *Molecules*, 27, 3831, 1-25.
- Yen, G-C., Duh, P-D., Chuang, D-Y. (2000). Antioxidant activity of anthraquinones and anthrone. *Food Chemistry*, 70, 437-441.
- Zhang, H., Yi, J.-K., Huang, H., Park, S., Park, S., Kwon, W., et al. (2021). Rhein suppresses colorectal cancer cell growth by inhibiting the mTOR pathway in vitro and in vivo. *Cancers (Basel)* 13, 2176, 1-20.

***Ajuga orientalis* L., Lamiaceae
(Ballıbabagiller) Bitkisinin Morfolojik,
Ekolojik Ve Ekonomik Önemi**

Derviş ÖZTÜRK¹

1- Doç. Dr.; Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mahmutiye Atıcılık MYO Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü. dervisozturkk@gmail.com ORCID No: 0000-0001-7189-7407

ÖZET

Ajuga orientalis* L.**, Lamiaceae (Ballıbabagiller) familyasına ait, geniş bir coğrafi yayılışa sahip çok yıllık bir otsu bitkidir. Morfolojik olarak rozet şeklinde taban yaprakları, genellikle morumsu-mavi çiçekleri ve glandüler trikomlarla kaplı gövdeleriyle tanınır. Bitki, taşlık ve bozkır habitatlarına özgü olarak, 500-2000 metre rakımlarda yetişir ve kurak koşullara adaptasyon yeteneği gösterir. Ekolojik açıdan, toprak stabilizasyonu sağlaması ve polinatörlere sunduğu zengin nektar kaynağıyla önem taşır. Ekonomik anlamda, ***Ajuga orientalis, geleneksel tıpta yara iyileştirici, antiseptik ve iltihap önleyici özellikleriyle kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, bitkinin biyolojik olarak aktif bileşenleri farmakolojik çalışmalarda değerlendirilmektedir. Peyzaj düzenlemelerinde, düşük su ihtiyacı ve estetik görünümü nedeniyle de tercih edilmektedir.

Anahtar Kelimeler – *Ajuga orientalis*, morfoloji, ekoloji, lamiaceae, ekonomi

GİRİŞ

Ajuga orientalis L., Lamiaceae (Ballıbabagiller) familyasına ait çok yıllık otsu bir bitkidir. Türkiye ve çevresindeki Akdeniz havzasında doğal olarak bulunan bu tür, hem ekolojik hem de estetik değeri yüksek bir bitkidir. Halk arasında "şalba" ya da "yer çiçeği" gibi adlarla bilinir. Çeşitli habitatlara uyum sağlayabilmesi ve toprak stabilizasyonuna katkısı nedeniyle dikkat çekmektedir. Bu çalışmada, *Ajuga orientalis*'in temel morfolojik, ekolojik ve ekonomik özellikleri detaylandırılacaktır.



Şekil 1. *Ajuga orientalis* L. Habitattaki Genel Görünüşü

Morfolojik Özellikler

Morfolojik Özellikler

1.Kök Sistemi

Ajuga orientalis L., kazık köklü bir bitkidir. Kök sistemi genellikle yüzeye yakındır ve toprak yüzeyini örterek erozyonu önlemede önemli rol oynar. Kökler ince ve dallanmış yapıdadır. *A. orientalis* L. 'in kök sistemi genellikle kazık kök yapısına sahiptir. Ancak yüzeye yayılan ince yan kökler, bitkinin toprak yüzeyini sabitleme yeteneğini artırır. Bu özellik, özellikle eğimli alanlarda toprak erozyonunu önlemede oldukça faydalıdır.

Kök uzunluğu: Ortalama 10-20 cm.

Toprak derinliği: 5-15 cm arasında kökleme yapabilir.

Renk: Genç kökler beyazımsı, olgun kökler açık kahverengidir.

2.Gövde

Bitkinin gövdesi dik veya hafifçe yayılmış durumdadır. Yüzeyi tüylü olup genellikle dört köşeli bir yapı sergiler. Gövdenin rengi genç bitkilerde yeşilken, yaşlandıkça kahverengimsi tonlara dönebilir. Gövde boyu 20-50 cm arasında değişmektedir. *A. orientalis* L. gövdesi, Lamiaceae familyasının tipik özelliklerini taşır.

Gövde yapısı: Dört köşeli, zayıf köşeler bazen yuvarlaklaşabilir.

Gövde yüzeyi: Yüzey, yoğun kısa tüylere sahiptir. Bu tüyler hem buharlaşmayı azaltır hem de çevresel streslere karşı koruma sağlar.

Uzunluk: 15-50 cm arasında değişir, ancak besin maddesi zengin alanlarda bu uzunluk 60 cm'ye kadar ulaşabilir.

Renk: Gençken açık yeşil, yaşlandıkça morumsu kahverengi.

3.Yapraklar

Yapraklar rozet formunda tabanda yoğunlaşmıştır ve gövde boyunca daha seyrek yerleşmiştir. Yaprakların şekli genellikle eliptik ile ters yumurtamsıdır. Yaprak kenarları düzensiz dişlidir, yüzeyi ise hafif tüylüdür. Yapraklar 4-10 cm uzunluğunda ve 1-3 cm genişliğinde olabilir. Yaprak sapı kısa veya yok denecek kadar azdır. *Ajuga orientalis*'in yaprakları gövde boyunca spiral şekilde dizilmiştir ve tabanda yoğunlaşan rozet şeklinde yapraklarla dikkat çeker.

Şekil: Eliptik ile ters yumurtamsı.

Yaprak kenarları: Düz veya kaba dişlidir.

Boyut: Tabandaki yapraklar 10-15 cm uzunluğunda, üst kısımdakiler ise 4-8 cm arasındadır.

Yaprak yüzeyi: Alt yüzey tüylü ve damarlar belirgindir. Üst yüzey ise parlak yeşildir.

Yaprak sapı: Tabandaki yapraklar genellikle kısa saplı, üst yapraklar ise sapsızdır.

Tablo 1: *A. orientalis* Li mevcut çalışmadaki morfolojik sonuçları ile Flora of Turkey (Davis, 1982) çalışmasındaki bulguların karşılaştırması

Morfolojik Özellikler	Mevcut Çalışma	Flora of Turkey (Davis, 1982)
Bitki Formu	Çok yıllık, otsu	Çok yıllık, otsu
Boy	10-25 cm	15-30 cm
Gövdeler	Tabanda dallanmış, genellikle tüylü	Tabanda dallanmış, genellikle tüylü
Yapraklar	Taban yaprakları rozet şeklinde, eliptik	Taban yaprakları rozet şeklinde, geniş-eliptik
Çiçek Rengi	Genellikle morumsu	Genellikle morumsu-mavi
Çiçek Durumu	Çiçekler yoğun başaklar halinde	Çiçekler yoğun başaklar halinde
Çanak Yapraklar	Yeşil, tüylü	Yeşil, tüylü
Taç Yapraklar	İki dudaklı, alt dudak oldukça geniş	İki dudaklı, alt dudak geniş
Trikomlar (Tüyler)	Yoğun glandüler	Yoğun glandüler ve basit tüyler
Habitat	Step alanlar	Step alanlar, taşlık yamaçlar

4.Çiçekler

Çiçek yapısı, *A. orientalis* L. en dikkat çekici özelliklerinden biridir.

Dizilim: Çiçekler, başak şeklinde düzenlenmiştir.

Renk: Mor, mavi veya nadiren beyaz.

Çiçek boyutu: Her çiçek yaklaşık 1-2 cm uzunluğundadır.

Çanak yapraklar: 5 parçalı, yeşil ve ince tüylüdür.

Taç yapraklar: İki dudaklıdır. Üst dudak küçüktür veya yoktur; alt dudak üç parçalı ve yayvandır.

Erkek organlar: 4 adet stamen bulunur ve bunlar çiçek borusunun içinde gizlidir.

Dişi organ: Bir adet uzun ve ince pistil bulunur.

A. orientalis L. meyveleri, sert bir kapsül içinde toplanan küçük tohumlardan oluşur.



Şekil 2. *A. orientalis* L. Habitattaki Genel Görünüşü

Ajuga orientalis'in çiçekleri belirgin ve gösterişlidir. Çiçekler başak şeklinde dizilim gösterir ve mavi, mor veya eflatun tonlarında olabilir. Çiçekler iki dudaklı yapıdadır; üst dudak küçüktür veya tamamen yoktur, alt dudak ise geniş ve üç parçalıdır. Çiçeklenme dönemi genellikle Nisan ve Haziran ayları arasındadır.

5.Meyve ve Tohumlar

Meyveleri küçük ve sert yapılı dört adet tohum içerir. Bu tohumlar bitkinin yayılmasında rol oynar. Tohumların yüzeyi pürüzlüdür ve kahverengimsi bir renk alır. Meyve tipi: Tetrachene (4 parçalı).

Tohum boyutu: 2-3 mm uzunluğunda.

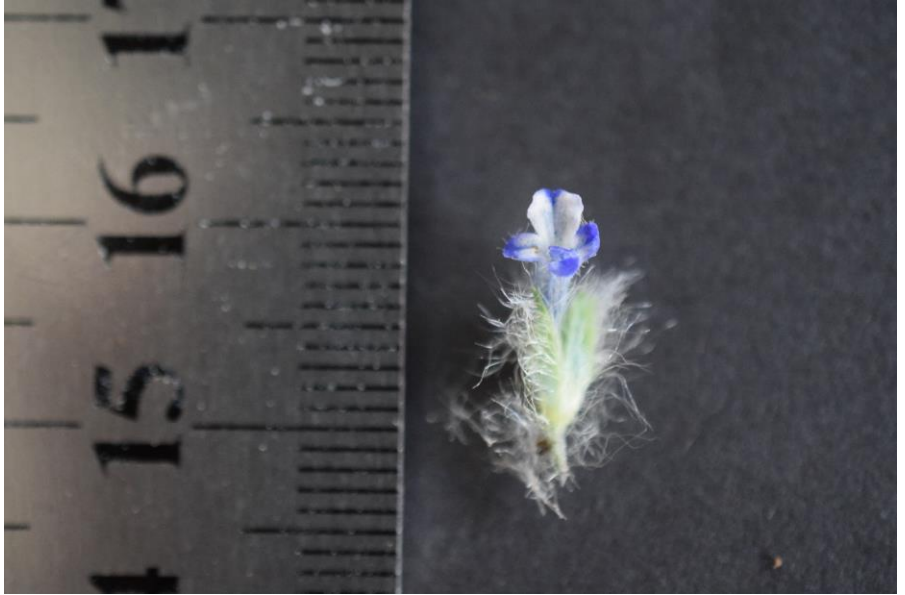
Tohum yüzeyi: Pürüzlü ve mat görünümlü.

Renk: Kahverengi ile koyu kahverengi arasında değişir.

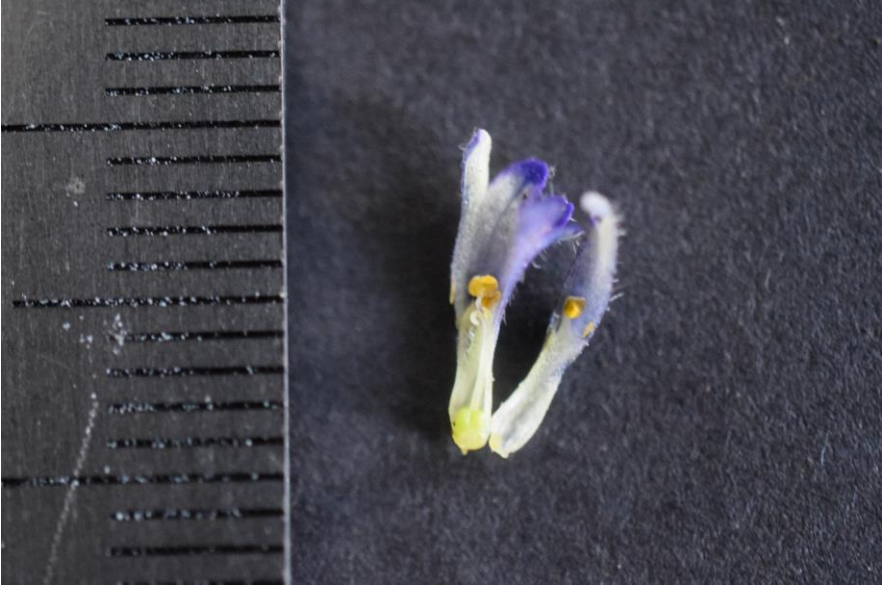
Tohum yayılımı: Karınca dispersiyonu (myrmecochory) ve su ile taşınma yoluyla gerçekleşir.



Şekil 3. *A. orientalis* L. Genel Görünüşü



Şekil 4. *A. orientalis* L. Çiçek Görünüşü



Şekil 5. *A. orientalis* L. Çiçek Yapısının Genel Görünüşü



Şekil 6. *A. orientalis* L. Yaprak Alt Yüzey Görünüşü



Şekil 7. *A. orientalis* L. Yaprak Üst Yüzey Görünüşü

6. Ekolojik ve Ekonomik Önemi

A. orientalis L., toprak stabilizasyonu ve erozyon kontrolünde etkili bir bitkidir. Aynı zamanda süs bitkisi olarak da kullanılır. Halk hekimliğinde anti-inflamatuar ve yara iyileştirici özelliklerinden faydalandığı bilinmektedir. Ancak, bu türün aşırı otlatma ve habitat kaybı nedeniyle yerel olarak tehdit altında olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. *A. orientalis* L., çeşitli ekolojik streslere uyum sağlama yeteneğine sahiptir.

Kuraklık toleransı: Yapraklardaki tüyler su kaybını azaltır.

Işık adaptasyonu: Hem tam güneşte hem de yarı gölgede büyüebilir.

Toprak toleransı: Kumlu, kireçli ve killi topraklarda yaşayabilir.

Habitat: Bozkır, makilik ve taşlık alanlarda yaygındır.

Tıbbi Kullanım ve Fitoterapötik Potansiyeli

Ajuga orientalis, geleneksel tıpta kullanılan bir bitki olup, modern fitoterapide de ilgi görmektedir.

Yara İyileştirici: Bitkinin yapraklarından ve köklerinden elde edilen ekstraktlar, halk arasında yara ve yanık tedavisinde kullanılmaktadır.

Antienflamatuar Özellikler: Bitki, enflamasyonu azaltıcı özellikler göstermiştir ve bu özelliği çeşitli laboratuvar çalışmaları ile desteklenmektedir.

Antibakteriyel ve Antifungal: Yapraklardan elde edilen uçucu yağların bazı patojenik bakterilere ve mantarlara karşı etkili olduğu belirlenmiştir.

Potansiyel Farmasötik Ürünler: Ajuga orientalis'ten elde edilen bileşiklerin fitokimya araştırmalarında kullanılabilirliği, farmasötik endüstride yeni ürün geliştirilmesine olanak tanıyabilir.

Süs Bitkisi Olarak Kullanım

Ajuga orientalis, estetik görünümü ve düşük bakım gereksinimi nedeniyle peyzaj mimarisi ve bahçe tasarımında tercih edilmektedir.

Yer Örtücü Bitki: Hızlı yayılan yapısı sayesinde toprak örtüsü olarak kullanılır, özellikle erozyon riski olan alanlarda toprağı sabitlemede etkilidir. Çiçek Renkleri: Mavi, mor ve bazen beyaz tonlarındaki çiçekleri, bahçelerde ve park alanlarında görsel bir cazibe oluşturur.

Kuraklığa Dayanıklılık: Ajuga orientalis'in düşük su gereksinimi, su kıtlığı yaşayan bölgelerde peyzaj uygulamaları için ekonomik bir seçenek haline getirir.

Çevresel ve Ekolojik Katkılar

Ajuga orientalis'in ekolojik faydaları, dolaylı olarak ekonomik bir değer yaratmaktadır.

Erozyon Kontrolü: Bitkinin yüzeye yayılan kök sistemi, özellikle eğimli alanlarda toprak kaybını önler. Bu, tarım alanlarında ve meralarda uzun vadeli ekonomik fayda sağlar.

Arı ve Polinatör Çekimi: Çiçekleri, bal arıları ve diğer polinatörler için besin kaynağıdır. Bu durum, yerel bal üretimini ve ekosistemin dengesini olumlu etkiler.

Biyolojik Çeşitlilik: Ajuga orientalis, doğal habitatlarda başka bitki ve hayvan türlerinin varlığını destekleyerek ekosistem sağlığını artırır.

Tarım ve Hayvancılık

Ajuga orientalis, bazı bölgelerde tarım ve hayvancılıkla ilgili ekonomik faydalar sağlamaktadır:

Meralar: Ajuga orientalis, bazı meralarda otlatma bitkisi olarak kullanılmaktadır. Özellikle erken ilkbaharda besin açısından zengin genç sürgünleri, küçükbaş hayvanlar için besin kaynağı oluşturabilir.

Organik Tarım: Toprağı koruma özelliğı, organik tarım alanlarında bitki örtüsü olarak kullanılmasını sağlar.

Kozmetik ve Aromaterapi Sektörü

Bitkiden elde edilen uçucu yağlar, kozmetik ve aromaterapi ürünlerinde kullanılma potansiyeline sahiptir.

Nemlendirici Ürünler: Yaprak ekstrelerinden elde edilen bileşikler, cilt bakım ürünlerinde nemlendirici olarak kullanılabilir.

Aromaterapi: Bitkinin uçucu yağları, rahatlatıcı ve stres azaltıcı etkileriyle aromaterapi ürünlerinde değerlendirilebilir.

Potansiyel Ürün Geliştirme

Ekstrakt ve Yağ Üretimi: Bitkinin yapraklarından ve çiçeklerinden elde edilen ekstraktlar, tıbbi ve kozmetik ürünlerin geliştirilmesinde hammadde olarak kullanılabilir.

Doğal Boya: Çiçeklerinden elde edilen pigmentler, doğal tekstil boyası veya el sanatlarında renk verici olarak kullanılabilir.

A. orientalis L., morfolojik çeşitliliği ve ekolojik adaptasyonları ile birçok ekosistemde önemli roller üstlenen bir bitkidir. Bu türün özellikle erozyon kontrolü, süs bitkisi olarak kullanım ve tıbbi potansiyeli üzerine daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Bu inceleme, *A. orientalis* L. ayrıntılı morfolojik özelliklerini öne çıkararak türün korunması ve sürdürülebilir kullanımı için bilimsel bir temel sağlamayı amaçlamaktadır. Bitkinin bilimsel olarak daha fazla araştırılmasının önemini vurgulamıştır.

KAYNAKLAR

- Çelik, S., & Yılmaz, H. (2018). *Ajuga orientalis*'in fenolik içerikleri ve biyolojik aktiviteleri üzerine bir inceleme. *Türk Biyoloji Dergisi*, 45(2), 123-134.
- Davis, P.H. (1982). *Flora of Turkey and the East Aegean Islands*. Edinburgh University Press.
- Dönmez, Ş. (2018). Göller Bölgesinde Yayılış Gösteren Lamiaceae Familyasına Ait 4 Bitkinin Peyzaj Mimarlığında Kullanım Olanaklarının Belirlenmesi (Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi).
- Dönmez, Ş., & Önal, F. (2019). Germination ability and biochemical properties of *Ajuga chamaepitys* subsp. *chia* var. *chia* and *Ajuga orientalis* cultivated in climatic conditions in Lake District, Turkey. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(2), 3837-3848. https://doi.org/10.15666/aeer/1702_38373848
- Güner, A., Özhatay, N., Ekim, T., & Başer, K.H.C. (2000). *Türkiye Bitkileri Listesi (Flora of Turkey Checklist)*. İstanbul: Flora Araştırma Derneği ve Nezahat Gökyiğit Botanik Bahçesi Yayınları.
- İonuş, E. (2021). Evaluation of the chemical composition of *Ajuga chamaepitys* (L.) Schreb. from the spontaneous flora of Romania. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*, 64(1), 357-362.
- Kaya, A. (2021). Geographical variation of *Ajuga orientalis* L. trichome, nutlet and pollen. *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology C - Life Sciences and Biotechnology*, 10(2), 102-110. <https://doi.org/10.18036/estubtdc.701694>

- Kuyumcu, E., & Kırmızıbekmez, H. (2013). Essential oil composition from the aerial parts of *Ajuga orientalis* L. growing in Turkey. *Asian Journal of Chemistry*, 25(9), 5077-5079.
- Metcalf, C.R., & Chalk, L. (1950). *Anatomy of the Dicotyledons*. Oxford: Clarendon Press.
- Savaş, A. N., Hacıoğlu, N., & Demir, N. (2023). Investigation of some biological activities of *Ajuga chamaepitys* subsp. *chia* (Schreb.) Arcang. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(1), 162-169. <https://doi.org/10.21597/jist.1202158>
- Stojanović, G., Radulović, N., Hashimoto, T., & Palić, R. (2009). Composition of essential oils from two varieties of *Ajuga chamaepitys* subsp. *chia* from Turkey. *Journal of Essential Oil Research*, 21(1), 1-5.
- Yıldırım, F., & Kaya, E. (2017). Peyzaj uygulamalarında *Ajuga* türlerinin kullanımı ve ekolojik adaptasyonları. *Ekolojik Bitkiler Araştırma Dergisi*, 12(3), 67-74.

***Vinca major* L. Bitkisinin Morfolojik ve Ekonomik Önemi**

Derviş ÖZTÜRK¹

1- Doç. Dr.; Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mahmudiye Atıcılık MYO Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü. dervisozturkk@gmail.com ORCID No: 0000-0001-7189-7407

ÖZET

Vinca major L., Apocynaceae familyasına ait, genellikle Akdeniz iklimine uyum sağlamış, herdem yeşil ve otsu bir bitki türüdür. Familya için önemli sayılan *Vinca* L. (Cezayir menekşesi) cinsine ait Anadolu'da 2 tanesi endemik olmakla birlikte 6 takson bulunmaktadır. *Vinca major* L. Akdeniz iklimine uyum sağlamış, herdem yeşil bir bitki türü olup hem peyzaj hem de tıbbi kullanım alanlarında önemli bir yere sahiptir. Morfolojik açıdan, oval yaprakları, mor-mavi renkli çiçekleri ve sürünücü gövdesiyle dikkat çeker. *Vinca major* subsp. *hirsuta*, Apocynaceae familyasından çiçekleri morumsu-beyaz renkte, yaprakları herdem yeşil kalan bir bitkidir. Yaprak sapı yoğun tüylüdür ve tüyler uzundur. Bitki, toprak stabilizasyonu sağlayarak ekolojik faydalar sağlarken, farmakolojik özellikleri sayesinde geleneksel tıpta yaygın olarak kullanılır. Ülkemizde *Vinca* türleri süs bitkisi olarak yetiştirilmektedir.

Anahtar Kelimeler – Vinca major, morfoloji, ekoloji, apocynaceae, ekonomi

GİRİŞ

Vinca major L., Apocynaceae familyasına ait, genellikle Akdeniz iklimine uyum sağlamış, herdem yeşil ve otsu bir bitki türüdür. Halk arasında genellikle "büyük cıngırık" veya "büyük pervaneçiçek" olarak bilinir. Hem bahçecilikte hem de geleneksel tıpta önemli bir yere sahiptir. *Vinca major* L. bitkisinin morfolojik özelliklerini ve ekonomik önemini ele almaktadır. *Vinca major* subsp. *hirsuta*, Apocynaceae familyasından çiçekleri morumsu-beyaz renkte, yaprakları herdem yeşil kalan bir bitkidir (Gilkey 1957). Yaprak sapı yoğun tüylüdür ve tüyler uzundur. *Vinca major* L. Türkiye'nin Orta ve Doğu Karadeniz bölgelerinde ve Kafkaslar'da yetişmektedir (Stearn 1978). Ülkemizde *Vinca* türleri süs bitkisi olarak yetiştirilmektedir.

Üç fitocoğrafik bölgenin kesişim noktasında bulunan ülkemiz, coğrafik yapısından dolayı zengin bir bitki çeşitliliğine sahiptir. Bu çeşitliliğe etken olan en önemli maddelerin başında iklim ve coğrafik yapı gelmektedir. Subtropik bir iklimde olan Anadolu , jeolojik zamanlar boyunca Asya, Avrupa ve Afrika kıtaları arasında önemli bir doğal geçiş yolu (köprü) olmuştur. Endemik bitki bakımından da büyük bir zenginlik göstermektedir. Anadolu bu diyagonal içerisinde endemik tür bakımından Avrupa kıtasıyla neredeyse aynı sayıya sahiptir. Ülkemiz de her geçen gün artan floristik çalışmalar ile yeni türler bulunmakta ve bu yeni kayıtların önemli bir kısmını etnobotanik öneme sahip türler oluşturmaktadır. Tüm bu veriler ışığında ülkemiz için önemli olan familyaların başında Apocynaceae familyası gelmektedir. Familya için önemli sayılan *Vinca* L. (Cezayir menekşesi) cinsine ait Anadolu 'a 2 tanesi endemik olmakla birlikte 6 takson

bulunmaktadır. Bu cins etnobotanik öneminden dolayı tıp, eczacılık, farmakognozik, farmakolojik ve antikanser gibi çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Halk arasında *Vinca major*'e büyük cezayir menekşesi denilmektedir. Ülkemizde *Vinca major* bitkisinin yaprakları kabız, idrar söktürücü, ateş düşürücü ve iştah açıcı olarak kullanılmaktadır (Baytop 1984).

Morfolojik Özellikler

Vinca major L., belirgin morfolojik özelliklere sahiptir. Aşağıdaki tabloda detaylı şekilde özellikler verilmiştir.



Şekil 1: *Vinca major* L. Genel Görünüş

Tablo 1: *Vinca major* L. morfolojik veriler

Morfolojik özellik	Flora of Davis' e göre bulgular
Yapraklar	Oval şeklinde, parlak yeşil renkte ve kenarları düzdür. Yaprak boyutları 4-9 cm uzunluğunda, 2-5 cm genişliğindedir. Alt yapraklar daha küçük olup, saplıdır.
Gövde	Sürünücü ve nodlardan köklenme yeteneği gösterir. Yoğun bitki örtüsü oluşturur ve hızlı yayılma kapasitesine sahiptir. Gövdeler tüylü ya da hafifçe pürüzlüdür.
Çiçekler	Tekil çiçekler, mor-mavi renklidir. Taç yapraklar pervane şeklinde dizilmiştir. Çiçek çapı genellikle 3-5 cm arasındadır. Çiçek sapları ince ve uzundur.
Çiçeklenme Dönemi	İlkbahar başlangıcından yaz ortasına kadar devam eder. Sıcak bölgelerde çiçeklenme daha uzun sürebilir.
Meyve ve Tohumlar	Meyve kapsül tipi olup içerisinde küçük taneli tohumlar bulunur. Tohumlar genellikle az gelişir, bu nedenle vegetatif üreme baskındır. Meyve boyutları 1-2 cm arasındadır.
Kök Sistemi	Yüzeyel kök sistemi, toprağı tutma kapasitesini artırır. Nodlardan gelişen adventif kökler yayılma kapasitesine katkı sağlar.
Habitat	Nemli, gölge alanlarda ve kısmen güneşe açık yerlerde yetişir. Toprak seçiciliği azdır, ancak organik maddece zengin toprakları tercih eder.
Yapraklar	Oval şeklinde, parlak yeşil renkte ve kenarları düzdür. Yaprak boyutları 4-9 cm

Gövde	uzunluğunda, 2-5 cm genişliğindedir. Alt yapraklar daha küçük olup, saplıdır. Sürünürücü ve nodlardan köklenme yeteneği gösterir. Yoğun bitki örtüsü oluşturur ve hızlı yayılma kapasitesine sahiptir. Gövdeler tüylü ya da hafifçe pürüzlüdür.
Çiçekler	Tekil çiçekler, mor-mavi renklidir. Taç yapraklar pervane şeklinde dizilmiştir. Çiçek çapı genellikle 3-5 cm arasındadır. Çiçek sapları ince ve uzundur.

Çiçek Yapısı

Tekil çiçekler, mor-mavi renklidir. Taç yapraklar pervane şeklinde dizilmiştir. Çiçek çapı genellikle 3-5 cm arasındadır. Çiçek sapları ince ve uzundur.



Şekil 2. *Vinca major* L. Çiçek Yapısı

Ekonomik Önemi

Vinca major L., çeşitli alanlarda ekonomik öneme sahiptir:

1. Peyzaj ve Bahçecilik:

Toprak örtüsü bitkisi olarak yaygın bir şekilde kullanılır.

Erozyonu önlemek için yamaç alanlarda tercih edilir.

Düşük bakım ihtiyacı ve gölgeye toleransı nedeniyle bahçelerde popüler bir süs bitkisidir.

2. Tıbbi Kullanımlar:

Bitki, alkaloidler (vinkamin) içerir. Bu bileşikler, kan dolaşımını destekleyici etkileriyle bilinir.

Geleneksel tıpta hipertansiyon, hafıza bozuklukları ve migren tedavisinde kullanılmıştır.

Modern farmakolojide nootropik ilaçların ham maddesi olarak öne çıkar.

3. Ekolojik Faydalar:

Toprağın nemini koruma yeteneği sayesinde, kurak alanlarda mikroiklim oluşturur.

Sürünücü yapısı ile yabancı otları baskılar ve toprak stabilizasyonu sağlar.

4. Zararlı Etkiler:

Hızlı yayılma potansiyeli nedeniyle invaziv bir bitki olarak kabul edilir. Bazı ekosistemlerde diğer bitki türlerini baskılayabilir.

SONUÇ

Vinca major L., morfolojik özellikleri ve ekonomik önemi nedeniyle dikkat çeken bir bitki türüdür. Peyzaj tasarımında ve geleneksel tıpta sağladığı

faýdaların yanı sıra, Gelecekteki çalışmalar, bu bitkinin biyoteknolojik ve ekolojik kullarımlarını daha iyi anlamaya yönelik olmalıdır.

REFERANSLAR

- Baytop, T. (1984). *Türkiye’de Bitkiler ile Tedavi Geçimişte ve Bugün*. İstanbul: Nobel Tıp Kitabevleri
- Boğa, M. (2007). Türkiye’de Yetişen *Vinca* Türlerinin Antioksidan Aktivitelerinin Tayini. İstanbul Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü. Yüksek Lisans Tezi.
- Çelik, A., & Yılmaz, Ö. (2020). *Vinca* major ve diğer invaziv bitkilerin ekolojik etkileri. *Ekoloji Dergisi*, 29(115), 72-80.
- Davis, P. H. (1982). *Flora of Turkey and the East Aegean Islands* (Vol. 7). Edinburgh University Press.
- Duke, J. A. (2002). *Handbook of Medicinal Herbs*. CRC Press.
- Gilkey H (1957) *Weeds of the Pacific Northwest*, Oregon State College, OR
- Güner, A. (2012). *Türkiye Bitkileri Listesi (Damarlı Bitkiler)*. İstanbul: Nezahat Gökyiğit Botanik Bahçesi Yayınları Flora Dizisi 1, 84-85.
- Güner, A. (2018). *Resimli Türkiye Florası 2*. İstanbul: ANG Vakfı Nezahat Gökyiğit Botanik Bahçesi Yayınları, 27, 31, 39, 43.
- Koyuncu, M. (2011). A new species of *Vinca* (Apocynaceae) from eastern Anatolia, Turkey, *Turkish Journal of Botany*, 36, 247-251.
- Koyuncu, M., Ekşi, G., Gençler Özkan, A.M. (2015). *Vinca ispartensis* (Apocynaceae), a New Species from Turkey, *Annales Botanici Fennici*, 52, 340-344.
- Köse, N., & Gökbulut, Ş. (2018). *Vinca* major bitkisinin biyoaktif bileşenlerinin farmakolojik etkileri. *Anadolu Doğa Bilimleri Dergisi*, 3(2), 45-50.
- Özhatay, N., Kültür, Ş., Gürdal, B. (2013). Check-List of Additional Taxa to The Supplement Flora of Turkey VI, *İstanbul Eczacılık Fakültesi Dergisi*, İstanbul, 43(1), 33-82.

Özhatay, N., Kültür, Ş., Gürdal, B. (2017). Check-List of Additional Taxa to The Supplement Flora of Turkey VIII, *Istanbul Journal of Pharmacy*, 47 (1): 31-46.

Stearn W T (1978) Davis P H, ed. Flora of Turkey and the East Aegan Islands 6, Edinburgh, University Press, pp. 161-163.

İşletmelerin Sürdürülebilirlik Raporlarının Türkiye Sürdürülebilirlik Raporlama Standartları (TSRS)’na Uyum Düzeyinin Değerlendirilmesi

İncilay SAVAŞ¹

Ahmet Eren YILDIRIM²

- 1- Doç. Dr.; Uşak Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Fakültesi Muhasebe ve Finans Yönetimi Bölümü, incilay.savas@usak.edu.tr , ORCID No: 0000-0002-7763-3397
- 2- Doç. Dr.; Uşak Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Fakültesi Finans ve Bankacılık Bölümü, ahmet.yildirim@usak.edu.tr, ORCID No:0000-0002-2405-3081

ÖZET

Küreselleşmenin yaşamı tüm boyutlarıyla etkilediği günümüzde geleneksel üretim yöntemlerinin yarattığı çevresel bozulmanın artan düzeyi insan yaşamını doğrudan etkilemektedir. Son yıllarda ise çevre dostu üretim sistemlerinin yaygınlaşmasıyla birlikte sürdürülebilirlik kavramı önemli hale gelmektedir. Sürdürülebilirlik kavramının önem kazandığı alanlardan biri işletmelerin tabiatı gereği bağlı olduğu finansal sistemlerdir. Bu kapsamda Borsa İstanbul (BİST)'da işlem gören bazı işletmelere yönelik sürdürülebilirlik endeksi hesaplanmaktadır.

Bu çalışma, BİST Sürdürülebilirlik Endeksi'nde yer alan işletmelerin yayımlanmış olduğu Sürdürülebilirlik Raporları ve Entegre Raporların, TSRS 1 Sürdürülebilirlik ile İlgili Finansal Bilgilerin Açıklanmasına İlişkin Genel Hükümler Standardı'na uyum düzeyini analiz etmeyi amaçlamaktadır.

Çalışma BIST Sürdürülebilirlik Endeksi'nde farklı sektörlerde faaliyet gösteren yedi işletmenin 2023 yılı Sürdürülebilirlik Raporları'ndan elde edilen verileri analiz etmektedir. Analiz sonuçları, sürdürülebilirlik raporları TSRS 1'de yer alan Yönetişim, Strateji, Risk Yönetimi ile Ölçütler ve Hedefler başlıklarındaki açıklamalara en uygun olan işletmeyi Doğuş Otomotiv A.Ş. olarak ortaya koyarken, en az uygun olan işletmeyi ise BİM ve Enka İnşaat A.Ş. olarak tespit etmiştir. Çalışmada işletmelerin genellikle sürdürülebilirlik konusunda risk ve fırsatlarını belirledikleri ancak bu risklerin belirlenmesinde senaryo analizini Doğuş Otomotiv A.Ş. dışında diğer işletmelerin kullanmadıkları gözlenmiştir. Ayrıca analiz kapsamındaki işletmelerin tamamı sürdürülebilirliğe ilişkin risk ve fırsatlarının, finansal durumu, performansı ve nakit yönetimine olan kısa, orta ve uzun vadedeki etkisine raporlarında yer vermemişlerdir.

Anahtar Kelimeler – Sürdürülebilirlik Raporları, BIST Sürdürülebilirlik Endeksi, TSRS 1 Sürdürülebilirlik ile İlgili Finansal Bilgilerin Açıklanmasına İlişkin Genel Hükümler Standardı, Sürdürülebilirliğe İlişkin Riskler, Sürdürülebilirliğe İlişkin Fırsatlar

GİRİŞ

Teknolojik gelişmelere bağlı olarak değişen toplumsal üretim ve tüketim biçimleri yeryüzündeki kaynakların bilinçsiz kullanımı sorununu beraberinde getirmektedir. Yeryüzünün yaşadığı en büyük sorunlardan biri ise küresel ısınmadır. Küresel ısınma özellikle son çeyrek asırdır pek çok iklim felaketine yol açmıştır. Bunlara örnek, ABD'nin güney kıyıları ve Küba'yı etkisi altına alan Ian Kasırgası, Pakistan ve Çin başta olmak üzere yaşanan sel felaketleri, Karayipler ve Kanada'yı etkileyen Fiona Kasırgası, iklim krizinin son dönemde doğadaki yansımaları olarak gösterilebilmektedir (Euronews, agis). Bu felaketler ülkelerin coğrafi bölgelerinde değişime neden olduğu gibi önemli ölçüde can kayıplarının ve finansal kayıpların

yaşanmasına da neden olmuştur. Bu nedenle işletmeler iklim, insan hakları, sosyal yaşam, eğitim, yoksulluk vb. alanlarda ortaya çıkması muhtemel risk ve fırsatlarını analiz etmeleri ve finansal tablo kullanıcılarına raporlamaları gerekmektedir.

Sürdürülebilirlik raporları işletmelerin başta çevre ve iklim olmak üzere, sosyal yaşam ve yönetim konularındaki risk ve fırsatlarını planlanmalarına, izlemelerine ve performans analizlerini yapabilmelerine olanak sağlarlar (GRI, 2013:3). Küresel Raporlama Girişimi (Global Reporting Initiative, GRI)'nin hazırladığı kılavuz işletmelere sürdürülebilirlik raporlarının hazırlanmasında yardımcı olmaktadır (Gençoğlu ve Aytaç, 2016: 53). Türkiye’de, özellikle büyük ölçekli işletmeler, sürdürülebilirlik raporlarını 1 Ocak 2024 tarihine kadar söz konusu girişimin yayımladığı standartlara göre rapor etmiş, bu tarihten itibaren ise Kamu Gözetim, Muhasebe ve Denetim Standartları Kurumu tarafından yayımlanan Türkiye Sürdürülebilirlik Raporlama Standartları’na göre rapor etmeye başlamıştır (Kamu Gözetim, Muhasebe ve Denetim Standartları Kurumu, agis). 29 Aralık 2023 tarihli ve 32414 (1.M) sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan “Türkiye Sürdürülebilirlik Raporlama Standartlarının Uygulama Kapsamının Belirlenmesi”¹ adlı kararda en az iki dönem art arda belirtilen eşik değerleri sağlayan işletmeler için sürdürülebilirlik raporlarının hazırlanması zorunlu hale getirilmiştir.

TSRS 1’in amacı, işletmelerin kısa, orta ve uzun vadede finansal durumu, performansı ve nakit akışlarını etkilemesi muhtemel olan sürdürülebilirlikle ilgili risk ve fırsatlarına ilişkin bilgilerin açıklanmasını zorunlu kılmaktır (TSRS 1, Paragraf 3). Bu standarda göre işletmeler sürdürülebilirlik raporlarında aşağıda belirtilen dört temel içeriğe yer vermelidir (TSRS 1, Paragraf 25):

- *Yönetişim:* İşletmenin sürdürülebilirlikle ilgili risk ve fırsatları izlemek ve yönetmek için kullandığı yönetim süreçleri, kontrolleri ve prosedürleridir.
- *Strateji:* İşletmenin sürdürülebilirlik ile ilgili risk ve fırsatları yönetmek için kullandığı yaklaşımdır.
- *Risk Yönetimi:* İşletmenin sürdürülebilirlik ile ilgili risk ve fırsatları belirlemek, değerlendirmek, önceliklendirmek ve izlemek için kullandığı süreçlerdir.
- *Metrikler ve Hedefler:* İşletmenin kendi belirlediği veya mevzuat uyarınca ulaşması gereken hedeflere yönelik ilerlemeler de dahil

¹ İlgili karar kapsamında TSRS’ye uygun raporlama yapacak işletmeler için belirlenen eşik değerler aşağıdaki gibidir:

Çalışan sayısı: 250 kişi

Aktif toplam: 500 Milyon Türk Lirası

Yıllık net satış hasılatı: 1 Milyar Türk Lirası

olmak üzere, sürdürülebilirlik ile ilgili risk ve fırsatlarla ilgili performansdır.

Bu temel içerikleri organizasyonları içerisinde hayata geçiren, uygulayan ve sürdürülebilirlik raporları çerçevesinde raporlayan işletmeler, finansal tablo kullanıcılarına sundukları genel amaçlı finansal tabloların etkinliğini önemli ölçüde arttıracaklardır. İşletmelerin finansal durumu, faaliyet sonuçları ve nakit akışları, genel risk ve fırsatların yanı sıra sürdürülebilirliğe ilişkin risk ve fırsatlardan da etkilenmektedir. Bu nedenle söz konusu risk ve fırsatların belirlenmesi, işletmelerin kısa, orta ve uzun vadeli planları ile ilişkilendirilmesi, önceliklendirilmesi, izlenmesi, iş modeli ve değer zinciri üzerindeki etkinin tespit edilerek diğer işletme fonksiyonları ile bütünleştirilerek çalıştırılması gerekmektedir. Bu şekilde sürdürülebilirliğe ilişkin risk ve fırsatların bütüncül yaklaşımla değer zinciri üzerindeki nitelik ve niceliksel olarak etkisinin tespit edilmesi, işletmelerin finansal durumu ve performansını gerçeğe uygun şekilde raporlanmasını sağlamaktadır.

Sürdürülebilirlik uygulamaları ve raporları mikro düzeyde işletmeleri etkilerken, makro düzeyde ülkelerin gelirlerini ve rekabet güçlerini etkilemektedir. Sürdürülebilirlik raporlarının uluslararası standartlara uygun olarak hazırlanması, uluslararası finans sermayenin özellikle de çevre dostu yatırımları destekleyen sermaye kaynaklarının ilgili ülkelere yönelmesini sağlayarak küresel rekabet güçlerinin artmasına katkı sunmaktadır (Kamu Gözetim, Muhasebe ve Denetim Standartları Kurumu, agis). Sürdürülebilirlik standartları kapsamında risk ve fırsatlarını belirleyen, izleyen ve kontrol altında tutulabilmesi için gereken önlemleri alan işletmeler, faaliyet gösterdikleri alanlarda fiyat belirsizliklerini önemli ölçüde azaltmaktadırlar. İşletmelerin küresel rekabete konu olan mal ve hizmetlerine yönelik ani fiyat değişimlerinin bir başka ifadeyle fiyat şoklarının azalması, piyasalarda uzun dönem dengesinin oluşmasını katkı sunar.

Sürdürülebilirlik raporlamalarının uluslararası standartlara uygun şekilde gerçekleştirilmelerinin işletme ve ülke bazındaki söz konusu önemli etkileri nedeniyle bu çalışmada BIST’de işlem gören şirketlerin sürdürülebilirlik raporları incelenmiştir. Çalışma işletmelerin sürdürülebilirlik raporlarının mevcut durumu ile TSRS’de yer alan açıklamalara ne ölçüde uyum sağlandığının tespit edilmesini amaçlamaktadır. Bu kapsamda çalışma iki bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde çalışmanın kapsamı, veri seti ile yöntemine, ikinci bölümde ise işletmelerin sürdürülebilirlik raporlarının incelenmesine ilişkin analiz sonuçlarına yer verilmiştir.

ÇALIŞMANIN KAPSAMI, VERİ SETİ VE YÖNTEMİ

Çalışmada analizi gerçekleştirilen işletmelerin bazılarının sürdürülebilirlik raporları, bazılarının ise entegre raporları incelenmektedir.

Bu kapsamda çalışmada BIST Sürdürülebilirlik Endeksi'nde yer alan Akbank T.A.Ş., Arçelik A.Ş., BİM Birleşik Mağazaları A.Ş., Doğan Şirketler Grubu Holding A.Ş., Doğu Otomotiv Servis ve Ticaret A.Ş., Enerjisa Enerji A.Ş. ile Enka İnşaat ve Sanayi A.Ş. işletmelerinin sürdürülebilirlik raporları veya entegre raporları incelenmektedir.

BIST Sürdürülebilirlik Endeksi'nde yer alan işletmelerin fazla miktarda olması entegre rapor/sürdürülebilirlik raporlarının geniş kapsamlı olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle çalışma farklı alanlarda faaliyet gösteren söz konusu işletmeler ile sınırlandırılmıştır. Çalışma kapsamındaki şirketlere ait 2023 yılı verileri, Kamuyu Aydınlatma Platformu (KAP) ve işletmelerin resmi web sitelerinde yayımladıkları sürdürülebilirlik raporlarından elde edilmiştir.

Çalışma yöntem olarak döküman analizini kullanmaktadır. Döküman analizi yönteminde basılı yada elektronik ortamlardan elde edilen kaynaklar, araştırmanın amacı doğrultusunda okunur, incelenir ve analiz sonuçları değerlendirilir (Karasar, 2005). Bu kapsamda çalışma, işletmelerin sürdürülebilirlik raporlarını incelemekte ve ilgili raporlardaki açıklamalarla TSRS 1'de yer alan dört temel başlık olan Yönetişim, Strateji, Risk Yönetimi, Ölçütler ve Hedefler başlıklarındaki açıklamaları uyum düzeylerine göre puanlamaktadır. Raporlardaki açıklamaların söz konusu standarda uyum düzeyinin puanlanmasında dörtlü likert ölçeği kullanılmıştır. Bu ölçekte "0: TSRS 1'e göre olması gereken açıklamaların raporlarda bulunmaması"nı, "1: TSRS 1'e göre olması gereken açıklamalar ilgisiz", "2: TSRS 1 ile açıklamalar kısmen uyumlu", "3: TSRS 1'e göre açıklamalar tamamen uyumlu" şeklinde hesaplanmıştır.

ÇALIŞMANIN BULGULARI

Bu bölüm işletmelerin yayımlamış oldukları 2023 yılı sürdürülebilirlik raporlarını Yönetişim, Strateji, Risk Yönetimi, Ölçütler ve Metrikler başlıkları altında tablolastırarak analiz etmektedir.

Tablo 1: İşletmelerin Sürdürülebilirlik Raporlarında Yer Alan Yönetişime İlişkin Açıklamaların TSRS 1'de Yer Alan İlkelere Uyum Düzeyi Puanları

Yönetişime İlişkin İlkeler	Akbank	Arçelik	BİM	Doğan Holding	Doğu Otomotiv	Enerjisa	Enka İnşaat
İşletmelerin Raporlarında Yönetişim Konusuna İlişkin Açıklamalarının Sürdürülebilirlik Standardına Uyum Düzeyi	1,9	1,7	2,35	2,65	2,5	2,65	2,55
1) Yönetişim organ(lar)ı veya sürdürülebilirlikle ilgili risklerin ve	1,8	1,4	2,2	2,8	2,4	2,8	2,6

fırsatların gözetiminden sorumlu kişi(ler) belirlenmesi ve uygulamanın nasıl yapıldığına ilişkin açıklamalar							
a) Sürdürülebilirlikle ilgili riskler ve fırsatlara yönelik sorumlulukların; görev tanımına, yetkilere, iş tanımlarına ve ilgili organ(lar) veya kişi(ler) için geçerli olan diğer ilgili politikalara nasıl yansıtıldığı	2	2	3	3	3	3	3
b) Organ(lar)ın veya kişi(ler)in, sürdürülebilirlikle ilgili risklere ve fırsatlara karşılık vermek üzere tasarlanmış stratejileri denetlemek için uygun yetki ve yeterliliklerinin mevcut olup olmadığı veya geliştirilip geliştirilmeyeceğinin nasıl belirlendiği,	0	2	0	2	2	2	2
c) Organ(lar) veya kişi(ler)in sürdürülebilirlikle ilgili riskler ve fırsatlar hakkında nasıl ve ne sıklıkta bilgilendirildiği,	3	3	3	3	3	3	3
d) Organ(lar)ın veya kişi(ler)in işletmenin stratejisini, önemli işlemlere ilişkin kararlarını, risk yönetimi süreçlerini ve ilgili politikaları denetlerken sürdürülebilirlikle ilgili riskleri ve fırsatları nasıl denetlediği ve bunlara yönelik ilerlemeyi nasıl dikkate aldığı	2	0	3	3	2	3	2
e) İlgili performans ölçütlerinin ücretlendirme politikalarına dâhil edilip edilmediğini ve nasıl dâhil edildiğini de içerecek şekilde, organ(lar)ın veya kişi(ler)in sürdürülebilirlikle ilgili riskler ve fırsatlara ilişkin hedeflerin belirlenmesini nasıl	2	0	2	3	2	3	3

denetlediği ve bunlara yönelik ilerlemeyi nasıl izlediği							
2) Sürdürülebilirlikle ilgili riskleri ve fırsatları izlemek, yönetmek ve denetlemek için kullanılan yönetim süreçlerinde, kontrollerde ve prosedürlerde yönetimin rolü ile ilgili açıklamalar	2	2	2,5	2,5	2	2,5	2,5
a) Rolün belirli bir yönetim seviyesindeki pozisyona veya yönetim seviyesindeki bir komiteye devredilip devredilmediği ve bu pozisyon veya komite üzerinde gözetimin nasıl uygulandığı ve	2	2	2	3	2	3	3
b) Yönetimin sürdürülebilirlikle ilgili risk ve fırsatların gözetimini desteklemek için kontroller ve prosedürler kullanıp kullanmadığı ve eğer kullanıyorsa, bu kontrol ve prosedürlerin diğer iç fonksiyonlarla nasıl bütünleştirildiği.	2	2	3	2	2	2	2

Tablo 1’e göre, Doğan Holding ve EnerjiSa şirketlerinin sürdürülebilirlikle ilgili riskleri ve fırsatları izlemek, yönetmek ve denetlemek için en kapsamlı yönetim süreçlerini oluşturdukları ve işlettikleri ifade edilebilir. Yönetişim süreçlerinin kurulması ve uygulanması ile ilgili sırasıyla Arçelik ve Akbank’ın sürdürülebilirlik raporlarında daha sınırlı açıklamaların yer aldığı belirlenmiştir. Yönetişim süreçlerine ilişkin şirketlerin raporlarının incelenmesi sonucu tespitler şöyledir:

- Sürdürülebilirlikle ilgili riskler ve fırsatlara yönelik sorumluluklar şirketlerde belirli yönetim organları ve kişilere tayin edilmiştir. Akbank ve Arçelik’in organizasyon şemasında üst yönetime bağlı Sürdürülebilirlik Komitesi yer alırken BİM’de Sürdürülebilirlik Komitesi’ne bağlı çalışma grupları, Doğu otomotivde ve Enka İnşaat’da ise ayrıca Riskin Erken Saptanması Komitesi de yer almaktadır.
- BİM ve Arçelik A.Ş.’nin sürdürülebilirlik raporlarında yönetim organlarının risk ve fırsatların yönetilmesine ilişkin stratejileri denetlemek için yetki ve yeterlilikleri hakkında herhangi bir bilgiye yer verilmemiştir. Analiz kapsamındaki diğer şirketlerin raporlarında

ise yetkileri hakkında açıklamalar yapılmış ancak yeterlilikler konusunda herhangi bir açıklamaya yer verilmemiştir.

- Raporlar incelendiğinde, sürdürülebilirlikle ilgili risk ve fırsatlar hakkında yönetim organlarının ve kişilerin toplantı yolu ile yılda en az bir kez bilgilendirildikleri belirtilmiştir. Doğu Otomotiv A.Ş. yıllık düzenlediği dört toplantı ile sürdürülebilirliğe ilişkin risk ve fırsatların değerlendirmelerini en fazla gerçekleştiren şirkettir.
- Arçelik A.Ş. stratejisi ve geleceğe ilişkin alacakları kararlarda sürdürülebilirlikle ilgili risk ve fırsatları nasıl denetlediği ve risk ve fırsatlara ilişkin izlemeyi nasıl gerçekleştirdikleri hakkında sürdürülebilirlik raporlarında herhangi bir açıklama yapmamışlardır. Buna karşılık BİM, Doğan Holding ve Enerjisa şirketleri sürdürülebilirlik ile ilgili risk ve fırsatlarına ilişkin performans hedeflerini/göstergelerini her yılbaşında belirlemekte ve ara dönemlerde de incelemektedirler. Sürdürülebilirlik komitesi ve çalışma grupları aracılığı ile izledikleri bu bilgileri, yönetim kurullarına sunmaktadırlar.
- Arçelik A.Ş., sürdürülebilirlik raporlarında yönetim organlarının sürdürülebilirlikle ilgili riskler ve fırsatlara ilişkin hedeflerin belirlenmesini nasıl denetlediği ve bunlara yönelik ilerlemeyi nasıl izlediği konusunda raporlarında herhangi bir açıklama yapmamıştır. Sürdürülebilirlik raporlarında risk ve fırsatlara ilişkin hedeflerin nasıl denetlendiği ile ilgili şirketlerde genellikle Sürdürülebilirlik Komitesi'nden ayrı Riskin Erken Saptanması birimi de yer almaktadır. Bu birimde riskler ve fırsatlar belirlenmekte, bu risk ve fırsatlara ilişkin kilit performans göstergeleri Sürdürülebilirlik Komitesi tarafından denetlenmekte ve izlenmektedir. Bu komite tarafından gerçekleştirilen izleme ve değerlendirmeler üst yönetim ile belirli periyotlarda gerçekleştirilen sürdürülebilirlik toplantılarında yönetim kuruluna sunulmaktadır.
- Analiz kapsamında yer alan şirketler, sürdürülebilirlikle ilgili risk ve fırsatların gözetimini desteklemek için çevre, sosyal, ekonomi, iklim değişikliği, su, hava kirliliği vb. alanlarda kontroller ve prosedürler kullanmaktadır ancak bu kontrol ve prosedürlerin işletmenin diğer iç fonksiyonları ile nasıl bütünleştirildiğine ilişkin raporlarında herhangi bir açıklamaya yer vermemişlerdir. Söz konusu şirketlerden BİM, iklim ile ilgili risklere yönelik iç kontrol mekanizmalarını yetki, görev ve sorumluluklarına entegre ederek uygulama, yönetim ve denetim süreçlerini gerçekleştirmektedir.

Tablo 2: İşletmelerin Sürdürülebilirlik Raporlarında Yer Alan Stratejiye İlişkin Açıklamaların TSRS 1’de Yer Alan İlkelere Uyum Düzeyi Puanları

Stratejiye İlişkin İlkeler	Akbank	Arçelik	BİM	Doğan Holding	Doğuş Otomotiv	Enerjisa	Enka İnşaat
İşletmelerin Raporlarında Strateji Konusuna İlişkin Açıklamalarının Sürdürülebilirlik Standardına Uyum Düzeyi	0,9	0,6	1,2	0,334	1,6	1	0,134
1) İşletmenin beklentilerini etkileyebilecek sürdürülebilirlikle ilgili riskler ve fırsatlar	2	0	1	1,67	2	2	0,67
a) Sürdürülebilirlikle ilgili riskler ve fırsatların tanımlanması	3	0	3	3	3	3	2
b) Sürdürülebilirlikle ilgili risklerin ve fırsatların muhtemel etkilerinin kısa, orta veya uzun vadede gerçekleşmesinin açıklanması	3	0	0	2	3	0	0
c) İşletmenin kısa, orta ve uzun vadeli dönemlerin tanımlanması ve bu dönemlerin stratejik karar alma süreçlerinde kullanılan planlama dönemleriyle ilişkisinin açıklanması	0	0	0	0	0	2	0
2) Sürdürülebilirlik risk ve fırsatlarının işletmenin iş modeli ve değer zinciri üzerindeki mevcut ve beklenen etkilerinin açıklanması,	2,5	0	3	0	3	0	0
a) Sürdürülebilirlik risk ve fırsatlarının işletmenin iş modeli ve değer zinciri üzerindeki mevcut ve beklenen etkilerinin tanımı	2	0	3	0	3	0	0
b) İşletmenin iş modelinde ve değer zincirinde sürdürülebilirlikle ilgili risk ve fırsatların nerede yoğunlaştığının (örneğin, coğrafi alanlar, tesisler ve varlık türleri) belirlenmesi	3	0	3	0	3	0	0
3) Sürdürülebilirlikle ilgili risk ve fırsatların strateji ve karar alma üzerindeki etkilerinin açıklanması	0	3	2	0	3	3	0
4) Sürdürülebilirlikle ilgili söz konusu risklerin ve fırsatların işletmenin finansal durumu, finansal performansı ve nakit akışları üzerindeki etkileri	0	0	0	0	0	0	0

ve bunların vade ilişkisinin açıklanması							
5) Sürdürülebilirlikle ilgili risklere ilişkin işletmenin stratejisinin ve iş modelinin esnekliğinin açıklanması	0	0	0	0	0	0	0

İşletmelerin risk ve fırsatları yönetmek için uyguladıkları stratejilere ilişkin sürdürülebilirlik raporlarında yer alan açıklamalar doğrultusunda aşağıdaki tespitlerde bulunulmuştur.

- Sürdürülebilirlik raporlarında risk ve fırsatların yönetilmesinde uyguladıkları stratejilere raporlarında en fazla yer veren işletme Doğu Otomotiv A.Ş., en az yer veren işletme ise Enka İnşaat A.Ş.'dir.
- Arçelik A.Ş. sürdürülebilirlik konusunda risk ve fırsatlarını belirlememiş, Enka İnşaat A.Ş. ise risklerini belirlemiş ancak fırsatlarını belirlememiştir. Analiz kapsamındaki diğer işletmeler, iklim değişikliği, ekonomik, insan, fiziksel ve geçiş risklerini ve fırsatlarını belirlemişlerdir.
- Arçelik A.Ş., Enerjisa A.Ş., BİM ve Enka İnşaat sürdürülebilirlik ile ilgili risk ve fırsatların, kısa, orta ve uzun vadede işletmelerin planları üzerindeki etkilerini raporlarında yer vermemiştir. Söz konusu şirketlerden Akbank Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları ile ilişkilendirdiği risk ve fırsatlarını, Doğu Otomotiv ise departman bazında hesapladığı risk olgunluk düzeyinin kısa, orta ve uzun vadeli amaçları üzerindeki muhtemel etkilerini raporlarında açıklamıştır.
- İşletmelerden sadece Enerjisa şirketinin raporlarında kısa, orta ve uzun vadeli dönemlerin tanımları ve kapsadıkları süreler belirlenmiş, ancak bu dönemlerin gelecekle ilgili alacakları kararlarda kullanılan planlama dönemleri ile ilişkisi açıklanmamıştır.
- Akbank, BİM ve Doğu Otomotiv A.Ş. sürdürülebilirlik risk ve fırsatlarının iş modeli ve değer zinciri üzerindeki ve beklenen etkilerinin tanımını ve risk ve fırsatların hangi alanlarda yoğunlaştıklarını belirlemişlerdir. Ambalaj atıkları, hava ve su kirliliği, iklim değişikliği, nitelikli işgücü eksikliği işletmelerin risk ve fırsatların en fazla yoğunlaştıkları alanlar olmuştur.
- BİM sürdürülebilirlik ile ilgili sadece risklerin, Arçelik, Doğu ve Enerjisa ise hem risk hem de fırsatlarının strateji ve karar alma üzerindeki etkilerini örnekler yardımıyla açıklamıştır. Enerjisa, risk ve fırsatların potansiyel finansal etkisi ve tutarına da raporlarında ayrıca yer vermiştir.
- Sürdürülebilirlikle ilgili risk ve fırsatların işletmenin finansal durumu, finansal performansı ve nakit akışları üzerindeki etkisi, bu finansal tablolara olan muhtemel etkilerinin hangi vadelerde

gerçekleştiği, işletmelerin iş modellerinin esnekliği konularında şirketlerin sürdürülebilirlik raporlarında herhangi bir açıklamaya yer verilmemiştir.

Tablo 3: İşletmelerin Sürdürülebilirlik Raporlarında Yer Alan Stratejiye İlişkin Açıklamaların TSRS 1’de Yer Alan İlkelerle Uyum Düzeyi Puanları

Risk Yönetimine İlişkin İlkeler	Akbank	Arçelik	Bİ M	Doğan Holding	Doğuş Otomotiv	Enerjisa	Enka İnşaat
İşletmelerin Raporlarında Risk Yönetimine İlişkin Açıklamalarının Sürdürülebilirlik Standardına Uyum Düzeyi	0,56	0,39	0	0,223	1,39	0,56	0,33
1) Aşağıdakilerle ilgili bilgiler de dâhil, işletmenin sürdürülebilirlikle ilgili riskleri belirlemek, değerlendirmek, önceliklendirmek ve izlemek için kullandığı süreçler ve ilgili politikalar	1,67	1,17	0	0,67	2,17	1,67	1
a) İşletmenin kullandığı girdiler ve parametreler (örneğin, veri kaynakları ve süreçlerde kapsanan faaliyet alanı hakkındaki bilgiler),	3	3	0	0	3	0	0
b) İşletmenin sürdürülebilirlikle ilgili riskleri tanımlamak için senaryo analizi kullanıp kullanmadığı ve nasıl kullandığı	0	0	0	0	3	0	0
c) İşletmenin bu risklerin etkilerinin niteliğini, olasılığını ve büyüklüğünü nasıl değerlendirdiği (örneğin, işletmenin nitel faktörleri, nicel eşik değerleri veya diğer kriterleri dikkate alıp almadığı),	3	0	0	0	3	3	3
d) İşletmenin sürdürülebilirlikle ilgili riskleri diğer risk türlerine göre önceliklendirip önceliklendirmede ve nasıl önceliklendirdiği,	2	2	0	2	2	2	3
e) İşletmenin sürdürülebilirlikle ilgili riskleri nasıl izlediği ve	2	2	0	2	2	2	0
f) Önceki raporlama dönemine kıyasla işletmenin kullandığı süreçleri değiştirip değiştirmede ve nasıl değiştirdiği,	0	0	0	0	0	0	0
2) İşletmenin sürdürülebilirlikle ilgili fırsatları belirlemek,	0	0	0	0	0	0	0

değerlendirmek, önceliklendirmek ve izlemek için kullandığı süreçler ve							
3) Sürdürülebilirlikle ilgili risklerin ve fırsatların belirlenmesine, değerlendirilmesine, önceliklendirilmesine ve izlenmesine yönelik süreçlerin işletmenin genel risk yönetimi sürecine ne ölçüde ve nasıl entegre edildiği ve bu süreci bilgilendirdiği.	0	0	0	0	0	0	0

Tablo 3'e göre işletmelerin risk yönetimi süreçlerine yönelik tespit şöyledir:

- Sürdürülebilirlikle ilgili risk ve fırsatları belirleme, önem sırasına koyma ve izleme, yani risk yönetimi süreçlerini en etkin şekilde yöneten şirket Doğu Otomotiv olurken; söz konusu uygulamalara süreçlerinde yer vermeyen şirket ise BİM olmuştur.
- Analiz kapsamındaki şirketler doğal, fikri, üretilmiş, insan ve finansal sermaye alanlarında girdi ve parametreler belirlemiştir. Ayrıca paydaşlara uygulanan anket sonuçları, tedarik zinciri üyelerine verilen eğitimler, Ar-Ge iş birlikleri de işletmelerin temel girdilerine örnek olarak verilmiştir.
- İşletmelerden sadece Doğu Otomotiv A.Ş. risklerini belirlemeye yönelik senaryo analizini kullanmaktadır.
- Akbank, Doğu Otomotiv, Enerjisa ve Enka İnşaat, sürdürülebilirliğe ilişkin risklerinin etkileri ve büyüklüğünü değerlendirebilmek için nitel ve nicel eşik değerleri belirlemişlerdir.
- Enka İnşaat sürdürülebilirlik ile ilgili risklerini önceliklendirmede anket yöntemini kullanmıştır. Risklerini önceliklendiren diğer şirketler ise raporlarında bu önceliklendirmeyi nasıl yaptıklarına ilişkin raporlarında herhangi bir açıklamaya yer vermemişlerdir.
- Sürdürülebilirlik risklerini izleyen işletmeler bu izlemeleri genellikle sürdürülebilirlik komitesi, risk komitesi ve riskin erken saptanması komitesi tarafından izlemektedirler. Bu riskin nasıl izlendiği konusunda detay bir açıklama raporlarda bulunmamaktadır.
- Sürdürülebilirliğe ilişkin fırsatların belirlenmesi, öncelik düzeyinin belirlenmesi ve izlenmesine ilişkin yürütülen süreçler ile risk ve fırsatların işletmenin genel risk ve fırsatları ile uyumlaştırılmasına işletmeler raporlarında yer vermemiştir.

Tablo 4: İşletmelerin Sürdürülebilirlik Raporlarında Yer Alan Ölçüt ve Hedeflere İlişkin Açıklamaların TSRS 1’de Yer Alan İlkelere Uyum Düzeyi Puanları

Ölçütler ve Hedeflere İlişkin İlkelere	Akbank	Arçelik	BİM	Doğan Holding	Doğuş Otomotiv	Enerjisa	Enka İnşaat
İşletmelerin Raporlarında Ölçütler ve Hedeflere İlişkin Açıklamaların Sürdürülebilirlik Standardına Uyum Düzeyi	1,92	1,47	0	1,405	2,115	1,847	0,572
1) İşletme, beklentilerini etkilemesi makul ölçüde beklenen sürdürülebilirlikle ilgili her bir risk ve fırsat için aşağıdakileri açıklar:	2	0,67	0	2,33	2	2	0
a) Geçerli bir TSRS tarafından gerekli kılınan ölçütler ve	0	0	0	0	0	0	0
b) İşletmenin belirlediği Sürdürülebilirlikle ilgili risk veya fırsat için ölçütler	3	0	0	0	3	3	0
c) İşletmenin belirlediği hedeflere ve mevzuat uyarınca ulaşması gereken hedeflere yönelik ilerleme dâhil, söz konusu sürdürülebilirlikle ilgili risk veya fırsata ilişkin performansını ölçmek için belirlediği ölçütler	3	2	0	3	3	3	0
2) Bir işletme tarafından yukarıda açıklanan ölçütler, belirli iş modelleriyle, faaliyetlerle veya bir sektöre katılımı karakterize eden diğer ortak özelliklerle ilişkili ölçütleri içerir	3	2	0	2	2	2	0
3) Bir ölçütün işletme tarafından geliştirilmiş olması durumunda işletme, aşağıdakiler hakkında bilgi açıklar:	2,25	1,5	0	0	2,75	1,25	0
a) Ölçütün TSRS’ler dışında bir kaynaktan alınan bir ölçütten uyarlanarak türetilip türetilmediği ve	3	2	0	0	3	2	0

eğer öyleyse, hangi kaynaktan ve işletme tarafından açıklanan ölçütün söz konusu kaynakta belirtilen ölçütten ne şekilde farklılaştığı dâhil, ölçütün nasıl tanımlandığı							
b) Ölçütün mutlak bir ölçü mü, başka bir ölçütle ilişkili olarak ifade edilen bir ölçü mü yoksa niteliksel bir ölçü mü olduğu (kırmızı, sarı, yeşil veya RAG tarzında olması durumu gibi),	3	2	0	0	3	3	0
c) Ölçütün bir üçüncü tarafça doğrulanıp doğrulanmadığı ve eğer öyleyse hangi tarafça doğrulandığı	0	2	0	0	3	0	0
d) Kullanılan yöntemin sınırlamaları ve yapılan önemli varsayımlar dâhil, ölçütü hesaplamak için kullanılan yöntem ve hesaplama girdileri	3	0	0	0	2	0	0
4) İşletme, stratejik amaçlarına ulaşma yolundaki ilerlemeyi izlemek için belirlediği hedefler ve mevzuat uyarınca ulaşması gereken hedefler hakkındaki bilgileri açıklar. İşletme, her bir hedef için aşağıdakileri açıklar:	1,71	1,71	0	1,29	1,71	2,14	2,29
a) Hedefi belirlemek ve hedefe ulaşma yolundaki ilerlemeyi izlemek için kullanılan ölçüt,	3	3	0	0	3	3	3
b) İşletmenin belirlediği veya mevzuat uyarınca ulaşması gereken belirli nicel veya nitel hedef,	3	3	0	3	3	3	3
c) Hedefin geçerli olduğu dönem	3	0	0	3	3	3	3
d) İlerlemenin ölçümünde baz alınan dönem	0	3	0	0	0	3	3

e) Dönüm noktaları ve ara hedefler,	0	0	0	0	0	0	2
f) Her hedefe ilişkin performans ve işletmenin performansındaki eğilimlerin veya değişikliklerin analizi	3	3	0	3	2	3	2
g) Hedefteki herhangi bir değişiklik ve bu değişikliğe ilişkin bir açıklama.	0	0	0	0	0	0	0

Tablo 4, işletmelerin risk ve fırsatlarındaki gelişmeleri analiz eden parametreler ile ilgili raporların özetini sunmaktadır. Bu tabloya ilişkin tespitler şöyledir:

- Doğu Otomotiv A.Ş. sürdürülebilirliğe ilişkin risk ve fırsatlar ile ilgili performansın değerlendirilmesinde raporlarında en fazla açıklamaya yer veren, BİM A.Ş. ise bu konuda herhangi bir açıklama yapmayan şirket olmuştur.
- Akbank, Doğu Otomotiv ve Enerjisa çevresel, yönetsel ve sosyal alanlarda belirlediği risk ve fırsatları için nitel ve nicel ölçütleri belirlemiş, bu ölçütleri tanımlamış ve formüllerine yer vermiştir.
- Doğu otomotivin sürdürülebilirlik ile ilgili risk ve fırsatlarına ilişkin ölçütleri, bağımsız bir denetim firması tarafından doğrulanmaktadır. Arçelik ise ölçütlerini sadece müşteri doğrulaması ile izlemektedir.
- İşletmelerin stratejik amaçlarına ulaşmak için belirledikleri hedefler ile ilgili raporlarında en fazla açıklamayı Anka İnşaat A.Ş. vermiştir. BİM A.Ş. ise bu konuda herhangi bir açıklama yapmamıştır.

TSRS 1 Temel Açıklamalar	Akbank	Arçelik	BİM	Doğan Holding	Doğu Otomotiv	Enerjisa	Enka İnşaat
Yönetişim	1,9	1,7	2,35	2,65	2,5	2,65	2,55
Strateji	0,9	0,6	1,2	0,334	1,6	1	0,134
Risk Yönetimi	0,56	0,39	0	0,223	1,39	0,56	0,33
Ölçütler ve Hedefler	1,92	1,47	0	1,405	2,115	1,847	0,572
Ortalama Puan	1,32	1,04	0,89	1,15	1,90	1,51	0,90

Tablo 5: İşletmelerin Sürdürülebilirlik Raporlarının TSRS 1’de Yer Alan Temel Başlıklara İlişkin Toplam Puan Ortalamaları

Tablo 5’e göre, Doğu Otomotiv A.Ş.’nin sürdürülebilirlik raporlarının TSRS 1’de yer alan Yönetişim, Strateji, Risk Yönetimi ile Ölçütler ve Hedefler alt başlıklarındaki açıklamalara uyum düzeyinin en fazla, Enka İnşaat ile BİM A.Ş.’lerin ise uyum düzeyinin en az olduğu tespit edilmiştir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada BIST Sürdürülebilirlik Endeksi'nde farklı sektörlerde faaliyet gösteren yedi işletmenin entegre raporları/sürdürülebilirlik raporları, TSRS 1'de yer alan Yönetişim, Strateji, Risk Yönetimi ve Ölçütler ile Hedefler başlıkları kapsamında incelenmiştir. Raporların incelenmesi sonucu söz konusu başlıklar için tespit edilen hususlar, çalışmanın uygulama kısmında detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Bu açıklamalar doğrultusunda analiz kapsamında yer alan işletmelere ve BIST'de işlem gören ve sürdürülebilirlik raporlarını TSRS 1'e göre hazırlayacak işletmelere çeşitli önerilerde bulunulmuştur.

Sürdürülebilirlik ile ilgili risk ve fırsatların tespit edilmesi ve bu risk fırsatların izlenmesi, bütüncül bir yaklaşımla işletmenin diğer risk ve fırsatları ile uyumlaştırılması konusunda uzmanlaşılması adına işletmelerde Sürdürülebilirlik Komitesi'nin yanı sıra bu komiteye bağlı çalışma grupları yada riskin erken saptanması gibi yönetim organları oluşturulabilir. Raporlarda söz konusu yönetim organlarının yetki ve sorumluluklarının yanı sıra mevcut yeterliliklerine ve yeterliliklerinin geliştirilmesi konusunda neler yapılabileceğinin öngörülmesine de yer verilmelidir. İşletmeler sürdürülebilirlik ile ilgili performans hedeflerini kısa, orta ve uzun vadede belirlemeli, ara dönemlerde bu hedef gerçekleştirmelerini sürekli olarak izlemeli ve önemli boyutlarda sapma olması durumunda hedeflere yönelik önlemler geliştirilmelidir. İşletmeler belirlemiş oldukları bu politika ve prosedürlerin, diğer işletme fonksiyonları ile nasıl uyumlaştırıldığına da raporlarında ayrıca yer vermelidir.

Sürdürülebilirlik raporlarında bazı işletmelerin risk ve fırsatlarını yada sadece risklerini belirleyip fırsatlarını belirlemedikleri görülmüştür. İşletmeler stratejik amaçları doğrultusunda genel risk ve fırsatları ile özel risk ve fırsatlar kapsamında değerlendirilen sürdürülebilirlik risk ve fırsatlarını belirlemelidir. Belirlenen risk ve fırsatların, kısa, orta ve uzun vade işletme planları üzerindeki muhtemel etkilerini nicel ve nitel olarak açıklamalı ve bu etkiler tarafsız bir organ tarafından izlenmeli ve doğrulanmalıdır. Risk ve fırsatların işletme planları ile olan dönemsel ilişkisinin yanı sıra iş modeli ve değer zinciri ile de ilişkisi kurulmalı, mevcut ve beklenen etkileri açıklanmalı, yoğunlaştıkları alanlar belirlenmelidir. Raporlarda sürdürülebilirlik ile ilgili risk ve fırsatların, işletmelerin finansal yapısı üzerindeki etkisine yer verilmemiştir. İşletmeler sürdürülebilirlikten kaynaklanan risk ve fırsatlarının finansal durumu, performansı ve nakit akışları üzerindeki etkisini belirlediklerinde, iş modellerinin uygulama performansını daha isabetli ölçebilir ve kaynak dağılımını daha etkin gerçekleştirebilirler.

Risk yönetimi alanında işletmeler risklerini belirlemek için seneryo analizi kullanılmalı ve risklerini önem sırasına göre önceliklendirmelidir. Risklerin önceliklendirilmesi ve finansal etkilerinin belirlenmesi, kaynak dağılımının daha etkin gerçekleştirilmesini, finansal tablo kullanıcılarının

işletmenin finansal durumu, performansı ve nakit akışını gerçeğe uygun şekilde yorumlamasını, hesap verilebilirliği ve seffaf yönetimi, sorumlulukların güçlendirilmesini, yönetim organlarının performanslarının gerçekçi değerlendirilmesini sağlamaktadır.

REFERANSLAR

- Euronews (2022). 2022’de meydana gelen 10 iklim felaketi. <https://tr.euronews.com/green/2022/12/27/2022de-meydana-gelen-10-iklim-felaketi> adresinden 20 Aralık 2024 tarihinde alınmıştır.
- Gücenme Gençoğlu, Ü. ve Aytaç, A.(2016). Kurumsal Sürdürülebilirlik Açısından Entegre Raporlamanın Önemi ve BİST Uygulamaları, *Muhasebe ve Finansman Dergisi*, 72, 51-66.
- GRI (2013). G-4 Sürdürülebilirlik Kılavuzları. <https://respect.international/wp-content/uploads/2017/10/G4-Sustainability-Reporting-Guidelines-Implementation-Manual-GRI-2013.pdf> adresinden 1 Kasım 2024 tarihinde alınmıştır.
- Kamu Gözetimi, Muhasebe ve Denetim Standartları Kurumu (2023). TSRS 1 Sürdürülebilirlik ile İlgili Finansal Bilgilerin Açıklanmasına İlişkin Genel Hükümler Standardı. <https://www.kgk.gov.tr/SustainabilityDetailForm/11455/surdurulebilirlik-yayinlar> adresinden 30 Kasım 2024 tarihinde alınmıştır.
- Kamu Gözetimi, Muhasebe ve Denetim Standartları Kurumu (2023). 29 Aralık 2023 tarihli ve 32414 (I.M) sayılı Türkiye Sürdürülebilirlik Raporlama Standartlarının Uygulama Kapsamına İlişkin Kurul Kararı. <https://www.resmigazete.gov.tr/fihrist?tarih=2023-12-29&mukerrer=1> adresinden 15 Aralık 2024 tarihinde alınmıştır.
- Kamuyu Aydınlatma Platformu, KAP (2023). Şirketlerin Sürdürülebilirlik Raporları. <https://www.kap.org.tr/tr/ara/s%C3%BCrd%C3%BCr%C3%BClebilirlik%20endeksi/1> adresinden 1 Ekim 2024 tarihinde alınmıştır.
- Karasar, N. (2005). *Bilimsel araştırma yöntemi*. Nobel Yayın Dağıtım.

Yeni Biyoaktif Doğal Ürünlerin Keşfi İçin Genom Madenciliği

Dilara Hande BARLIK¹

Erdal ÖĞÜN²

- 1- Moleküler Mikrobiyolog; Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Moleküler Biyoloji ve Genetik AD.
dilarahandebalik@hotmail.com ORCID No: 0000- 0003-1668-1413
- 2- Doç. Dr.; Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Moleküler Biyoloji ve Genetik AD. eogun@yyu.edu.tr ORCID
No: 0000-0001-8280-4245

3- ÖZET

Mikroorganizmalar çevrelerindeki diğer canlılarla etkileşime geçmek ve zorlu şartlara uyum sağlamak için kimyasal, karmaşık bileşikler olan değerli doğal ürünler üretirler. Bu da mikroorganizmaları antimikrobiyal, antitümöral, antiviral, antioksidan gibi biyoaktif doğal ürünlerin en önemli kaynağı yapar. Günümüzde kullanılan birçok antibiyotik sentetik dolayısıyla da toksiktir. Ayrıca bazı dirençli mikroorganizmaların neden olduğu enfeksiyonlar kullanılmakta olan antibiyotiklere cevap vermemekte ve bu da her yıl dünya çapında artan ölümlerle sonuçlanmaktadır. Kanser ilaçlarının ise neredeyse tamamı yaşamı tehdit edecek kadar ciddi yan etkilere sahiptir, hatta birçoğu hastalığa karşı etkisizdir. Artan kanser vakaları ve küresel bir sorun haline gelmiş bakteriyel patojenlerdeki antimikrobiyal direnç etkili ve en güvenli çözüm yeni biyoaktif doğal ürünlerin (sekonder metabolitler) keşfidir. Daha önce keşfedilmemiş sekonder metabolitleri ortaya çıkarmak için geleneksel yöntemlerden çok daha etkili ve hızlı olan genom madenciliği mikroorganizmaların biyosentetik gen kümelerini (BGC) ve işlevlerini saptamak için doğmuş bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım tamamen bilgi işlem teknolojisine ve biyoinformatik araçlara bağlıdır. Bunun için kullanılan en önemli web aracı “Antibiotics and Secondary Metabolite Analysis SHell” (antiSMASH)’dir. Genom madenciliği sadece biyoaktif doğal ürünlerin biyosentetik yolunu değil aynı zamanda bunların olası fonksiyonel ve kimyasal etkileşimlerini saptamak için de kullanılır. Genom madenciliği yaklaşımıyla birlikte mikrobiyal dünyada şimdiye kadar keşfedilmemiş bir biyosentetik potansiyel ortaya çıkmıştır ve hala keşfedilmeyi bekleyen çok fazla sekonder metabolit mevcuttur.

Anahtar Kelimeler – Genom madenciliği, sekonder metabolit, antibiyotik direnci, kanser, biyosentetik gen kümeleri

GİRİŞ

Doğal dünyada iletişim büyük ölçüde kimyasaldır. Mikroorganizmalar, çevrelerindeki biyolojik ve fiziksel dünyayla etkileşime geçmek için doğal ürünler dediğimiz küçük kimyasal ve karmaşık bileşikler üretirler (Bauman ve ark., 2021). Bu da doğayı, klinik alanda yaygın olarak kullanılan önemli ilaçların bir parçasını oluşturan biyoaktif ürünlerin ve türevlerinin (sekonder metabolitler) önemli bir kaynağı haline getirir.

Doğal ürünler alanındaki ilk çalışmalar bakteriyel kaynaklıdır ve antibiyotik keşif döneminin başlangıcı olan 1940’lara kadar uzanmaktadır (Sekurova ve ark., 2019). Bu dönemde Gram-pozitif bakteriler arasında en büyük bakteri filumlarından birini temsil eden ve birçok habitatta bulunan aktinomisetlere büyük önem verilmiştir. (Meij ve ark., 2017). Çünkü tüberküloza

(*Mycobacterium tuberculosis*) neden olan ajana karşı etkili olduğu kanıtlanan ilk antibiyotik streptomisin, aktinomiset filumuna ait bir toprak bakterisi olan *Streptomyces griseus*'tan keşfedilmiştir (Smith ve Waksman, 1947). Daha sonra antifungal nistatin, antibakteriyel eritromisin, vankomisin, novobiosin, oleandomisin ve antikanser ajanı doksorubisin, aktinomisin dahil olmak üzere ilaçlara dönüştürülen çok sayıda çeşitli biyoaktif bileşik, aktinomisetlerden keşfedilmiştir (Harir ve ark., 2018). Bu keşiflerin büyük çoğunluğu, ilaç şirketlerinin dünyanın dört bir yanından toplanan toprak örneklerinden izole edilen çok sayıda aktinomisetleri taradığı 1950'ler ve 1970'lerde yapılmıştır (Sekurova ve ark., 2019). Son 30 yılda bakterilerden çok sayıda elde edilen ve büyük önem taşıyan antikanser, antibakteriyel, antikolesterol, antienfektif ajanlar ilaç endüstrisinde kullanılmıştır (Albarano ve ark., 2020) ancak halihazırda bilinen bileşiklerin tekrar tekrar yeniden keşfedilmesi, daha sonraki araştırma çabalarında cesaret kırıcı bir faktör haline gelmiştir (Sekurova ve ark., 2019).

Doğal ürünlerin keşfi alanı, ilk *Streptomyces* bakteri genomlarının dizilendiği 2000'li yılların başında temel bir değişime uğramıştır. Bu genom dizileri, daha önce keşfedilmemiş sekonder metabolit biyosentetik gen kümelerini (BGC) ortaya çıkarmış ve böylece genom madenciliği yaklaşımı doğmuştur (Baltz, 2019; Bauman ve ark., 2021).

“Genom madenciliği” terimi, yalnızca biyoaktif doğal ürünlerin biyosentetik yolunu değil aynı zamanda bunların olası fonksiyonel ve kimyasal etkileşimlerini saptamak için kullanılan her biyoinformatik araştırmayla ilişkilidir (Ziemert ve ark., 2016). Spesifik olarak genom madenciliği, organizmaların sekanslanmış genomları içindeki önceden karakterize edilmemiş BGC'lerin tanımlanmasını, bu gen kümeleri tarafından kodlanan enzimlerin dizi analizini ve gen kümelerinin ürünlerinin deneysel tanımlanmasını içerir (Trivella ve Felicio, 2018). Bu yaklaşımla beraber birçok mikrobiyal türde benzeri görülmemiş bir biyosentetik potansiyel ortaya çıkmıştır ve genom madenciliği sekonder metabolit üretiminde yer alan genlerin, bir metabolitin peptid montajını, düzenlenmesini, direncini, sentezinde yer alan enzimleri kodladığını ve fiziksel olarak BGC'lerin gruplar halinde kümelendiğini göstermiştir (Belknap ve ark., 2020). Bu ilk bilgiler ileri genetik yaklaşımlardan (fenotipten diziye ilerleme) doğarken, yeni nesil dizileme teknolojilerinin ve genomik yaklaşımların ortaya çıkışı, BGC keşfi, sentezi ve karakterizasyonu üzerine ters genetik yaklaşımlar (diziden fenotipe ilerleme) için fırsatlar sağlamıştır (Hannigan ve ark., 2019).

Genom madenciliği tamamen bilgi işlem teknolojisine ve biyoinformatik araçlara bağlıdır. Yeni bir genomdaki tüm genler tanımlandıktan sonra, bunlar kamuya açık veri tabanlarında işlevi bilinen genlerle karşılaştırılabilir. Doğal ürün biyosentezinde yer alan enzimleri kodlayan birçok proteinin sekansının bu veri tabanlarında mevcut olması durumunda, bunların dahil olduğu yolları sekans karşılaştırmaları ile belirlemek daha kolaydır

(Albarano ve ark., 2020). İlk yaklaşımlar, BLAST (Altschul ve ark 1990) gibi programları kullanarak basit BGC referans hizalama tekniklerini uygulamak ve sıklıkla manuel iyileştirmeyle eşleştirmekten ibaretti. Genom madenciliği yaklaşımının performansını artırmak için son on yılda web araçları ve veri tabanları geliştirilmiştir. Geliştirilen en önemli web araçlarından biri “Antibiotics and Secondary Metabolite Analysis SHell” (antiSMASH)’dir (Medema ve ark., 2011). İlk versiyonu 2011 yılında yayınlanan bu yaklaşım günümüzde kullanılan CLUSEAN, SMURF ve PRISM gibi hesaplama araçlarına öncülük etmiştir ve altın standart olarak kabul edilmektedir (Khaldi ve ark., 2010; Blin ve ark., 2019). AntiSMASH, biyosentetik gen kümeleri içeren genom bölgelerini tespit etmek için mikrobiyal genomları teker teker analiz eder, dizilerin tahminini gerçekleştirir ve tanımlanan gen kümelerinin daha ayrıntılı bir analizini sunarak bilinen BGC’leri, MIBiG (Terlouw ve ark., 2022) veri tabanıyla karşılaştırır (Blin ve ark., 2024).

Yapılan çalışmalar *Streptomyces* genomlarının 25-70 BGC’ye sahip olduğunu göstermiştir ve bu, diğer aktinobakteriyel cinslerden çok daha fazladır (Belknap ve ark., 2020). Ancak genomik bazlı yaklaşımlardaki son gelişmeler, streptomisetlerin sekonder metabolit biyosentetik gen kümelerinin (smBGC’ler) çoğunun laboratuvar fermantasyon koşulları altında aktif olmadığını ortaya çıkarmıştır (Rebets ve ark., 2014). Bu da streptomisetlerin sekonder metabolit üretme yeteneğinin eksik tahmin edildiğini ortaya koymaktadır. SmBGC’lerin, sık tekrarlı yapılar sahip çok modüler enzimleri kodlayan işlevsel, olağanüstü uzun genlerden (>5 kb) oluştuğunu (Lee ve ark., 2020) ve *Streptomyces*’in şu ana kadar karakterize edilen yaklaşık 1240 türüyle (Anonim, 2024) aktinobakterilerin en büyük cinsi olduğu göz önüne bulundurulduğunda, streptomycetes yeni sekonder metabolitlerin keşfi için çok değerli bir kaynaktır.

Yeni sekonder metabolitlerin keşfinin önemi, bakteriyel patojenlerdeki antimikrobiyal direncin bir halk sağlığı sorunu olmasına dayanmaktadır. Antibiyotik direnci, bakterilerin onları öldürmek veya büyümelerini inhibe etmek için tasarlanmış antibiyotiklere maruz kalmaya direnme yeteneğidir (Mancuso ve ark., 2021). Antimikrobiyal direncin (AMR) doğal bir süreç olmasına rağmen, bir küresel sorun haline gelmesinin başlıca sebebi antibiyotiklerin aşırı kullanımıdır (Coculescu, 2009). Bununla birlikte, prevalansındaki artışın sebebi olan diğer faktörler de "sosyoekonomik belirleyiciler" olarak adlandırılan zayıf toplum hijyeni, koruyuculu gıdalar, hastane ve kliniklerde zayıf enfeksiyon kontrolü, çevrede antibiyotik birikimi ve bunların hayvan ve gıda endüstrilerinde kullanımıdır (Collignon ve Beggs, 2019). Bu da Gram-pozitif ve negatif bakterilerdeki çoklu ilaca dirençli türlere, geleneksel antimikrobiyal ilaçlarla tedavi edilmesi zor, hatta tedavi edilemeyen enfeksiyonlara yol açmıştır. Ortaya çıkan dirençte çarpıcı artışlar meydana gelmekte ve bu durum zayıf enfeksiyon kontrol uygulamalarıyla birleştğinde dirençli bakteriler diğer hastalara ve çevreye

kolayca yayılmaktadır (Frieri ve ark., 2017). Antibiyotik direncinin gelişmesine karşı stratejiler bulmak, yaşam bilimleri camiası ve halk sağlığı için büyük bir küresel zorluktur. Geçtiğimiz on yılda, bir veya daha fazla antibiyotiğe dirençli insan patojenik bakterilerde, dünya çapında çarpıcı bir artış görülmektedir (Chellat ve ark., 2016). Dirençli mikroorganizmaların neden olduğu enfeksiyonlar geleneksel tedaviye yanıt vermemekte, son çare olarak kullanılan antibiyotikler bile etkisini yitirmektedir. Bakteriyel dirençle mücadele için acil çözüm bulunmasına ihtiyaç duyulmaktadır (Frieri ve ark., 2017).

Şu anda dünya çapında her yıl en az 700.000 kişi AMR nedeniyle ölmektedir. Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ), yeni ve daha iyi tedaviler olmazsa bu sayının 2050 yılına kadar 10 milyona çıkabileceğini öngörmektedir. 2017'de, artan antibiyotik direncinin ışığında, DSÖ, insan sağlığına en büyük tehdidi oluşturan patojenleri ESKAPE (Enterococcus faecium, Staphylococcus aureus, Acinetobacter baumannii, Pseudomonas aeruginosa, Klebsiella pneumoniae ve Enterobacter türleri) kısaltmasıyla yayınlamıştır (Mancuso ve ark., 2021). Hastalık Kontrol ve Önleme Merkezlerine göre, yalnızca Amerika Birleşik Devletleri'nde her yıl 3 milyona yakın insan, antibiyotiğe dirençli bakteri veya mantarların çeşitli türleri veya suşları ile enfekte olmakta ve bu hastalığa yakalananların 35.000'den fazlası ölmektedir (Church ve McKillip, 2021).

Dünya çapında önemli diğer bir halk sağlığı sorunu da kanserdir. Kanser, 2018'de tahminen 18,1 milyon yeni vaka ve 9,6 milyon ölümle dünya çapında morbidite ve mortalitenin ana nedenidir (Cotas ve ark., 2020). 200'den fazla kanser türü vardır ve bazıları vücuttaki diğer dokulara yayılarak metastazlara ve ölüme yol açmaktadır (Hussein ve Abdullah, 2020). Dünya Sağlık Örgütü'nün raporuna göre kanser vakalarının 2030 yılında küresel olarak yaklaşık %68 oranında artacağı ve bu hastalık nedeniyle 13 milyon ölüm yaşanacağı öngörülmektedir (Mondal ve ark., 2020). Şu anda Amerika Birleşik Devletleri'nde ikinci önde gelen ölüm nedeni kanserdir (Siegel ve ark., 2022). Özellikle erkeklerde akciğer/bronş kanseri ve kadınlarda meme kanseri gibi yaygın vakalar için yeni kemoterapi keşfetmeye yönelik ortak çabalar gerektirmektedir (Samarakoon ve ark., 2014). Kemoterapiler, kanser hücrelerini yok edebilen veya büyümesini önleyebilen ilk tedavi yöntemidir. Bununla birlikte, kemoterapötik ilaçların neredeyse tümünün, yaşamı tehdit edecek kadar ciddi yan etkileri vardır (Hussein ve Abdullah, 2020). Bu nedenle yeni ve daha güvenli antikanser ilaçlara ihtiyaç vardır. Yakın geçmişte ilaç endüstrisinin doğal ürünlere olan ilgisinde bir azalma olmasına rağmen, bu ürünler kanseri tedavi etme ve önleme konusundaki önemli potansiyeli gereği yeni, etkili ve güvenilir ilaçlar elde etmek için en iyi platformdur. Doğa, biyoaktif ve çeşitli antikanser metabolitler açısından zengin bir kaynak olmaya devam etmektedir ancak çıkarılan doğal ürünlerin nispeten çok azı kendi başlarına klinik açıdan faydalı ilaçlara dönüştürülmektedir (Mondal ve ark., 2020).

Günümüzde yeni antikarsinojenik farmasötik ilaçların tanımlanması ve geliştirilmesinde doğal ürünlerin temel önceliği ve doğal ürün kaynaklarından yeni moleküler işlevselliklerin çıkarılmasında disiplinler arası iş birliğinin değeri kapsamlı bir şekilde araştırılmaktadır ve araştırılmaya devam edilmelidir (Banerjee ve ark., 2019).

SONUÇ

Kanser gibi ciddi hastalıkların görülme sıklığının artması, antibiyotik direncinin artık küresel bir sorun olması ve mevcut ilaçların etkinliğinin azalması nedeniyle yeni ilaç varlıklarının keşfedilmesine yönelik acil ihtiyaç vardır. Bu noktada genom madenciliği yaklaşımıyla biyoteknolojik açıdan ilgi çekici yeni doğal bileşikler kodlayan genleri tahmin etmek büyük bir önem arz etmektedir.

REFERANSLAR

- Albarano, L., Esposito, R., Ruocco, N., & Costantini, M. (2020). Genome mining as new challenge in natural products discovery. *Marine drugs*, 18(4), 199.
- Almeida, E. L., Kaur, N., Jennings, L. K., Carrillo Rincón, A. F., Jackson, S. A., Thomas, O. P., Dobson, A. D. (2019). Genome mining coupled with OSMAC-based cultivation reveal differential production of surugamide A by the marine sponge isolate *Streptomyces* sp. SM17 when compared to its terrestrial relative *S. albidoflavus* J1074. *Microorganisms*, 7(10), 394.
- Altschul, S. F., Gish, W., Miller, W., Myers, E. W., Lipman, D. J. (1990). Basic local alignment search tool. *Journal of molecular biology*, 215(3), 403-410.
- Anonim, (2024). <http://www.bacterio.net/streptomyces> adresinden 15 Kasım 2024 tarihinde alınmıştır.
- Baltz, R. H. (2019). Natural product drug discovery in the genomic era: realities, conjectures, misconceptions, and opportunities. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 46(3-4), 281-299.
- Banerjee, S., Bose, S., Mandal, S. C., Dawn, S., Sahoo, U., A Ramadan, M., Mandal, S. K. (2019). Pharmacological property of pentacyclic triterpenoids. *Egyptian Journal of Chemistry*, 13-35.
- Bauman, K. D., Butler, K. S., Moore, B. S., Chekan, J. R. (2021). Genome mining methods to discover bioactive natural products. *Natural Product Reports*, 38(11), 2100-2129.
- Belknap, K. C., Park, C. J., Barth, B. M., Andam, C. P. (2020). Genome mining of biosynthetic and chemotherapeutic gene clusters in *Streptomyces* bacteria. *Scientific Reports*, 10(1), 2003.
- Blin, K., Shaw, S., Medema, M. H., Weber, T. (2024). The antiSMASH database version 4: additional genomes and BGCs, new sequence-based searches and more. *Nucleic acids research*, 52(D1), D586-D589.
- Blin, K., Shaw, S., Steinke, K., Villebro, R., Ziemert, N., Lee, S. Y., Weber, T. (2019). antiSMASH 5.0: updates to the secondary metabolite genome mining pipeline. *Nucleic acids research*, 47(W1), W81-W87.
- Coculescu, B. I. (2009). Antimicrobial resistance induced by genetic changes. *Journal of medicine and life*, 2(2), 114.

- Collignon, P., Beggs, J. J. (2019). Socioeconomic enablers for contagion: factors impelling the antimicrobial resistance epidemic. *Antibiotics*, 8(3), 86.
- Cotas, J., Marques, V., Afonso, M. B., Rodrigues, C. M., Pereira, L. (2020). Antitumour potential of *Gigartina pistillata* carrageenans against colorectal cancer stem cell-enriched tumourspheres. *Marine drugs*, 18(1), 50.
- Frieri, M., Kumar, K., Boutin, A. (2017). Antibiotic resistance. *Journal of infection and public health*, 10(4), 369-378.
- Hannigan, G. D., Prihoda, D., Palicka, A., Soukup, J., Klempir, O., Rampula, L., Bitton, D. A. (2019). A deep learning genome-mining strategy for biosynthetic gene cluster prediction. *Nucleic acids research*, 47(18), e110-e110.
- Harir, M., Bendif, H., Bellahcene, M., Fortas, Z., Pogni, R. (2018). Streptomyces secondary metabolites. *Basic biology and applications of actinobacteria*, 6, 99-122.
- Hussein, H. A., Abdullah, M. A. (2020). Anticancer compounds derived from marine diatoms. *Marine Drugs*, 18(7), 356.
- Khaldi, N., Seifuddin, F. T., Turner, G., Haft, D., Nierman, W. C., Wolfe, K. H., Fedorova, N. D. (2010). SMURF: genomic mapping of fungal secondary metabolite clusters. *Fungal Genetics and Biology*, 47(9), 736-741.
- Larsson, D. G., Flach, C. F. (2022). Antibiotic resistance in the environment. *Nature Reviews Microbiology*, 20(5), 257-269.
- Lee, N., Kim, W., Hwang, S., Lee, Y., Cho, S., Palsson, B., Cho, B. K. (2020). Thirty complete Streptomyces genome sequences for mining novel secondary metabolite biosynthetic gene clusters. *Scientific data*, 7(1), 55.
- MacGowan, A., Macnaughton, E. (2017). Antibiotic resistance. *Medicine*, 45(10), 622-628.
- Mancuso, G., Midiri, A., Gerace, E., Biondo, C. (2021). Bacterial antibiotic resistance: The most critical pathogens. *Pathogens*, 10(10), 1310.
- Medema, M. H., Blin, K., Cimermanic, P., De Jager, V., Zakrzewski, P., Fischbach, M. A., Breitling, R. (2011). antiSMASH: rapid identification, annotation and analysis of secondary metabolite biosynthesis gene clusters in bacterial and fungal genome sequences. *Nucleic acids research*, 39(suppl_2), W339-W346.
- Mondal, A., Bose, S., Banerjee, S., Patra, J. K., Malik, J., Mandal, S. K., Bishayee, A. (2020). Marine cyanobacteria and microalgae metabolites-A rich source of potential anticancer drugs. *Marine Drugs*, 18(9), 476.
- Newman, D. J., Cragg, G. M. (2014). Marine-sourced anti-cancer and cancer pain control agents in clinical and late preclinical development. *Marine drugs*, 12(1), 255-278.
- Rebets, Y., Brötz, E., Tokovenko, B., Luzhetskyy, A. (2014). Actinomycetes biosynthetic potential: how to bridge in silico and in vivo?. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 41(2), 387-402.
- Samarakoon, K. W., Ko, J. Y., Lee, J. H., Kwon, O. N., Kim, S. W., Jeon, Y. J. (2014). Apoptotic anticancer activity of a novel fatty alcohol ester isolated from cultured marine diatom, *Phaeodactylum tricornutum*. *Journal of functional foods*, 6, 231-240.
- Sekurova, O. N., Schneider, O., Zotchev, S. B. (2019). Novel bioactive natural products from bacteria via bioprospecting, genome mining and metabolic engineering. *Microbial biotechnology*, 12(5), 828-844.

- Siegel, R. L., Miller, K. D., Wagle, N. S., Jemal, A. (2023). Cancer statistics, 2023. *Ca Cancer J Clin*, 73(1), 17-48.
- Smith, D. G., Waksman, S. A. (1947). Tuberculostatic and tuberculocidal properties of streptomycin. *Journal of Bacteriology*, 54(2), 253-261.
- Terlouw, B. R., Blin, K., Navarro-Muñoz, J. C., Avalon, N. E., Chevrette, M. G., Egbert, S., Medema, M. H. (2023). MIBiG 3.0: a community-driven effort to annotate experimentally validated biosynthetic gene clusters. *Nucleic acids research*, 51(D1), D603-D610.
- Trivella, D. B., de Felicio, R. (2018). The tripod for bacterial natural product discovery: genome mining, silent pathway induction, and mass spectrometry-based molecular networking. *MSystems*, 3(2), 10-1128.
- Van der Meij, A., Worsley, S. F., Hutchings, M. I., van Wezel, G. P. (2017). Chemical ecology of antibiotic production by actinomycetes. *FEMS microbiology reviews*, 41(3), 392-416.
- Ziemert, N., Alanjary, M., Weber, T. (2016). The evolution of genome mining in microbes—a review. *Natural product reports*, 33(8), 988-1005.

