

BİDGE Yayınları

İnşaat Mühendisliğinde Yenilikçi Yaklaşımlar ve İnşaat
Teknolojileri

Editör: Doç. Dr. Atila KUMBASAROĞLU

ISBN: 978-625-6707-72-6

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayımlama Tarihi: 25.12.2023

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltpe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



Önsöz

İnşaat Mühendisliği, kapsamında yer almış Yapı, Mekanik, Hidrolik, Geoteknik ve Ulaşım bilim alanları sayesinde, inşaat ve/veya alt-yapı/üst-yapı teknolojisinde sürdürülebilir gelişmeler, temel bilimsel başarılar ve çok kriterli karar verme teorileri ile desteklenmektedir. İnşaat Mühendisliğinde, daha yenilikçi değerlendirmeler açısından inşaat seçim süreçlerini desteklemek için uygulanan/geliştirilen teorik/parametrik veya deneysel yöntemlerle en son teknolojiyi gözden geçirmek her zaman amaçlanmıştır.

İnşaat Mühendisliğinde bilimsel üretim, son elli yılda giderek artan ivmeyle hızlanmaktadır ve yenilikçi yaklaşımlar (i) yeni malzemeler ve sistemler, (ii) dijitalleşme, (iii) çevresel etki ve (iv) verimlilik açısından sürekli gelişmektedir. Bunların dışında analiz, her bir sektör için farklı yenilikçi oranlarını ortaya koymaktadır.

Bu kitap kapsamında; Siirt Yığma Yapılı CAS Evlerinin Özellikleri, Deprem Yönetmeliğine Göre Yüksek Katlı Betonarme Konut binalarında Proje Hataları, Hibrit, Cam Elyaf Takviyeli Polimer Çubuk (GFRP) ve Çelik Donatıların Performanslarının Karşılaştırmalı İncelenmesi, Çok Fazlı Atık-su Boru Hatlarında Yumurta Kesitli Boruların Kullanımı, Türkiye'nin Enerji ve Ulaşım Altyapısının Sürdürülebilirliği ve Çevresel Etkileri: Şehirleşme, Enerji ve Emisyonlar Üzerine Bir İnceleme, Karayolu Taban Zemini Su İçeriğinin Esnek Yol Üstyapısına Etkileri, Rijit Yol Üstyapı Kaplamalarının Hesabında Elastik Zemin Modelleri, Polimerik Kompozitler için Bazı Geleneksel ve Yenilikçi Alev Geciktiricilerdeki Gelişmeler, Deniz Suyu Depolamalı Hidroelektrik Santrallerin Türkiye İçin Önemi ve Hidrolik İletkenlik ile Elektriksel

İletkenlik Arasındaki Matematiksel İlişkinin Belirlenmesi yenilikçi konularına değinilmiştir.

Kitabın hazırlanmasında ve yayınlanmasında başta BİDGE YAYINLARI olmak üzere emeği geçen tđm yazarlara teŖekkđr ederiz.

Editđr

Doç. Dr. Atila KUMBASAROĞLU

İÇİNDEKİLER

Önsöz	3
İÇİNDEKİLER	5
Siirt Yığma Yapılı Cas Evlerinin Özellikleri	8
Murat DOĞRUYOL	8
Ersin AYHAN	8
Abdulhalim KARASIN	8
Deprem Yönetmeliğine Göre Yüksek Katlı Betonarme Konut binalarında Proje Hataları	25
Çağla ÇOLAK	25
Onur DEMİRCİ	25

Hibrit, Cam Elyaf Takviyeli Polimer Çubuk (GFRP) ve Çelik Donatıların Performanslarının Karşılaştırmalı İncelenmesi	60
Mahsun DEMİR	60
Batuhan DAZ	60
Kamil Bekir AFACAN.....	60
Caner ŞİMŞEK.....	60
Melih Cemal KUŞHAN	60
Çok Fazlı Atıksu Boru Hatlarında Yumurta Kesitli Boruların Kullanımı	76
Esin ACAR.....	76
Türkiye'nin Enerji ve Ulaşım Altyapısının Sürdürülebilirliği ve Çevresel Etkileri: Şehirleşme, Enerji ve Emisyonlar Üzerine Bir İnceleme	96
Emine ÇORUH.....	96
Abdülbaki BİLGİÇ.....	96
Karayolu Taban Zemini Su İçeriğinin Esnek Yol Üstyapısına Etkileri.....	126
İlker ŞAHİNOĞLU	126
Erdoğan KESKİN.....	126
Rijit Yol Üstyapı Kaplamalarının Hesabında Elastik Zemin Modelleri.....	147
İlker ŞAHİNOĞLU	147
Kanat Burak BOZDOĞAN	147
Polimerik Kompozitler için Bazı Geleneksel ve Yenilikçi Alev Geciktiricilerdeki Gelişmeler	169
Ceyda BİLGİÇ	169
Şafak BİLGİÇ.....	169

Deniz Suyu Depolamalı Hidroelektrik Santrallerin Türkiye İçin Önemi.....	195
Güngör GÜNEY	195
Yıldırım BAYAZIT.....	195
Hidrolik İletkenlik ile Elektriksel İletkenlik Arasındaki Matematiksel İlişkinin Belirlenmesi	212
Erdoğan KESKİN.....	212
Sami ARSOY	212

BÖLÜM I

Siirt Yığma Yapılı Cas Evlerinin Özellikleri

Murat DOĞRUYOL¹
Ersin AYHAN²
Abdulhalim KARASIN³

Giriş

İnsanoğlu barınma ihtiyacını karşılamak için antik çağdan günümüze en çok kerpiç, ahşap ve taş gibi doğal malzemelerden inşa edilen yapıları tercih etmiştir. Tarihi yapılar geçmişten günümüze insanların kültürlerini, dinlerini, dillerini ve medeniyetlerini ve gelişmişlik düzeylerini yansıtan önemli referansları kapsar. Geçmişten günümüze kalker, bazalt ve mermer gibi doğal taşlar

¹ Siirt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, mdogruyol@siirt.edu.tr

² Siirt Üniversitesi TBMYO, İnşaat Teknolojisi Bölümü, ersinayhan@siirt.edu.tr, ersinayhan@msn.com

³ Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, karasin@dicle.edu.tr

kendine özgü yapısı ile yapı alanında kullanılmıştır (Halifeoglu vd., 2016; Karasin ve Isık, 2016). Taşların başkaca türlü yapı malzemelerine oranla daha kolay işlenebilmesi, mekanik ve elektrik tesisatlarının geçirilebilmesi, taşlara rahatça şekil verilebilmesi, çivileme ve vidalama imkânlarına müsait olması bakımından özelliklere sahip olması, sağladığı avantajlardan ötürü tercih edilmesine yol açmıştır (Adin, 2007).

Nesilden nesile aktarılmış olan gelenek, uygulamalar, sanatsal ifadeler ve değerlerin dahil olduğu yaşam biçimlerinin bir ifadesi olarak tanımlanan kültürel mirasımızın önemli öğelerin başında tarihi yapılar gelmektedir. Büyük çoğunlukla ana ögesi taş duvar olan bu tip yapıların korunarak sonraki nesillere güvenli bir şekilde aktarılması çeşitli onarım ve güçlendirme tedbirleri ile mümkün olduğunu gösteren birçok çalışma literatürde yer almaktadır (Işık vd., 2019; Işık vd., 2017; Karasin ve Işık, 2016; Hadzima Nyarko et al., 2017; Erdil et al., 2018). mühendislik bilim alanları ile ilgili bu çalışmaların yanında kültürel miras konusunda arkeoloji, mimarlık ve sanat tarihi bilim alanları da yakından ilgilenmektedir.

Doğal taş bakımından zengin olan bölgelerde yapılaşmanın mimari tasarım bakımından da zenginleştiği söylenebilir. Türkiye’de özellikle kırsal bölgelerde konut ve ahır olarak kullanılan bir veya iki katlı yığma yapılar, çoğunlukla yerel malzeme ve koşullarda taş duvarlar sıkça kullanılmaktadır (Isık vd. 2018). Bazı yapılarda taşı, mermer veya kireç taşı/ bazalt, mermer/bazalt almaşık taşıyıcı sütunlar yapılmıştır. Kireç taşı ve mermer sütunların ile dört ayaklı minarede olduğu gibi bazen taşıyıcı bazen de süsleme amaçlı olarak kullanıldığı görülür (Toprak ve Kavak, 2012; Ugurlu ve Karasin, 2016). Taş yapıların genel özelliğine bakıldığında taşıyıcı olarak kullanılan malzemelerin boyutlarının büyük olduğu, dekoratif, süsleme amaçlı kullanılanların ise boyutlarının oldukça küçüldüğü anlaşılmaktadır. Doğal taş zenginliğinin taş işleme sanatına da doğrudan olumlu etkilerinin olmasından ötürü, dönemdeki sektörel tarza da ayrı bir boyut kazandırmıştır.

Türkiye jeolojik yapısı bakımından doğal taş çeşitliliğinin yoğun olduğu ülkelerden biridir (Kazancı ve Gürbüz, 2014). Doğal taşlardan kireçtaşı olarak bilinen kalker taşı Mardin ilinde olduğu gibi Siirt ilinde de yaygın olarak görülmektedir.

Siirt ve çevresi önemli alçıtaşı yataklarına sahiptir, Kerkük hazne kayacı olan üst Eosen ve Oligosen kalkerli Midyat kalkerine eş olabilecek Orta Eosen yaşlı kireçtaşları formasyonunda kireç taşı, marn, şeyl, kumtaşı yaygın olarak görülmektedir (Türkunal, 1955; Koday vd., 2001; Sevindi, 2008).

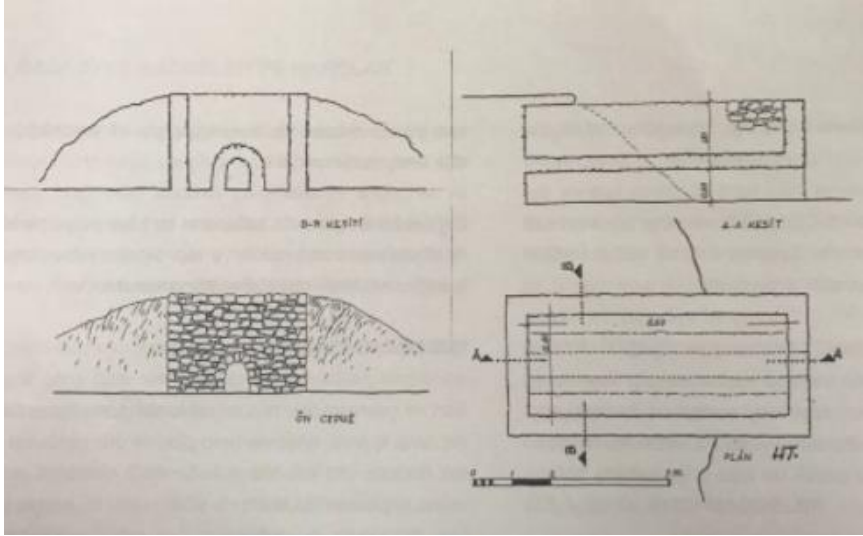
Siirt ili, kalker kayaçların yaygın şekilde bulunması, cas evlerinin ortaya çıkmasında önemli bir etkiye sahiptir. Cas evleri ismini kalker (kireç taşı) den almaktadır. Alçıtaşı ve kireçtaşının fırınlarda yakılıp öğütülmesi ile elde edilen cas adı verilen bağlayıcı malzeme ortaya çıkmaktadır (Şekil 1). Cas, yine kalker taşından yığma olarak inşa edilen cas evinin harç malzemesi olarak kullanılmaktadır. Cas evleri Siirt Merkezinde Tınastepe ve Ülkü mahallerinde dağınık şekilde rastlanmakta olup Tillo ilçesinde yaygın olarak kümelenmiş şekilde rastlanılmaktadır.



Şekil 1. Cas harcı örneği

Cas evlerinin yapısı

Hüsrev Tayla (2007) eserinde geleneksel cas harcı şu şekilde tarif etmektedir; 260 cm genişliğe, 660 cm uzunluğa ve 300 cm yüksekliğe sahip fırınlara jips (alçı taşı) doldurulur. Şekil 2’de şematik olarak gösterilen fırının altında tonozcuktan konulan odunlar ile 24 ile 35 saat kadar yakılmaktadır. Yakılarak sertleşen alçı taşı yeteri kadar sertlik derecesine ulaştığında soğumaya bırakıp öğütme işleminden sonra toz haline getirilen alçı, su ile harç halini almaktadır (Tayla, 2007). Bu harç ile yapılan evlere cas evi denmektedir.



Şekil 2. Cas fırını

Süslemeli dış kapılar kemer pencerelerin yanı sıra genel görüntüsü kaleye benzemektedir (Şekil 3). Cas evleri genellikle simetrik yapıda, duvarları 80 ile 120 cm arasında kalınlıkta moloz, kırma ve kesme taştan, bir veya iki kat halinde yığma olarak inşa edilmişlerdir.



Şekil 3. Geleneksel Cas evin genel görüntüsü

Cas malzemeden döşemeleri, kapı ve pencere açıklıkları meşe ağacından kiriş ve lentolar ile desteklenmiştir. Döşemeler ve açıklıklara zamanla demir profil destekler eklenmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Cas ev döşemesi ahşap hatıl ve demir profil destekler

Dış kapılar, “Mısraheyn” diye tabir edilen çift kanatlıdır ve Osmanlı kültürü olarak kapı kanatlarında gelen ziyaretçinin cinsiyetinin anlaşılması için tok (Erkek ziyaretçi) ve tiz (kadın ziyaretçi) ses tonuna sahip kapı tokmakları Cas evlerinde de görülmektedir (Şekil 5).



Şekil 5. Dış kapı doğraması ve çift kapı tokmağı

Siirt ve çevresinde Meşe ağacı yaygın olarak bulunması Cas evlerin kapı doğramalarında balkon direklerinde süslemeli olarak kullanılmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. Cas ev balkon ve ahşap doğraması

Doğal taştan yığma ve kubbeli tavanlara sahip olması evlerin doğal yalıtım olmasını, Cas evlerinin içerisinde kış aylarında ılık, yaz aylarında serin olmasını sağlamaktadır. Evlerde yiyecek pişirme ve ısınma amacı ile günümüzde “Şömine” olarak adlandırılan cas evlerindeki tabiri ile “Tefeye” kullanılmaktadır (Şekil 7).

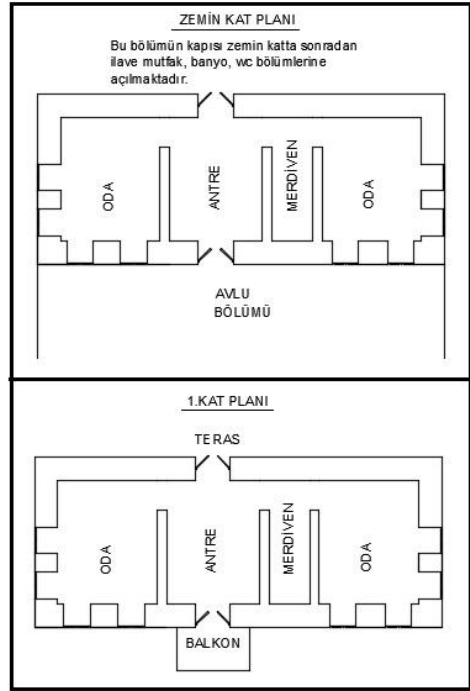


Şekil 7. Şömine (Koday vd., 2017).

Cas evlerinde giriş katında “Behu” adı verilen odada misafirler ağırlanmaktadır. Yemekler genelde evin zemin katta odaların arka kısmında “ Tabok” adı verilen mahsende saklanmaktadır (Koday vd., 2017).

Cas evlerinin giriş katı ile üst katları genellikle aynı plana sahiptir ve odalar geniş alanlara açılmaktadır. Oda kapıları günümüze göre daha geniş ve yüksektir. Cas olarak inşa edilmiş

Ertekin Evi Şekil 8.'de zemin ve 1.kat planları örnek olarak verilmiştir.



Şekil 8. Ertekin evine ait genel kroki

Cas evlerinde genel manada avlu kültürü de bulunmaktadır. Şekil 9'da, Cas Evinin avlusunda yer alan ayrıca restore edilmiş bir havuz olduğu görülmektedir. Ancak havuz restore edilmiş olsa bile yine de genel hatları bakımından kendisini yansıttığı söylenebilir.

Şekil 9'da yer alan havuzun tasarımı eski hali ile bire bir aynıdır. Havuzun tabanında eski havuza ait desen görülebilir.



Şekil 9. Ertekin evinin avlusunda yer alan havuz

Siirt'in Cas evleri ile Mardin evlerinden farkı

Tarihi taş evlerin genel yapısı incelendiğinde bulunduğu bölgenin kültürü, yaşam tarzının etkisi ile başka bölgelerde bulunan emsalleri ile aralarında bir takım farklılıklara sahip olduğu anlaşılmaktadır. Örneğin çalışma konusu olan Siirt İlindeki Cas Evlerin dışının dış kaplama sıvasına sahip olduğu görülmekte iken yakın konumda olan ve yine doğal taş bakımından zengin olan Mardin ilinde ise genel itibari ile bu sıva kaplamalarına rastlanmamaktadır. Ayrıca mimari bakımdan da farklılıklara sahiptirler. Şu anda bile Mardin ilinde taş işleme sanatının devam ettiği gözlemlenebilirken Siirt ilinde bu yönde çalışmaların artık pek kalmadığı, mevcut taş yapıların da risk altında olduğu görülmektedir.

Tarihi Siirt Cas Evlerinin özgünlüğünü ortaya koymak bakımından Mardin örneğindeki Tarihi Mardin Taş Evleri ile arasındaki farkları değerlendirmek gerekirse;

- Mardin ile Siirt illerinin eski yerleşim alanları incelendiğinde Mardin ilindeki yerleşimlerin Siirt ilindeki yerleşimlere oranla daha engebeli ve dik eğimlere sahip olduğu görülmektedir. Bu durum Mardin ilinde zemin engebelerinden ötürü inşa edilen binaların teraslama mantığına benzer bir mantık ile kademeli bir yerleşim biçimi ile oluşturulmasına sebep olmuştur (Bekleyen vd., 2014). Ancak Siirt Cas Evlerinde kademeli yerleşim biçimi yok denebilir.
- Duvar örgü harcı olarak Mardin’de kum ve kireç karışımı bir harç türü kullanılmış iken (Bekleyen vd., 2014), Siirt ilinde ise örgü harcı olarak adına Cas diğer adı ile Jips denilen alçı taşlarının Şekil 2’de gösterilen yüksek sıcaklıklardaki fırınlarda yakılıp sonrada öğütülmesi ile elde edilen kaba bir harç kullanılmaktadır. Cas evlerinin hammaddesini oluşturan çakıtaşı, kumtaşı, şeyl, marn, kalker kayaçları aynı zamanda yapıların kurulu olduğu jeolojik yapıyı da yansıtmaktadır (Koday vd., 2017).
- Siirt Cas Evlerinin duvar kalınlıkları yaklaşık olarak 80-120 cm aralığında iken (Nas, 2020), Mardin Taş Evlerinin duvar kalınlıkları ise 70-120 cm aralığında bulunmaktadır (Bekleyen vd., 2014). Her ikisinde de bölme duvar kalınlıkları daha da azdır.
- Genel olarak Mardin Taş Evlerinde ahşap ilave duvar örgüsüne rastlanmamaktadır. Ancak Siirt Cas Evlerinin bazılarında ahşap ilave parçalar ile örneğin günümüzde adını lento verdiğimiz pencere veya kapı üst bölgelerine yerleştirilen elemanlar ile duvar yüksekliklerinin fazla olması durumunda kullanılan kullanılan hatılları temsil eden elemanlar kullanılmıştır. Dikkat çeken en önemli husus ise kullanılan hiçbir ahşap elemanının öylesine atılmamış olması, tamamen Şekil 10’da görüldüğü gibi görevini yerine getirmeye yönelik ahşap uygulamaları gözlenmiştir.



Şekil 10. Örnek bir cas evinde pencere üstü boydan boya ahşap lento

Sonuç

Günümüzde Siirt il merkezinde yığma olarak inşa edilmiş Cas evlerinden çok azı ayakta kalabilmiştir. Söz konusu Cas Evlerinin özgün malzeme özellikleri ile Mardin evleri ile benzerlik göstermekle beraber Türkiye’de başka bölgelerde emsallerinin olmadığı düşünülmektedir. Bu durum Cas Evlerini kendisine özgü farklı bir bakış açısı, mimarisi ve malzemesi bakımından daha özel bir yere oturtmaktadır.

Son yıllarda süre gelen restorasyon çalışmaları ile mevcut Cas Evlerinin işlevlendirilerek ayakta kalmasının sağlanması ile önemli katkılar sunulmaktadır. Bununla birlikte henüz yasal olarak koruma altına alınmamış veya restorasyon ihtiyacı duyan ayakta

kalmış Cas Evlerinin tespit edilerek kültürel mirasa katılması büyük önem arz etmektedir.

Kaynakça

Adin, H. (2007). Mardin ve Midyat'ta kullanılan bina yapı taşlarının bazı fiziksel özellikleri. *Mühendis ve Makina*, 48(570), 13-17.

Bahar NAS , (2020). Siirt Cas evleri mimari incelemesi ve bir örnek üzerinden restorasyon önerileri. *Ejons International Journal On Mathematics, Engineering - Natural Sciences*, 15, p. 761-769. Doi: 10.38063/ejons.331.

Bekleyen, A., Dalkılıç, N., & Nurtekin, Ö. (2014). Geleneksel Mardin Evi'nin Mekansal ve Isısal Konfor Özellikleri. *TÜBAV Bilim Dergisi*, 7(4), 28-44.

Erdil, B., Tapan, M., Akkaya, İ., Korkut, F., (2018). Effects of structural parameters on seismic behaviour of historical masonry minaret, *Periodica Polytechnica. Civil Engineering*, 62(1):148-161.

Halifeoğlu, F. M., Toprak, Z. F., & Kavak, O. (2016). Architectural and hydrological features of the historical basalt bridges in Diyarbakir-Turkey. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, 3, 51-62.

Hadzima-Nyarko, M., Mišetić, V., Morić. D., (2017). Seismic vulnerability assessment of an old historical masonry building in Osijek, Croatia, using Damage Index. *Journal of Cultural Heritage*, 28:140-150.

Işık E., Antep, B., & Karaşin, İ. B. (2018). Structural Analysis of Ahlat Emir Bayındır Bridge. *Bitlis Eren University Journal of Science and Technology*, 8(1), 11-18.

Işık, M.F., Işık, E., Bülbül, M.A., Karaşin, İ.B., (2017). QR code application for geometric location and information of historical structures. In *International Conference on Advanced Engineering Technologies (ICADET 2017)*, Bayburt, Turkey.

İnalcan, S. Ş. (2021). Tillo geleneksel konutlarının fiziksel ve fonksiyonel kullanımının değerlendirilmesi (Master's thesis, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Karasin, I. B., & Isik, E. (2016). Protection of Ten-Eyed Bridge in Diyarbakır. *Budownictwo i Architektura*, 15(1), 87-94.

Karasin, I. B., Isik, E., Öncü, M. E., & Antep, B. (2019). Ahlat ilçesinde yer alan Bezirhane beden duvarının sonlu elemanlar yöntemi ile analizi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 10(2), 721-730.

Kazancı, N., & Gürbüz, A. (2014). Jeolojik miras nitelikli Türkiye doğa taşları. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 57(1), 19-44.

Koday, S., Koday, Z., Karakuzulu Z., (2001) "Van-Hakkâri-Şırnak ve Siirt Arasında Coğrafi Gözlemler", *Doğu Coğrafya Dergisi* 7(6), S:105-121

Koday, S., Koday, Z., Karakuzulu Z.,(2017). "Siirt ilinde bir mesken kültürü: Cas evleri." *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi* 21.4 (2017): 1369-1385.

Sevindi, C. (2008). Sağlarca Kaplıcası'nın (Siirt) Termal Turizm Potansiyeli. *Atatürk Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Sosyal Bilimler Dergisi*, (40), 115-131.

Tayla, H. (2007). *Geleneksel Türk mimarisinde yapı sistem ve elemanları*. Türkiye Anıt Çevre Turizm Değerlerini Koruma Vakfı.

Toprak, V., & Kavak, O. (2012). Suriçi Diyarbakır Tarihi Binalarındaki Silindirik Kaya Kolonların Jeolojik İncelemesi. *Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi*, (11), 23-36.

Türkunal, S. (1955). Doçent Enver Altınlının" Siirt Güney Doğusunun Jeolojisi ve Hakkâri Güneyinin Jeolojisi adlı iki neşriyatı hakkında. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 6(1), 61-80.

Uğurlu, M. A., & Karaşin, A. (2016). Evaluation of the Structural Damages of the Four-Legged Minaret. In 12th International Congress on Advances in Civil Engineering.

BÖLÜM II

Deprem Yönetmeliğine Göre Yüksek Katlı Betonarme Konut binalarında Proje Hataları

Çağla ÇOLAK¹
Onur DEMİRCİ²

Giriş

Yapının Taşıyıcı sistem tasarımının temeli mimari proje ile atılır. Yapının mimari projesine göre belirlenen taşıyıcı sistemin Deprem yönetmeliğine uygun olması gerekmektedir. Bu nedenle mimarın taşıyıcı sistem tasarımında emniyet, ekonomi ve estetik parametrelerini optimize edecek bilgi ve tecrübeye sahip olması önem arz etmektedir. Günümüzde artan nüfus nedeniyle bina yapılacak alanların azalması zemin açısından problemlili alanlarda

¹ Dr.Öğretim Üyesi, Avrasya Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 61000, Trabzon, Türkiye.

² Diğer,, Avrasya Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat mühendisliği Bölümü, 61000, Trabzon, Türkiye.

yüksek katlı betonarme bina yapımını arttırmıştır. Artan depremler ve yıkılan binalar, proje hatalarının azaltılmasına yönelik ciddi kararların alınması zorunluluğunu beraberinde getirmiştir. Günümüze kadar gelinen bu süreçte, taşıyıcı sistem hatalarına bağlı yıkılan binalar bir çok yönetmeliğin yenilenmesinin temel nedeni olmuştur. Özellikle 2000 yılından sonra Marmara ve Van Depremlerinin önlemlerin genişletilmesi konusunda etkisi olmuştur. Bu bağlamda, en son 2007 yılı deprem yönetmeliğinde görülen eksiklikler 2018 deprem yönetmeliği ile tamamlanmaya çalışılmıştır.

Mimarlık mesleğinde depreme dayanımlı yapı tasarımının önemi ile ilgili bir çok araştırma bulunmaktadır (Türk, 2003). Mimari proje sürecinde yapılan hatalara yönelik araştırmalar ve sonuçlarını şöyle özetleyebiliriz;

Bingöl (2020), Depreme Dayanıklı Mimari Tasarım Aşamasında Derin Öğrenme ve Görüntü Sınıflama Yöntemi İle Burulma Düzensizliği Tespiti isimli Yüksek lisans tezinde, Mühendislik hesapları ne kadar doğru yapılmış olursa olsun, özen gösterilmeden yapılmış taşıyıcı sistem ve plan kurgusu tasarımları ile depremlerdeki can ve mal kaybının önüne geçebilmenin mümkün olmayacağını, ülkemizin içinde bulunduğu coğrafya ve sahip olduğu deprem riski düşünüldüğünde, deprem mimarlığının büyük önem kazandığını ve depreme dayanıklı yapı tasarımının sadece inşaat mühendislerinin değil mimarların da sorumluluk alanına girdiğini ortaya koymaktadır.

Deprem yönetmeliği 2018'e göre, Birbirine dik iki deprem doğrultusunun herhangi biri için, herhangi bir katta en büyük görelî kat ötelemesinin o katta aynı doğrultudaki ortalama görelî ötelemeye oranı olarak ifade eden Burulma Düzensizliği Katsayısının (η_{bi}) 1.2'den büyük olması gerekmektedir. (T.C. Resmi Gazete, 2018). Eğer Taşıyıcı sistem tasarımında, rijitlik merkezi ile kütle merkezi çakışmıyorsa yapı rijitlik merkezi etrafında dönecektir (Doğangün,2018). Bu bağlamda, burulma düzensizliği, mimari tasarım sürecinde yapılan hatalar, mühendislik hesapları, malzeme

seçimi, inşaat aşamasında yaşanabilecek sorunlar ve yönetmeliklere kadar bir çok hata beraberinde bir çok problemi de getirmektedir (Koç 2021). Potur ve Metin (2020), Mevcut Binalarda Taşıyıcı Sistem Düzensizliklerinin Belirlenmesine Yönelik Bir Çalışma başlıklı makalesinde, Deprem güvenli bir yapı için; deprem güvenli mimarlık anlayışına yönelik taşıyıcı sistem tasarımını ve mimarlık eğitiminin önemini ortaya koymaktadır. Albay (1994), Mesleğin temellerinin dayandığı mimarlık eğitiminde depremin yeri ve önemi araştırmasında, niceliksel ve niteliksel boyutlarıyla, küresel gündemi ayrı ayrı değerlendirilmiş ve bir karşılaştırma değerlendirmesiyle özetlemiştir. Yeni deprem yönetmeliği ile ilgili diğer araştırmalar, İçerik olarak bina kullanım aşamasında taşıyıcı sistem hatalarına bağlı oluşan yıkılma ve güçlendirilmeleri ve Türkiye genelinde hataların oranlarını kapsamakta, bir bölümü ise, burulma düzensizliğini 2018 yönetmeliği öncesi alçak katlı binalarda incelemektedir (Sever, 2010; Sargın, 2020; Kaplan ve diğerleri, 2007; Safa, 2018; Demir ve Dönmez, 2008; Koç, 2021).

Proje sürecinde, Mimari tasarım aşamasında sonra ki adım mühendislik (statik ve betonarme) hesaplarıdır. Statik ve Mimari projeler belediye, yapı denetim ve gerekli onayları aldıktan sonra değiştirilemeyen veya değiştirilmek istense bile tadilat projesi çizip değişiklik yapılan projelerdir. Bu projelerde ki hatalar, proje müdürü, şantiye şefi, saha mühendisi gibi teknik elemanların işini zorlaştırmaktadır. Ayrıca 1 Ocak 2011 tarihinden itibaren yürürlüğe giren Yapı Denetimi Kanunu çerçevesinde Yapı denetim kuruluşlarında toplamda üç taraf bulunmaktadır. Bunlar; yapı denetim şirketi, yapı sahibi, yapı müteahhididir. Yapı denetimi proje ve uygulama süreçlerini içermektedir. Proje sürecine bağlı görev yetkileri iki başlıkta özetleyebiliriz;

- a) Proje müelliflerince hazırlanan, yapının inşa edileceği arsa veya arazinin zemin ve temel raporları ile uygulama projelerini ilgili mevzuata göre incelemek, proje müelliflerince hazırlanarak doğrudan kendilerine teslim edilen uygulama projesi ve hesaplarını kontrol ederek, ilgili idareler dışında başka bir kurum

veya kuruluşun vize veya onayına tabi tutulmadan, ilgili idareye uygunluk görüşünü bildirmek.

- b) Yapı denetimini üstlendiğine dair ilgili idareye taahhütname vermek, yapı ruhsatının ilgili bölümünü imzalamak, bu yapıya ilişkin bilgileri yapı ruhsatı düzenleme tarihinden itibaren yedi gün içinde Bakanlığa bildirmek.

Yapı Denetim firmalarının proje süreci görev ve yetkileri, mimari, statik, elektrik ve mekanik projelerin belediye onayına gitmeden önce bünyesinde bulundurduğu denetçiler tarafından kontrol edilmesi ve uygun görülen projelerin onaylanmasıdır. Ancak Yapı denetim firmaları tarafından proje ve uygulama kontrollerinin başlamasına rağmen, ülkemizde proje denetiminin istenilen düzeyde olmadığı görülmektedir. Yapılan araştırmaların büyük çoğunluğu 2018 deprem yönetmeliği öncesinde olmak üzere yapı denetimi aksaklıklarına yönelik sonuçlar şunlardır;

Ülkemizde yeterli tecrübeye sahip olmadan, yasa ve yönetmeliklerin içeriğini özümseyemeden tüm mühendislere proje yapabilme imkânının sağlanması, Deneyim eksikliği, Müteahhit ve mal sahiplerinin kendilerini denetleyecek Yapı denetim şirketlerini seçmeleri ve yapı sahibi veya müteahhit ile yapı denetim kuruluşu arasındaki ticari ilişkiden dolayı yapı denetim kuruluşunun yapı sahibi veya müteahhit üzerinde yaptırım gücünün oluşmaması, yetersiz denetim, proje denetimi yapmakla sorumlu idarenin görevini ihmal etmesi durumunda bu ihmali tespit eden ve yasal yaptırım uygulama yetkisine sahip olan bir üst teknik otoritenin bulunmaması, ileride proje kusurlarından doğabilecek zararlardan dolayı proje müellifinin ve projeyi onaylayan ilgili idarenin cezai sorumluluğunun bulunmamasıdır. Yapı proje denetiminin, asli iş bulana kadar idare edilecek bir iş ya da emeklilik sonrası ek iş gibi düşünülmesidir (Pala ve Demir, 2017; Doğan, 2013; Yılmaz, 2017).

5 Şubat 2023 tarihli Maraş depremlerinde yapılan araştırmalar neticesinde aynı bölgede bazı binalarda hiç hasar olmamasına rağmen bazılarında mimari proje hatalarına bağlı göçme ve hasarlar tespit edilmiştir. Bunlar çekme kat bulunması nedeniyle

rijitlik düzensizliği, zemin katı dükkan olarak projelendirilen binalarda yumuşak kat düzensizliği ve proje aşamasında taşıyıcı sistemin belirlenmesinde sade, basit ve düzenli tasarım anlayışından uzaklaşmış olması, taşıyıcı sistemi oluşturan elemanların kesit boyutları, plandaki yerleşimleri ve tasarımındaki eksiklikler nedeniyle depreme dayanıklı tasarım ilkelerine uygun bir taşıyıcı sistem oluşturulamamasıdır (Avşar ve diğerleri, 2023; Deprem Raporu, 2023)

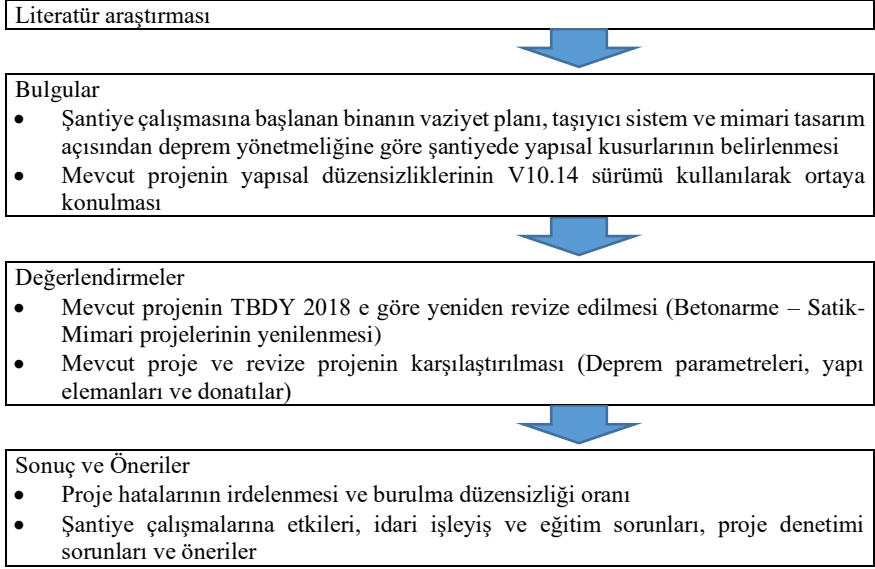
Araştırma alanı olarak, Trabzon ilinde inşaat aşamasında olan, Yomra ilçesinde Yüksek katlı betonarme konut binası seçilmiştir. Araştırmanın amaçlarını şöyle özetleyebiliriz:

- Yüksek katlı konut binalarında günümüzde mimari proje ve taşıyıcı sistem hataları
- Şantiye sürecine getireceği olumsuz etkiler
- Günümüzde Yapı denetim eksiklikleri, Teknik, İdari, eğitim sorunları
- 2018 deprem yönetmeliğinin uygulanırılığında aksaklıklar ve öneriler.

Yöntem

Araştırmanın Yöntemi ve Amaçları

Araştırma modeli Şekil 1’de verilmektedir.



Şekil 1. Araştırma Modeli

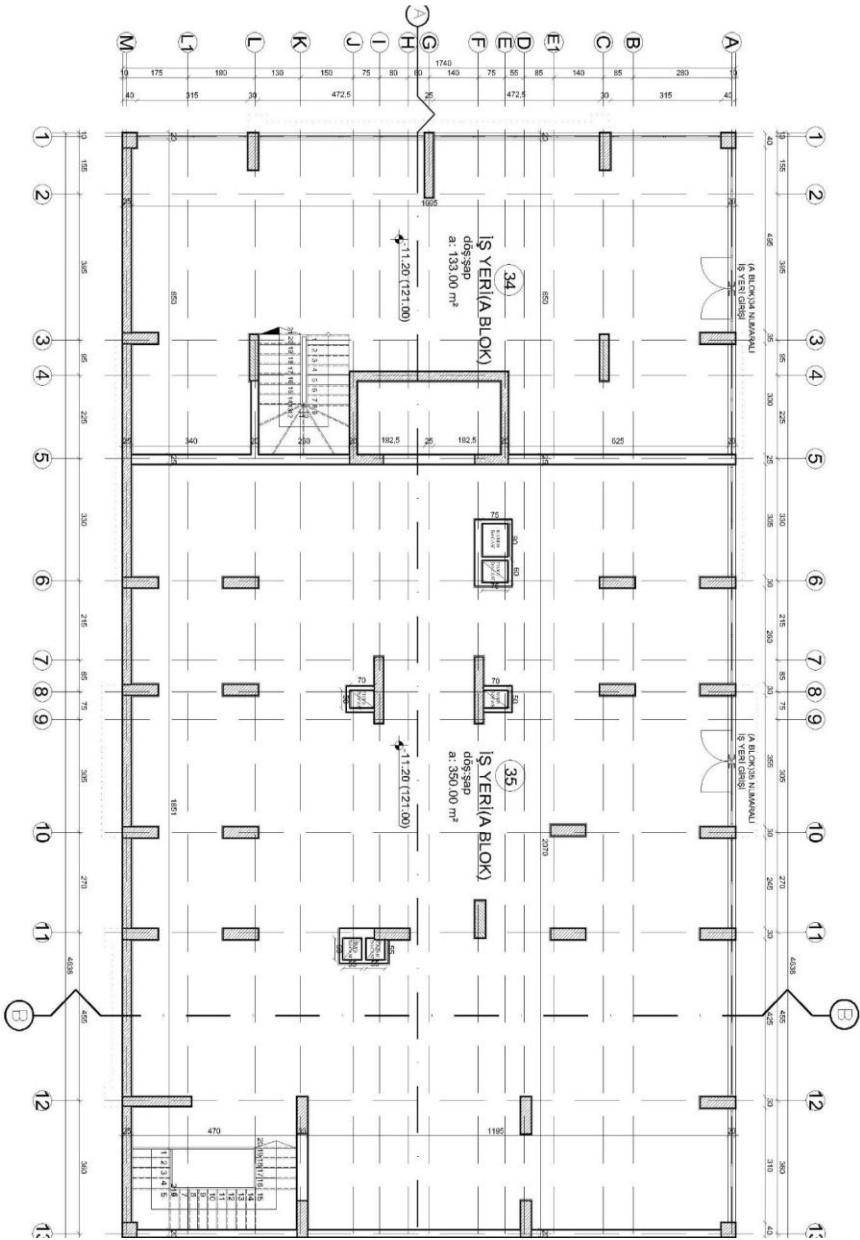
Araştırmanın yöntemi, İlk aşamada literatür olarak incelenmektedir. İkinci aşamada, inşaat aşamasında olan binanın konumu ve vaziyet planı, mimari projeler (kat planları, kesit ve görünüşler) incelenerek Şantiye Şefi ile Görüşmeler yapılmaktadır. Üçüncü aşamada, Tasarlanan Strüktüre Göre İdecad Programı ile Statik Hesapların analizi yapılmaktadır. Betonarme yapının hesabında TS 500, TS 498, TBDY 2018 kullanılmaktadır. Statik ve Betonarme hesaplar da, Deprem ivmelerini öğrenmek için, Türkiye Deprem Tehlike haritasından, ivme katsayılarının hesaplaması sağlanarak, Deprem yer hareketlilik düzeyini DD-2, 50 yılda aşılma olasılığı %10 tekrarlama periyodu 475 yıl olan deprem yer hareketi düzeyi dikkate alınarak ve analizler İde statik programı, V10.14 sürümü kullanılarak yapılmaktadır. Dördüncü aşamada mevcut ve

revize proje sonuçları karşılaştırılarak hatalar değerlendirilmektedir. Günümüzde yüksek katlı konut binalarında deprem yönetmeliğine göre mimari hatalar, inşaat ve kullanım aşamasına yönelik sorunlar, nedenleri ve öneriler verilmektedir.

Bulgular ve Tartışma

Şantiye Çalışmaları Sırasında Proje Üzerinde Tespit Edilen Yapısal Kusurlar

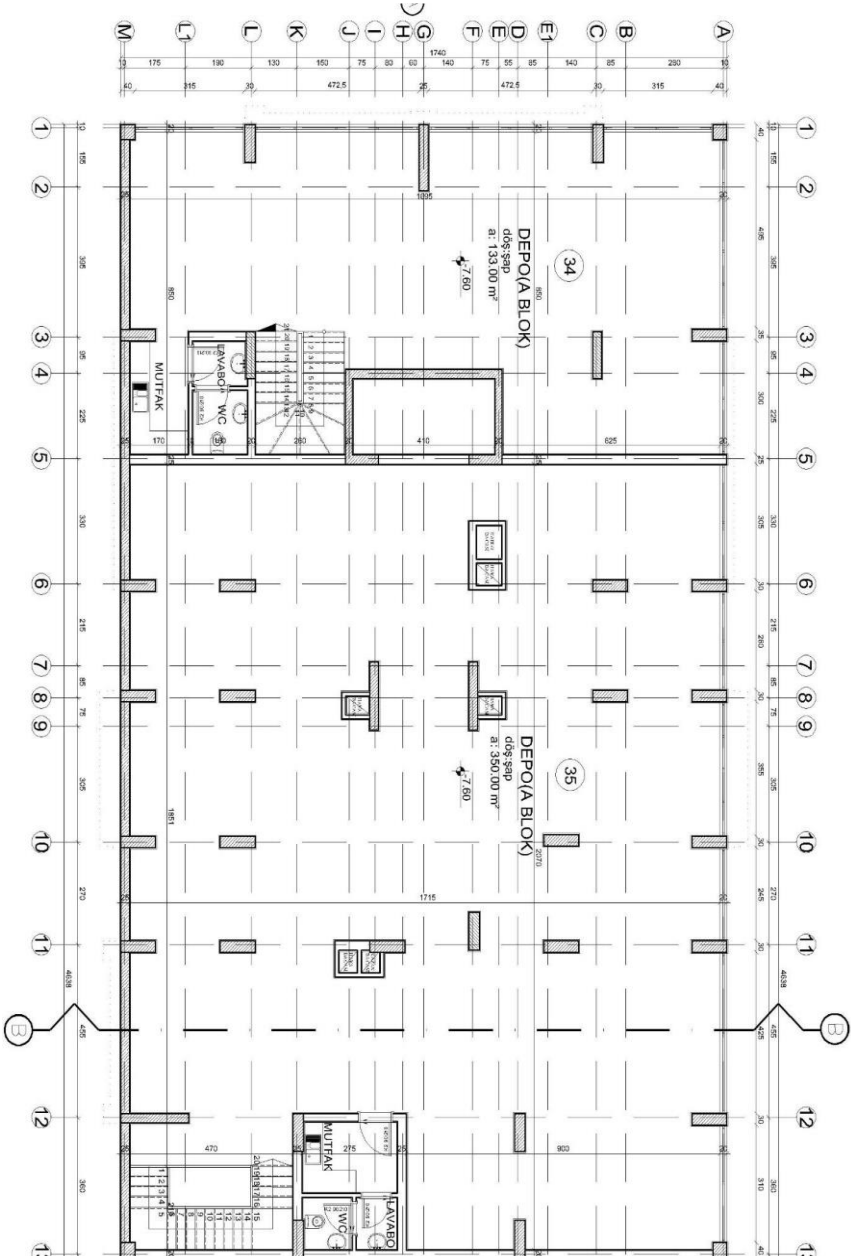
Şekil 2 'de projenin bulunduğu alanın vaziyet planı gösterilmiştir. İncelenecek olan proje Trabzon ili Yomra İlçesinde, 30.754 m² üzerinde,4 blok ve 1 sosyal tesisten oluşmaktadır. Araştırmada, A blok incelenmektedir. Mevcut binamız 4 Bodrum kat 1 Zemin kat ve 9 Normal Kat olmak üzere toplam 14 kattan oluşmaktadır. 4. Bodrum Kat ve 3. Bodrum Kat dükkan katı olup geri kalan katlar daire katlarıdır. Toplam 519.39 m² taban alanına sahip olan 1. Bodrum kat, Normal kat ve diğer katlar daire katları olup, bir katta 3 adet daire mevcuttur. Daireler 178 m²'den ibarettir. Ayrıca 2 adet asansör, 1 adet kat merdiveni, 1 adet yangın merdiveni, kapalı otopark, açık otopark, yönetim odası, kazan dairesi ve çöp odası bulunmaktadır. Uygulamasına başlanan binada mimari projeye bağlı sorunlar olduğu tespit edilmiştir. Şekil 3'de 2007 TBDY' ne göre tasarlanan binanın 4.Bodrum Kat mimari planı, Şekil 4'de 2007 TBDY 'ne göre tasarlanan binanın 3.Bodrum Kat mimari planı, Şekil 5'de 2007 TBDY' ne göre tasarlanan binanın 2.Bodrum Kat mimari planı ve Şekil 6'da 2007 TBDY' ne göre tasarlanan binanın diğer katların mimari planı görülmektedir. Problemler şunlardır;



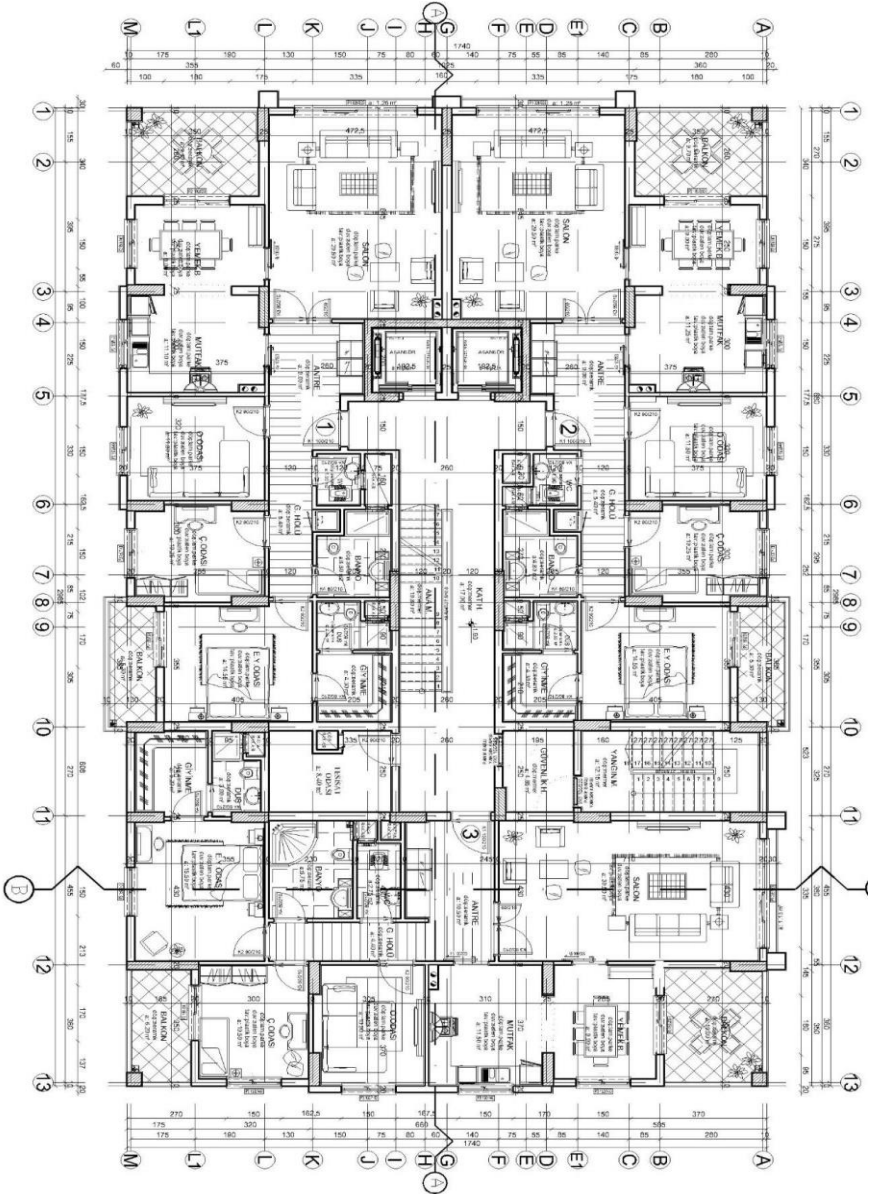
Şekil 3. Mimari Proje 4. Bodrum Kat Planı

Mimari ve statik projeler incelendiğinde Deprem yönetmeliği 2018'e göre aşağıda verilen hatalar tespit edilmiştir;

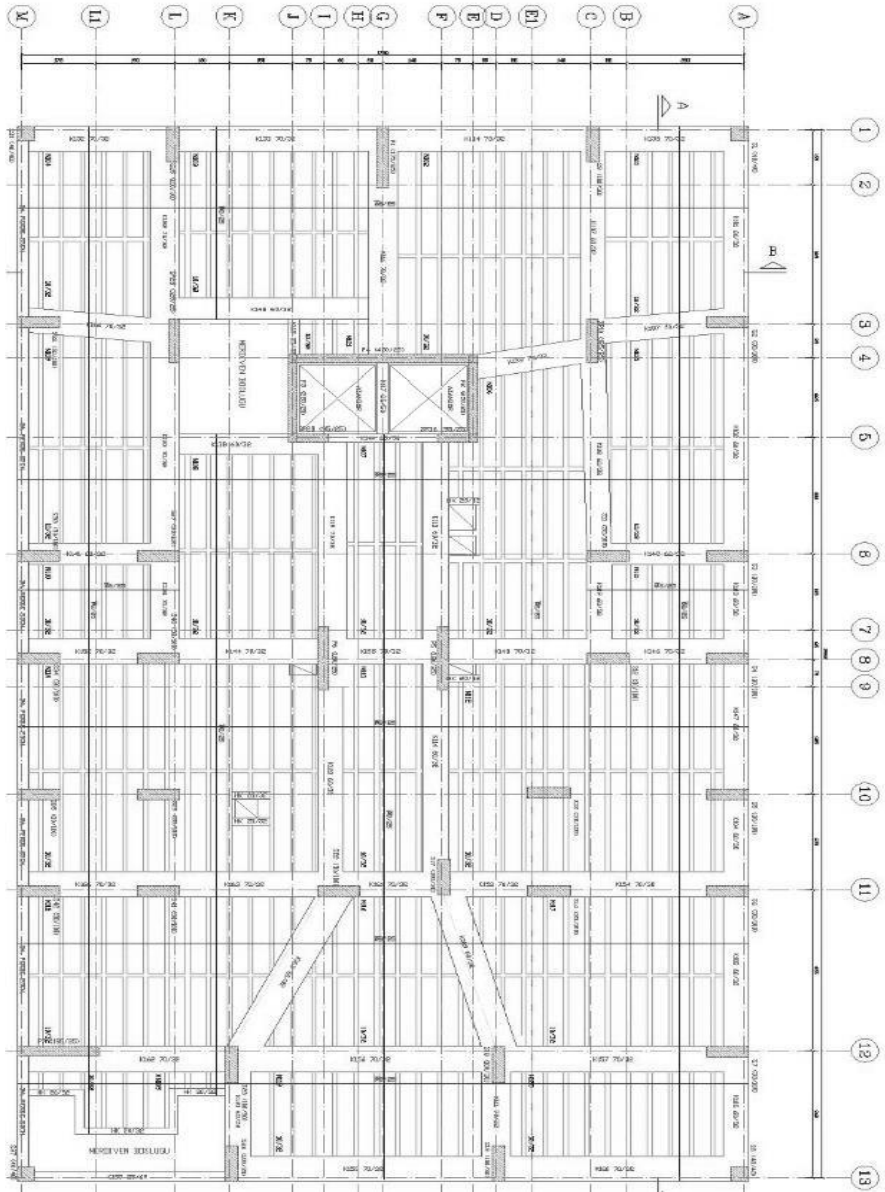
- Bazı bölgelerde kolonlar arası mesafeler çok kısadır. Projede çok sık kolon kullanılmıştır.
- Plak döşeme yapılan statik projede bir çok saplama kiriş mevcuttur.
- Projede plak döşeme kirişleri 50 cm x 20 cm ve 50 cm x 25 cm ebatlarında verilmiştir.2007 Deprem yönetmeliğine göre kiriş ebatları en az 25 cm olmak zorundadır. Projede 50 cm x 20 cm kirişler mevcuttur.
- Kolonların eninin 30 cm kirişlerin eninin 20 cm ve 25 cm olduğu düşünülürse kolon kiriş birleşim bölgelerinde 5 cm'lik bir eksantrisite oluşmaktadır. Bu durumun mimari projede duvar yerleri nedeniyle olduğu görölmektedir. Yani kolon ve kirişler tam anlamıyla birbirinin üzerine oturmamaktadır.



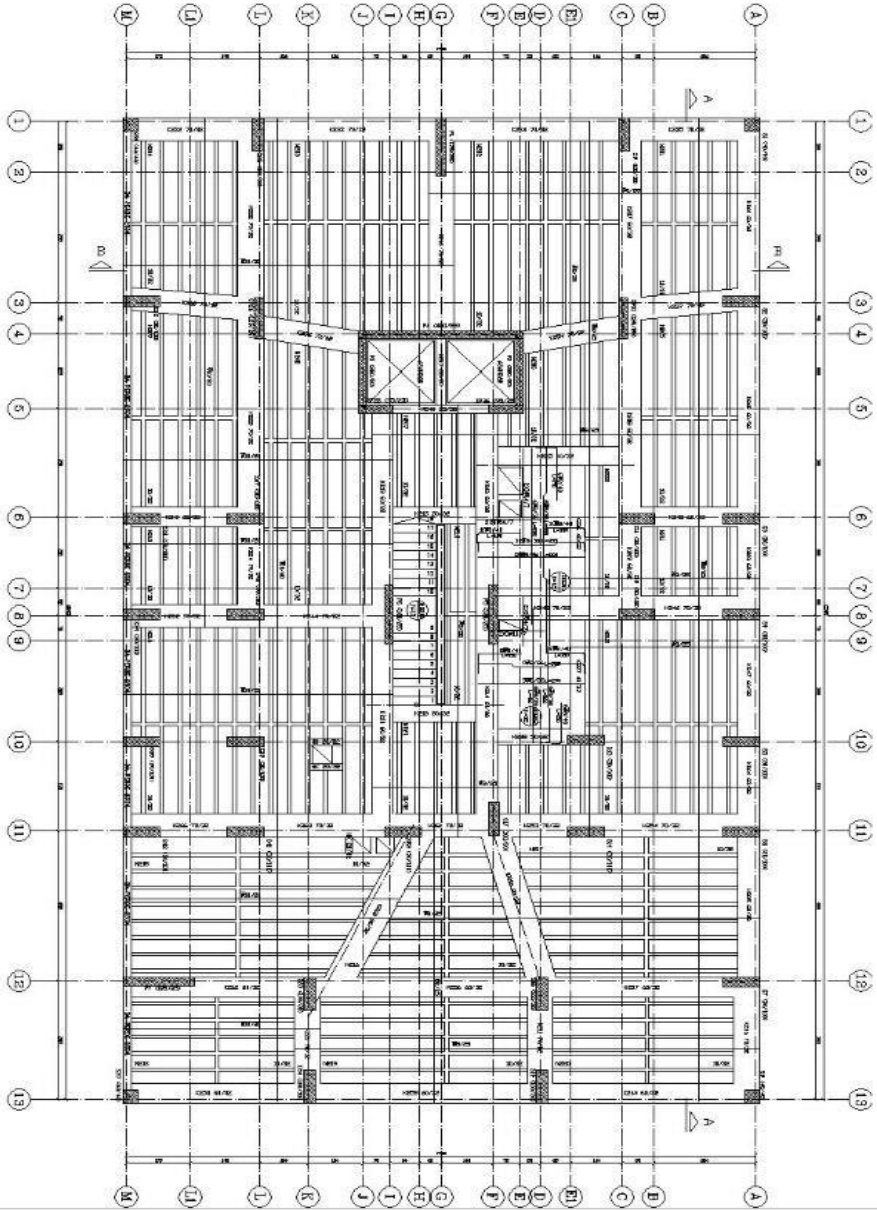
Şekil 4. Mimari Proje 3.Bodrum Kat Planı



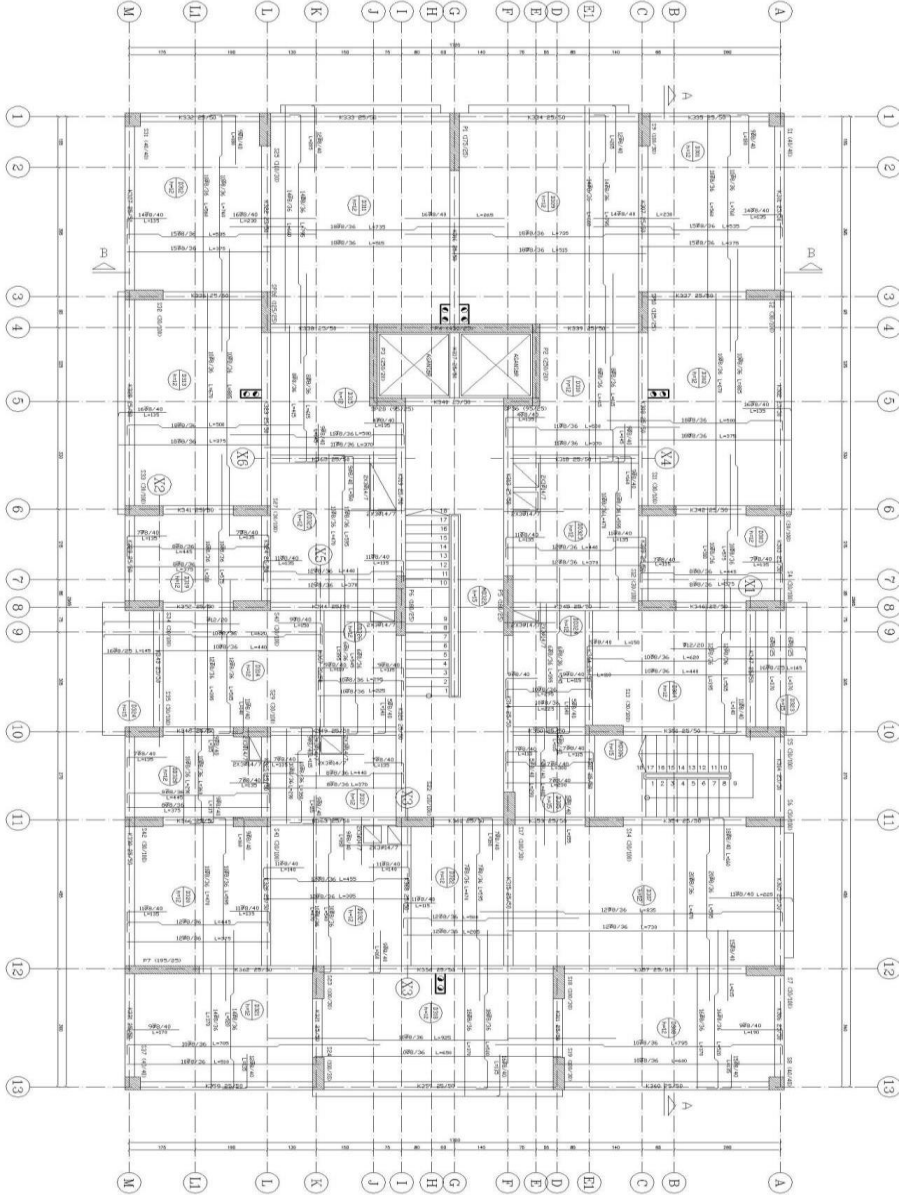
Şekil 6. Mimari Proje 1. Bodrum, Zemin, 1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8. 9. Normal Kat Planı



Şekil 7. 2007 Deprem Yönetmeliğine Göre Tasarlanan Statik 4.Bodrum Kat Kalıp Planı



Şekil 8. 2007 Deprem Yönetmeliğine Göre Tasarlanan 3.Bodrum Kat Kalıp Planı



Şekil 9. 2007 Deprem Yönetmeliğine Göre Tasarlanan Statik Diğer Katların Kalıp Planı

Analizler

2007 Deprem Yönetmeliğine Göre Tasarlanan Projenin Şekil 9'da Y Yönünde Dış merkezlilik Durumu, Şekil 10'da X yönünde Dış merkezlilik Durumu, Şekil 11 'de X Yönünde Kat öteleme ve Burulma Düzensizliği Kontrolü, Şekil 12 'de Y Yönünde Kat öteleme ve Burulma Düzensizliği Kontrolü, Şekil 13'de 2007 yönetmeliğine göre tasarlanan binanın yapısal düzensizlik sonuç raporu verilmektedir.

Kat	Bina Genisliği (m)	xg (m)	DisMerk (%)	Kat	Bina Genisliği (m)	yg (m)	DisMerk (%)
14	29.650000	15.054266	5.00	14	17.200000	8.583618	5.00
13	29.650000	15.054266	5.00	13	17.200000	8.583618	5.00
12	29.650000	15.054266	5.00	12	17.200000	8.583618	5.00
11	29.650000	15.054266	5.00	11	17.200000	8.583618	5.00
10	29.650000	15.054266	5.00	10	17.200000	8.583618	5.00
09	29.650000	15.054266	5.00	09	17.200000	8.583618	5.00
08	29.650000	15.054266	5.00	08	17.200000	8.583618	5.00
07	29.650000	15.054266	5.00	07	17.200000	8.583618	5.00
06	29.650000	15.054266	5.00	06	17.200000	8.583618	5.00
05	29.650000	15.054266	5.00	05	17.200000	8.583618	5.00
04	29.650000	15.054266	5.00	04	17.200000	8.583618	5.00
03	29.650000	15.054266	5.00	03	17.200000	8.583618	5.00
02	29.650000	14.949714	5.00	02	17.200000	8.555637	5.00
01	29.650000	14.754630	5.00	01	17.200000	8.600619	5.00

Şekil 9. 2007 Deprem Yönetmeliğine Göre Tasarlanan Projenin Y Yönünde Dış merkezlilik Durumu

Kat	Iyy-Kolon (m4)	Iyy-Perde (m4)	Iyy-Toplam (m4)	Ixx-Kolon (m4)	Ixx-Perde (m4)	Ixx-Toplam (m4)	x-R (m)	y-R (m)
K.14	0.312388	0.883885	1.196273	0.563263	2.063214	2.626476	9.660367	8.586561
K.13	0.312388	0.883885	1.196273	0.563263	2.063214	2.626476	9.660367	8.586561
K.12	0.312388	0.883885	1.196273	0.563263	2.063214	2.626476	9.660367	8.586561
K.11	0.187888	0.883885	1.071773	0.268138	2.063214	2.331351	8.797468	8.582195
K.10	0.187888	0.883885	1.071773	0.268138	2.063214	2.331351	8.797468	8.582195
K.09	0.187888	0.883885	1.071773	0.268138	2.063214	2.331351	8.797468	8.582195
K.08	0.187888	0.883885	1.071773	0.268138	2.063214	2.331351	8.797468	8.582195
K.07	0.187888	0.883885	1.071773	0.268138	2.063214	2.331351	8.797468	8.582195
K.06	0.187888	0.883885	1.071773	0.268138	2.063214	2.331351	8.797468	8.582195
K.05	0.259609	0.883885	1.143495	0.423150	2.063214	2.486364	9.281050	8.592721
K.04	0.259609	0.883885	1.143495	0.423150	2.063214	2.486364	9.281050	8.592721
K.03	0.312388	0.883885	1.196273	0.563263	2.063214	2.626476	9.660367	8.586561
K.02	0.312388	0.883885	1.196273	0.563263	2.063214	2.626476	9.660367	8.586561
K.01	0.312388	0.883885	1.196273	0.563263	2.063214	2.626476	9.660367	8.586561

Şekil 10.2007 Deprem Yönetmeliğine Göre Tasarlanan Projenin X Yönünde Dış merkezlilik Durumu

(A1) BURULMA DÜZENLİLİĞİ KONTROLÜ:

(TDY 2007 - Madde 2.3.2.1)

di-max : Maksimum Mutlak Kat Ötelenmesi
di-min : Minimum Mutlak Kat Ötelenmesi
Del-i : Göreli Kat Ötelenmesi, (di(kolon,üst) - di(kolon,alt))

DEPREM ETKİ YONU: 1 (X-Ekseni ile 0.000 derece)

Yük Hali: SX+

Kat	di-Min (m)	di-Max (m)	(del-i)Min (m)	(del-i)Max (m)	(del-i)Ort (m)	Eta-C	Durum
14	0.011888	0.013336	0.000565	0.000619	0.000592	1.046 < 1.2	---
13	0.011323	0.012717	0.000632	0.000695	0.000664	1.047 < 1.2	---
12	0.010691	0.012022	0.000706	0.000779	0.000743	1.049 < 1.2	---
11	0.009985	0.011243	0.000783	0.000865	0.000824	1.050 < 1.2	---
10	0.009202	0.010378	0.000856	0.000948	0.000902	1.051 < 1.2	---
09	0.008345	0.009430	0.000924	0.001023	0.000974	1.051 < 1.2	---
08	0.007422	0.008406	0.000982	0.001089	0.001035	1.052 < 1.2	---
07	0.006440	0.007317	0.001027	0.001141	0.001084	1.052 < 1.2	---
06	0.005413	0.006176	0.001056	0.001175	0.001115	1.053 < 1.2	---
05	0.004357	0.005001	0.001060	0.001184	0.001122	1.055 < 1.2	---
04	0.003297	0.003817	0.001029	0.001158	0.001094	1.059 < 1.2	---
03	0.002267	0.002660	0.000777	0.001093	0.000935	1.169 < 1.2	---
02	0.001316	0.001572	0.000761	0.000925	0.000843	1.097 < 1.2	---
01	0.000552	0.000657	0.000552	0.000657	0.000605	1.087 < 1.2	---

Yük Hali: SX-

Kat	di-Min (m)	di-Max (m)	(del-i)Min (m)	(del-i)Max (m)	(del-i)Ort (m)	Eta-C	Durum
14	0.011873	0.013336	0.000556	0.000629	0.000592	1.062 < 1.2	---
13	0.011318	0.012707	0.000623	0.000706	0.000664	1.062 < 1.2	---
12	0.010695	0.012001	0.000697	0.000790	0.000743	1.062 < 1.2	---
11	0.009999	0.011212	0.000774	0.000875	0.000824	1.061 < 1.2	---
10	0.009224	0.010337	0.000848	0.000957	0.000903	1.060 < 1.2	---
09	0.008376	0.009380	0.000916	0.001032	0.000974	1.059 < 1.2	---
08	0.007460	0.008348	0.000975	0.001096	0.001036	1.058 < 1.2	---
07	0.006485	0.007252	0.001022	0.001147	0.001084	1.058 < 1.2	---
06	0.005463	0.006105	0.001051	0.001179	0.001115	1.057 < 1.2	---
05	0.004412	0.004926	0.001057	0.001186	0.001121	1.057 < 1.2	---
04	0.003355	0.003740	0.001030	0.001155	0.001093	1.057 < 1.2	---
03	0.002325	0.002585	0.000839	0.001075	0.000957	1.123 < 1.2	---
02	0.001360	0.001690	0.000784	0.000998	0.000896	1.114 < 1.2	---
01	0.000554	0.000691	0.000554	0.000691	0.000623	1.110 < 1.2	---

Yapıda Bu Yonde (A1) Düzensizliği Mevcut Değildir.

Şekil 11. 2007 Deprem Yönetmeliğine Göre Tasarlanan Projenin X Yönünde Kat Öteleme ve Burulma Düzensizliği Kontrolü

DEPREM ETKİ YONU: 2 (X-Ekseni ile 90.000 derece)

Yük Hali: SY+

Kat	di-Min (m)	di-Max (m)	(del-i)Min (m)	(del-i)Max (m)	(del-i)Ort (m)	Eta-C	Durum
14	0.008790	0.013822	0.000400	0.000821	0.000611	1.345 > 1.2	A1 mevcut
13	0.008259	0.013368	0.000465	0.000865	0.000665	1.301 > 1.2	A1 mevcut
12	0.007695	0.012816	0.000520	0.000905	0.000719	1.260 > 1.2	A1 mevcut
11	0.007085	0.012150	0.000582	0.000943	0.000767	1.229 > 1.2	A1 mevcut
10	0.006449	0.011374	0.000640	0.000974	0.000807	1.207 > 1.2	A1 mevcut
09	0.005780	0.010495	0.000672	0.000996	0.000834	1.194 < 1.2	---
08	0.005087	0.009524	0.000698	0.001055	0.000877	1.204 > 1.2	A1 mevcut
07	0.004364	0.008469	0.000716	0.001130	0.000923	1.224 > 1.2	A1 mevcut
06	0.003607	0.007339	0.000714	0.001197	0.000955	1.253 > 1.2	A1 mevcut
05	0.002863	0.006142	0.000700	0.001255	0.000978	1.284 > 1.2	A1 mevcut
04	0.002145	0.004897	0.000673	0.001308	0.000991	1.320 > 1.2	A1 mevcut
03	0.001472	0.003579	0.000611	0.001369	0.000990	1.363 > 1.2	A1 mevcut
02	0.000860	0.002210	0.000492	0.001257	0.000875	1.437 > 1.2	A1 mevcut
01	0.000366	0.000957	0.000366	0.000957	0.000661	1.446 > 1.2	A1 mevcut

Yük Hali: SY-

Kat	di-Min (m)	di-Max (m)	(del-i)Min (m)	(del-i)Max (m)	(del-i)Ort (m)	Eta-C	Durum
14	0.008261	0.014944	0.000340	0.000992	0.000666	1.490 > 1.2	A1 mevcut
13	0.007869	0.013953	0.000400	0.001047	0.000724	1.447 > 1.2	A1 mevcut
12	0.007434	0.012906	0.000460	0.001098	0.000775	1.409 > 1.2	A1 mevcut
11	0.006995	0.011809	0.000519	0.001145	0.000822	1.376 > 1.2	A1 mevcut
10	0.006610	0.010663	0.000573	0.001184	0.000879	1.348 > 1.2	A1 mevcut
09	0.006273	0.009479	0.000614	0.001212	0.000913	1.328 > 1.2	A1 mevcut
08	0.005011	0.008267	0.000645	0.001228	0.000936	1.311 > 1.2	A1 mevcut
07	0.004329	0.007047	0.000670	0.001227	0.000948	1.294 > 1.2	A1 mevcut
06	0.003638	0.006105	0.000688	0.001206	0.000947	1.273 > 1.2	A1 mevcut
05	0.002944	0.005107	0.000684	0.001161	0.000923	1.258 > 1.2	A1 mevcut
04	0.002231	0.004061	0.000666	0.001099	0.000877	1.241 > 1.2	A1 mevcut
03	0.001545	0.002972	0.000635	0.001136	0.000886	1.283 > 1.2	A1 mevcut
02	0.000910	0.001835	0.000524	0.001041	0.000783	1.330 > 1.2	A1 mevcut
01	0.000385	0.000796	0.000385	0.000796	0.000591	1.348 > 1.2	A1 mevcut

Dikkat: Yapıda Bu Yonde (A1) Duzensizligi Mevcuttur.

Şekil 12. Deprem Yönetmeliğine Göre Tasarlanan Projenin Y Yönünde Kat öteleme ve Burulma Düzensizliği Kontrolü

YAPISAL DÜZENLİLİKLER:

PLANDA DÜZENLİLİK DURUMLARI:

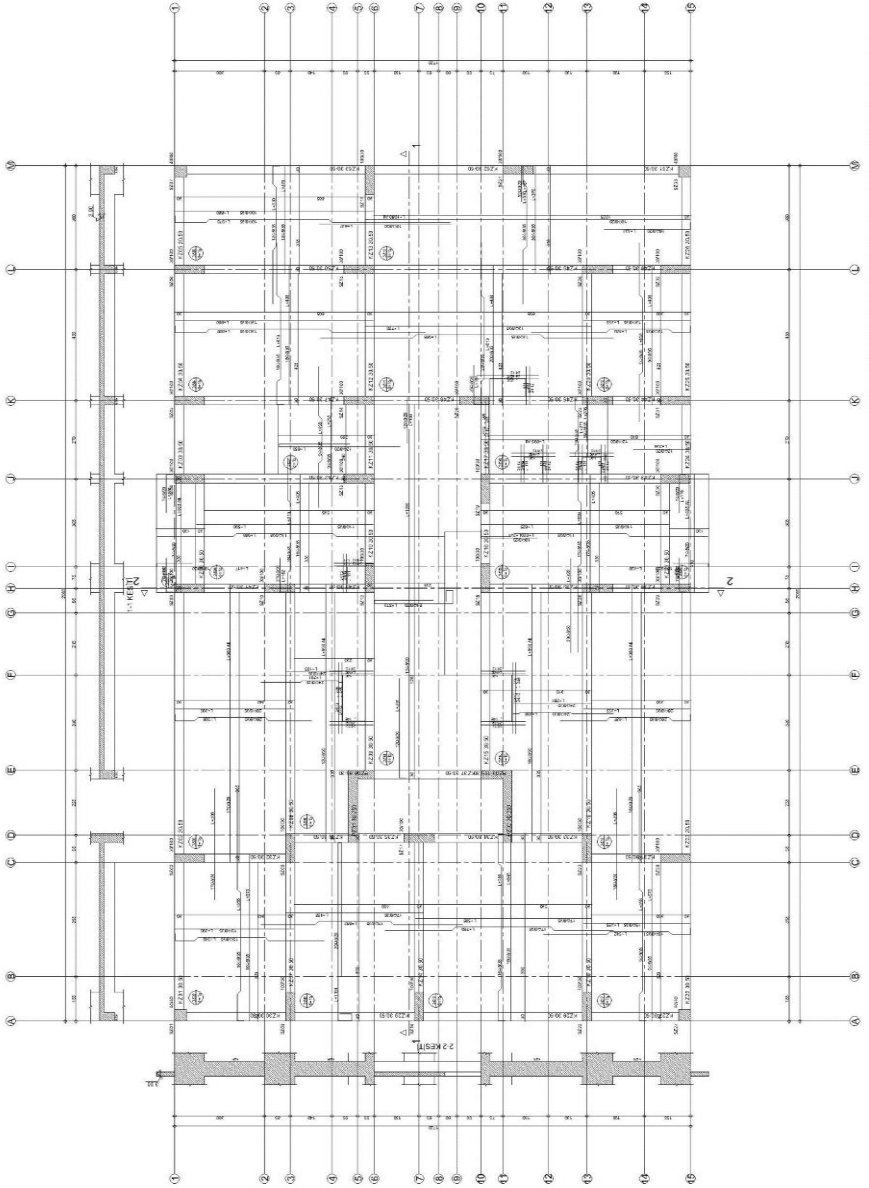
(A1) Burulma Duzensizligi	: -MEVCUT-
(A2) Kat Diyaframı Sureksizligi	: -YOK-
(A3) Planda Cikintilar Bulunmasi	: -YOK-

DUSEY DOGRULIYUDA DÜZENLİLİK DURUMLARI:

(B1) Komsu Katlar Arasi Dayanım Duzensizligi (Zayif Kat)	: -YOK-
(B2) Komsu Katlar Arasi Rijitlik Duzensizligi (Yumusak Kat)	: -YOK-
(B3b) Kiris Acikligina Oturan Kolonlar	: -YOK-

Şekil 13. 2007 Yönetmeliğine Göre Tasarlanan Binanın Yapısal Düzensizlik Sonuç Raporu

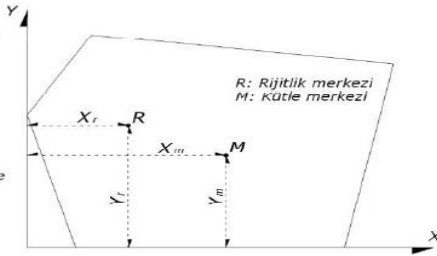
2018 TBDY' ne göre tasarlanan statik projenin Şekil 14 'de kat kalıp planı, Şekil 15'de Projenin Kütle ve Rijitlik Merkezleri ve Şekil 16'da Düzensizlik Sonuç Raporu Program çıktıları verilmektedir.



Şekil 14. 2018 Deprem Yönetmeliğine Gör Tasarlanan Projenin Kat Kalıp Planı

KAT GENEL BİLGİLERİ

- g_i : Binanın *i*. katındaki toplam sabit yük
 q_i : Binanın *i*. katındaki toplam hareketli yük
hykk : Hareketli yük katılım katsayısı
 w_i : Binanın *i*. katının hareketli yük katılım katsayısı kullanılarak hesaplanan ağırlığı
H_i : Binanın *i*. katının temel üzerinden itibaren ölçülen yüksekliği
F_{i(x)}, F_{i(y)} : Eşdeğer deprem yükü yönteminde *i*. kata etkiyen deprem yükü
X_m, Y_m : Katın kütle merkezi koordinatları
X_r, Y_r : Katın rijitlik merkezi koordinatları



Kıtlar	Yapı Ağırlığı				Kat Kuvvetleri				Kütle Merkezi		Rijitlik Merkezi	
	Kat	g _i [tf]	q _i [tf]	hykk	w _i [tf]	H _i [m]	w _i H _i [tfm]	F _i (x) [tf]	F _i (y) [tf]	X _m [m]	Y _m [m]	X _r [m]
9. KAT	469.36	56.22	0.30	486.23	41.20	20032.53	10.46	13.35	14.92	7.58	16.24	7.39
8. KAT	443.05	56.22	0.30	459.24	38.30	17614.71	2.87	5.01	14.98	7.56	15.83	7.25
7. KAT	443.05	56.22	0.30	459.91	35.40	16280.96	2.50	2.74	14.98	7.56	15.56	7.37
6. KAT	443.05	56.22	0.30	459.91	32.50	14947.21	1.22	2.10	14.98	7.56	15.43	7.41
5. KAT	443.05	56.22	0.30	459.91	29.60	13613.46	1.61	1.89	14.98	7.56	15.37	7.42
4. KAT	443.05	56.22	0.30	459.91	26.70	12279.71	1.21	1.74	14.98	7.56	15.31	7.46
3. KAT	443.05	56.22	0.30	459.91	23.80	10945.95	1.39	1.54	14.98	7.56	15.25	7.46
2. KAT	443.05	56.22	0.30	459.91	20.90	9612.20	1.24	1.57	14.98	7.56	15.22	7.48
1. KAT	443.05	56.22	0.30	459.91	18.00	8278.45	1.25	1.60	14.98	7.56	15.19	7.49
ZEMİN KAT	443.05	56.22	0.30	459.91	15.10	6944.70	1.33	1.61	14.98	7.56	15.14	7.48
1. BODURUM	442.91	56.15	0.30	459.76	12.20	5609.04	1.71	1.71	14.98	7.56	15.13	7.51
2. BODURUM	441.51	55.23	0.30	458.08	9.30	4260.15	2.15	1.90	14.98	7.55	15.24	7.63
3. BODURUM	479.34	73.09	0.30	501.26	6.40	3208.07	5.51	2.86	15.10	8.06	15.51	7.59
4. BODURUM	504.85	80.51	0.30	525.00	3.60	1904.41	10.39	3.72	14.96	8.10	15.79	7.37

Şekil 15. 2018 Deprem Yönetmeliğine Göre Tasarlanan Projenin Kütle ve Rijitlik Merkezi Program Çıktısı

Kat	Görel Öteleme μ [(max)/h _i]	İkinci Mertebe Etkileri
9. KAT	0.0012 <= 0.008 -	0.0118 <= 0.0857
8. KAT	0.0015 <= 0.008 -	0.0157 <= 0.0857
7. KAT	0.0017 <= 0.008 -	0.0194 <= 0.0857
6. KAT	0.002 <= 0.008 -	0.0227 <= 0.0857
5. KAT	0.0023 <= 0.008 -	0.0259 <= 0.0857
4. KAT	0.0023 <= 0.008 -	0.026 <= 0.0857
3. KAT	0.0028 <= 0.008 -	0.0331 <= 0.0857
2. KAT	0.0026 <= 0.008 -	0.0352 <= 0.0857
1. KAT	0.0027 <= 0.008 -	0.0383 <= 0.0857
ZEMİN KAT	0.0028 <= 0.008 -	0.0413 <= 0.0857
1. BODURUM	0.0028 <= 0.008 -	0.0436 <= 0.0857
2. BODURUM	0.0025 <= 0.008 -	0.0424 <= 0.0857
3. BODURUM	0.0019 <= 0.008 -	0.0386 <= 0.0857
4. BODURUM	0.0013 <= 0.008 -	0.0257 <= 0.0857

Kat	A1(μ ₁)	A2	A3
9. KAT	1.01 <= 1.2 Yok	Yok (Kullanıma Deneşed)	Yok (Kullanıma Deneşed)
8. KAT	1.02 <= 1.2 Yok	Yok (Kullanıma Deneşed)	Yok (Kullanıma Deneşed)
7. KAT	1.04 <= 1.2 Yok	Yok (Kullanıma Deneşed)	Yok (Kullanıma Deneşed)
6. KAT	1.05 <= 1.2 Yok	Yok (Kullanıma Deneşed)	Yok (Kullanıma Deneşed)
5. KAT	1.06 <= 1.2 Yok	Yok (Kullanıma Deneşed)	Yok (Kullanıma Deneşed)
4. KAT	1.07 <= 1.2 Yok	Yok (Kullanıma Deneşed)	Yok (Kullanıma Deneşed)
3. KAT	1.10 <= 1.2 Yok	Yok (Kullanıma Deneşed)	Yok (Kullanıma Deneşed)
2. KAT	1.11 <= 1.2 Yok	Yok (Kullanıma Deneşed)	Yok (Kullanıma Deneşed)
1. KAT	1.12 <= 1.2 Yok	Yok (Kullanıma Deneşed)	Yok (Kullanıma Deneşed)
ZEMİN KAT	1.15 <= 1.2 Yok	Yok (Kullanıma Deneşed)	Yok (Kullanıma Deneşed)
1. BODURUM	1.16 <= 1.2 Yok	Yok (Kullanıma Deneşed)	Yok (Kullanıma Deneşed)
2. BODURUM	1.17 <= 1.2 Yok	Yok (Kullanıma Deneşed)	Yok (Kullanıma Deneşed)
3. BODURUM	1.18 <= 1.2 Yok	Yok (Kullanıma Deneşed)	Yok (Kullanıma Deneşed)
4. BODURUM	1.19 <= 1.2 Yok	Yok (Kullanıma Deneşed)	Yok (Kullanıma Deneşed)

Kat	B1(μ ₁)	B2(μ ₁)	B3
9. KAT	1.00 >= 0.8 Yok	0.87 >= 2 Yok	Yok
8. KAT	1.00 >= 0.8 Yok	1.16 >= 2 Yok	Yok
7. KAT	1.00 >= 0.8 Yok	1.15 >= 2 Yok	Yok
6. KAT	1.00 >= 0.8 Yok	1.13 >= 2 Yok	Yok
5. KAT	1.00 >= 0.8 Yok	1.11 >= 2 Yok	Yok
4. KAT	1.00 >= 0.8 Yok	1.09 >= 2 Yok	Yok
3. KAT	1.00 >= 0.8 Yok	1.07 >= 2 Yok	Yok
2. KAT	1.00 >= 0.8 Yok	1.05 >= 2 Yok	Yok
1. KAT	1.00 >= 0.8 Yok	1.03 >= 2 Yok	Yok
ZEMİN KAT	1.00 >= 0.8 Yok	1.10 >= 2 Yok	Yok
1. BODURUM	1.00 >= 0.8 Yok	1.23 >= 2 Yok	Yok
2. BODURUM	0.96 >= 0.8 Yok	1.84 >= 2 Yok	Yok
3. BODURUM	0.94 >= 0.8 Yok	1.54 >= 2 Yok	Yok
4. BODURUM	1.00 >= 0.8 Yok	0.66 >= 2 Yok	Yok

Dinamik yöntem kullanılarak hesaplar yapılmıştır. (TBDY 2018 - 3.6.2.1)

Şekil 16. 2018 Deprem Yönetmeliğine Göre Tasarlanan Projenin Yapısal Düzensizlik Detay Raporu Program Çıktısı

Karşılaştırma ve Değerlendirmeler

Yapılan hesaplar neticesinde mevcut ve revize proje arasında yapısal düzensizlikler, deprem parametreleri, statik-betonarme proje ve yapı elemanı sayısı, malzeme cinsi açısından büyük farklılıklar olduğu tespit edilmiş ve listelenmiştir. Tablo 1’de Mevcut proje ile revize projenin yapısal düzensizlikleri, Tablo 2’de Kütle ve Rijitlik merkezleri, Tablo 3’de Deprem hesabı için gerekli parametreleri, Tablo 4’de statik-Betonarme proje parametrelerinin karşılaştırmaları, Tablo 5 ’de Ortak Kolonlarının Değerlendirmesi Tablo 6’da Mevcut ve Revize Projelerin Perde ve Kolon Alanlarının Karşılaştırılması yapılmıştır. Tablo 3’de görüldüğü üzere mevcut proje taşıyıcı sistem davranış katsayısı 6, süneklik düzeyi karmadır. Revize proje için en uygun taşıyıcı sistem olarak sistem davranış katsayısı 7, süneklik düzeyi yüksek seçilmiştir. Mevcut ve revize proje için yapı elemanlarında büyük farklılıklar tespit edilmiştir. Bunlar; Grafik 17’ (a) da kütle ve rijitlik merkezi farkı, (b) ’de Yapı eleman sayı farkları, Grafik 18’de boyut olarak değişmeyen kolonların Donatı Alan farkı, Grafik 19 ’da Mevcut ve Revize proje kolon ve perde Alanı farkları verilmektedir.

Tablo 1. Mevcut Proje ile Revize Projenin Yapısal Analiz Karşılaştırılması

YAPISAL DÜZENSİZLİKLERİN KARŞILAŞTIRILMASI		
DEĞERLENDİRMELER	MEVCUT PROJE	REVİZE PROJE
BURULMA DÜZENSİZLİĞİ	VAR (1.49 > 1.20)	YOKTUR. (1.19 ≤ 1.20)
DÖŞEME SÜREKSİZLİĞİ	YOK	YOKTUR.
PLANDA ÇIKINTILAR BULUNMASI	YOK	YOKTUR.
KOMŞU KATLAR ARASI DAYANIM DÜZENSİZLİĞİ	YOK	YOKTUR. (0.98 ≥ 0.80)
KOMŞU KATLAR ARASI RİJİTLİK DÜZENSİZLİĞİ	YOK	YOKTUR. (1.84 ≤ 2.0)
DÜŞEY ELEMANLARIN SÜREKSİZLİĞİ	YOK	YOKTUR.
KÜTLE VE RİJİTLİK MERKEZİ ÇAKIŞMA DURUMU	VAR	YOKTUR. (0,044 ≤ 0.05)

Tablo 2. 2018 TBDY Göre Tasarlanan Proje Arasındaki Kütle ve Rijitlik Merkezi Kıyaslamaları

KRİTİK DEĞERLER	KÜTLE MERKEZİ		RİJİTLİK MERKEZİ		ÇAKIŞMA ORANI	
	X _m	Y _m	X _r	Y _r	%	
2007 TBDY TASARLANAN	GÖRE	15,05	8,583	8,797	8,582	20,96 (X Yönünde)
2018 TBDY TASARLANAN	GÖRE	14,92	7,58	16,24	7,39	4,42 (X Yönünde)

Tablo 3. Deprem Hesabı İçin Gerekli Parametrelerin Karşılaştırılması [18]

DEPREM HESABI İÇİN GEREKLİ PARAMETRELER	MEVCUT PROJE	YENİ PROJE
YEREL ZEMİN SINIFLARI	Z2	ZA
BİNA KULLANIM SINIFLARI	3	3
BİNA ÖNEM KATSAYISI	1.00	1.00
DEPREM YER HAREKETİ DÜZEYLERİ	4. Bölge	-
HARİTA SPEKTRAL İVME KATSAYISI (S _s , S ₁)	-	0.471/0.12
TASARIM SPEKTRAL İVME KATSAYISILARI (SDS, SD1)	-	0.375/0.096
DEPREM TASARIM SINIFLARI	3	3
DAYANIM FAZLALIĞI KATSAYISI	2.5	2.5
TAŞIYICI SİSTEM DAVRANIŞ KATSAYISI	6.0	7.0
BİNA YÜKSEKLİK SINIFLARI	5	5
BİNA YÜKSEKLİĞİ	41.20 m	41.20 m
BİNANIN HAKİM DOĞAL TİTREŞİM PERİYODU	-	2.00 sn
YATAY TASARIM SPEKTRUMU KÖŞE PERİYOTLARI (T _a , T _b)	0.15/0.40	0.051/0.255
DEPREM YÜKÜ AZALTMA KATSAYISI	-	7.0
HAREKETLİ YÜK KÜTLE KATILIM KATSAYISI	0.30	0.30
TOPLAM EŞDEĞER DEPREM YÜKÜ (V _{tE} (X), V _{tE} (Y))	-	99.08/99.08
SÜNEKLİLİK DÜZEYİ	KARMA	YÜKSEK

Tablo 4. Mevcut ve Revize Proje Statik-Betonarme Karşılaştırmaları [18]

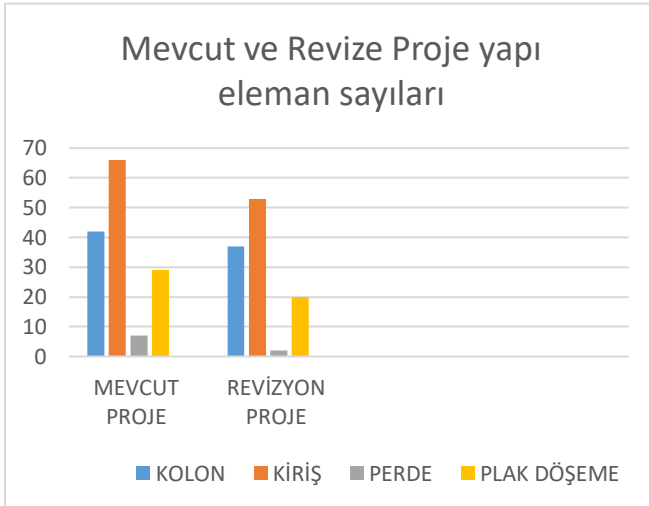
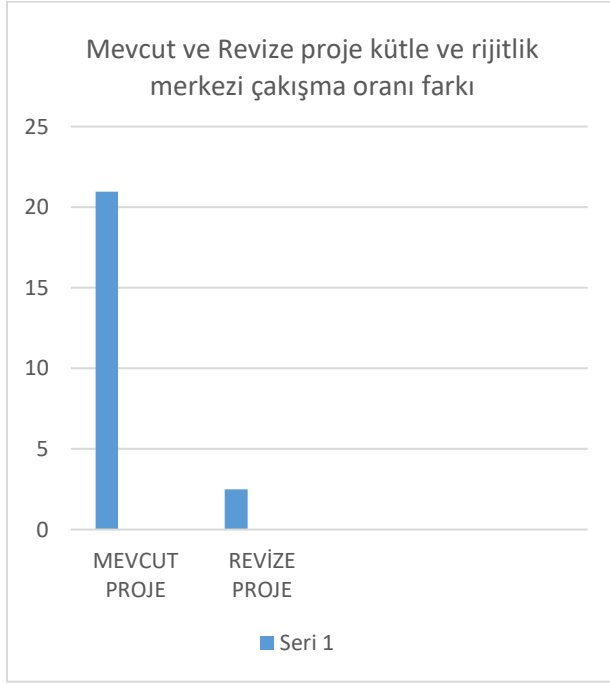
STATİK PROJE DEĞERLENDİRMELERİ		
DEĞERLENDİRMELER	UYGULAMASINA BAŞLANAN PROJE	REVİZE PROJE
BETON SINIFI	C25	C30
TAŞIYICI SİSTEM SINIFI	PERDE + ÇERÇEVELİ SİSTEM	PERDE + ÇERÇEVELİ SİSTEM
DONATI CİNSİ	S420	B420C
TEMEL SİSTEMİ	RADYE	RADYE
KOLON SAYISI	42	37
KOLON EBATLARI	40/40, 100/30, 105/25, 125/25	40/40, 100/30
PERDE SAYISI	7	2
PERDE EBATLARI	175/25, 180/25, 195/25, 200/25, 450/25	250/25
KİRİŞ CİNSİ	ASMOLEN, PLAK	PLAK
KİRİŞ SAYISI	53/66	53
PLAK DÖŞEME KİRİŞ EBATLARI	50/20, 50/25	50/30
DÖŞEME CİNSİ	ASMOLEN, PLAK	PLAK
DÖŞEME KALINLIKLARI	32 cm/12 cm, 15 cm	15 cm
PLAK DÖŞEME SAYISI	29	20
SAPLAMA DURUMU	KİRİŞ MEVCUT	YOK

Tablo 5. Mevcut ve Tasarlanan Projelerin Ortak Kolonlarının Değerlendirmesi [18]

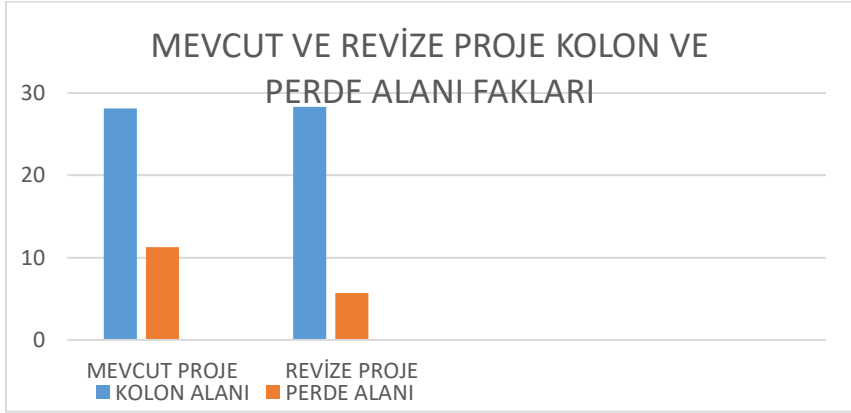
2007 TBDY GÖRE TASARLANAN KOLONLARIN				
SB406KOLONLAR	EBATLAR	N (t)	M (t*m)	DONATI
S1	40 cm x 40 cm	182,03	4,91	8Ø18
S7	100 cm x 30 cm	349,541	15,73	14Ø18
S32	100 cm x 30 cm	363,491	-16,93	14Ø18
S37	100 cm x 30 cm	153,042	-4,13	14Ø18
2018 TBDY GÖRE TASARLANAN KOLONLARIN				
SB401KOLONLAR	EBATLAR	N (t)	M (t*m)	DONATI
SB401	40 cm x 40 cm	83,9	-1,65	12Ø14
SB406	100 cm x 30 cm	158,75	-1,7	20Ø14
SB428	100 cm x 30 cm	64,65	-14,45	20Ø14
SB433	100 cm x 30 cm	31,66	-1,96	20Ø14

Tablo 6. Mevcut ve Revize Projelerin Perde ve Kolon Alanlarının Karşılaştırılması

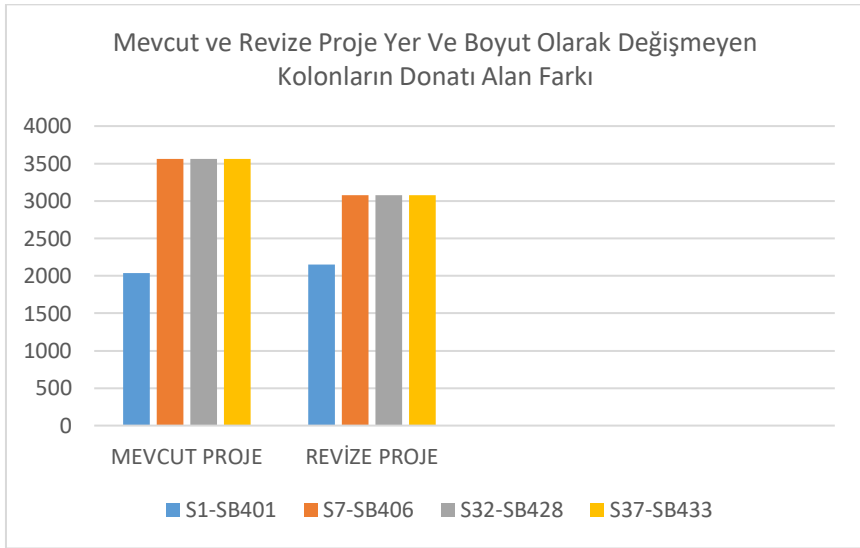
	KOLON ALANI (M2)	PERDE ALANI (M2)
MEVCUT PROJE	28,1428	11,297
REVİZYON PROJESİ	28,3426	5,72



Grafik 17. Mevcut ve Revize Proje (a) Kütle ve Rijitlik Farkı, (b) Yapı Elemanları Adet Farkı



Grafik 18. Mevcut ve Revize Proje Kolon ve Perde Alanı Farkları



Grafik 19. Mevcut ve Revize Proje Yer ve Boyut Olarak Değişmeyen Kolonların Donatı Alan Farkı

Projenin hesapları yenilenerek, aşağıda verilen proje hataları tespit edilmiştir;

- İnşaatına başlanan yüksek katlı betonarme binada -mimari projede belirlenen kolon yerleri ve duvar yerleri dikkate alınarak

hazırlanan kalıp planının- duvar yerlerinin hatalı olması nedeniyle kolon ve kirişler çakışmamaktadır.

- Baca yerlerinden giriş geçmektedir.
- Merdiven mimari projesi bulunmamaktadır. Merdiven ve asansör yeri ve detayı, taşıyıcı sistem seçimini ve mimari - statik projeyi etkileyen en önemli parametrelerdir. Bu nedenle merdiven detayı mimari projede kesin olarak belirlenmesi gerekmektedir.
- Mimari asmolen ve plak döşeme olarak tasarlanmıştır. R süneklik katsayısının ve 2 kat asmolen tasarımının hatalı olduğu tespit edilmiştir. Ancak 2018 deprem yönetmeliğine göre bütün katların plak döşeme tasarlanması gerekmektedir.
- Türk deprem yönetmeliğinde olduğu gibi, diğer ülkelerin deprem yönetmeliklerinde en çok dikkate alınması gereken düzensizlik burulma düzensizliğidir (Doğangün,2018). Araştırma sonucunda Mevcut projede ciddi burulma düzensizliği tespit edilmiştir.
- Mevcut projede kütle ve rijitlik merkezi arası farkı %20,96 olarak hesaplanmıştır. Bu değer %5'den oldukça çok fazla olduğu için bina yatay yüklere göre yüksek derecede deprem etkisi altındadır. Taşıyıcı sistem tasarımı hatalıdır.
- 2018 deprem yönetmeliğine göre yeniden tasarlanan projenin düşey taşıyıcı ara mesafeleri artmış ve tüm katlar yönetmelik gereği plak döşeme olarak tasarlanmıştır.
- Revize projede kolon alanı mevcut projeye yakın (artış %1), perde alanı mevcut projeden %50,63 kadar az çıkmıştır. Bu durum yapı elemanlarına yeniden boyut ve yön verilmesini ve bu yeni duruma göre mimari proje yapılmasını gerektirmektedir.
- Ekonomik ve emniyetli olarak yenilenen projenin yapı eleman sayıları ve donatı alanı azalmış, kolon araları açılmıştır ve donatı alanları arasında fazla fark çıkmamıştır. Bu durum mevcut projenin ekonomik olarak tasarlanmadığını ortaya koymaktadır.
- Beton, donatı cinsi ve süneklik katsayısı hatalı seçildiğinden değiştirilmiştir.

Sonuç ve Öneriler

Yapı projelerinin yaratıcısı mimarlardır. İnşaat mühendisleri mimarın tasarladığı projeyi dikkate almak zorundadır. Araştırmada görüldüğü üzere depreme dayanıklı tasarlanmayan mimari proje hatalarını ilerleyen süreçlerde düzeltmek oldukça zordur. Bu nedenle Günümüzde deprem etkileri sonucunda yüksek katlı betonarme binalarda oluşan çökmelerin temel nedeni mimari projelerin deprem yönetmeliğine uygun tasarlanmamasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, Proje aşamasında İnşaat mühendislerinin yeteri kadar tecrübeli olmayışı sonucunda çoğu zaman hatalı mimari projeye göre hesaplar yapılmakta veya mühendislik ve mimari projeler örtüşmemektedir. Bu durum, günümüzde depreme dayanımlı yapı tasarımı konusunda sorunların artarak devam ettiğini göstermektedir. Mevcut binada 2018 deprem yönetmeliğine göre uygulamalarda mimari proje hatalarını şöyle özetleyebiliriz;

- Burulma düzensizliğine neden olan taşıyıcı sistem tasarımı; yapı elemanlarının bir bölgede yoğunlaşması (projede kütle ve rijitlik merkezi arası fark $\%20,96 > \%5$)
- Döşeme seçiminde yönetmeliklere uyulmaması
- Kolon ve kirişlerin deprem yönetmeliği minimum boyutlarının altında olması
- Havalandırma boşluklarından giriş geçmesi
- Kiriş ve kolonların kesişmemesi (hatalı duvar yerleşimi)
- Kolon ve perde yerlerinin çok yakın yerleştirilmesi
- Mimari planlarda merdiven kesit ve planları bulunmaması

Araştırma sonuçlarına bağlı öneriler şunlardır;

- Mimarların, taşıyıcı sistem tasarımı konusunda inşaat mühendisleri ile ortak dersleri ve eğitimleri almaları gerekmektedir. Bu kapsamda, Deprem yönetmeliğine göre, döşeme seçimine bağlı taşıyıcı sistem değişimlerinin (perde durumu, yerleri, yönleri) ve yapısal düzensizliklerin proje çalışmalarını ile uygulamalı öğretilmesi önemlidir.
- Taşıyıcı sistem ve süneklik katsayısı mimari proje verileri ile ilişkili (kat sayısı, döşeme seçimi, duvar yerleşimleri, binanın

konut veya okul olma durumları vs..) parametrelerdir. Statik ve betonarme projelerin değişmemesi açısından söz konusu konular açısından mimarlık ve mühendislik ortak eğitim sisteminin geliştirilmesi önemlidir. Aksi halde inşaat aşamasında iki disiplin projeleri örtüşmeyecek veya farklı projeler nedeniyle hatalı uygulamadan kaçınmak imkansızlaşacaktır.

- Mimarlık eğitiminde genel olarak çok farklı tasarımlar yapmak ve sanatsal açıdan farklılığın önemli olduğuna öğrenciyi odaklandırmak eski ve köklü üniversiteler dışında, bir çok mimarlık bölümünde öne çıkmaktadır. Ancak emniyet ve ekonomi ile sınırlandırılarak en güzel projeyi üretmenin önemini verebilecek eğitim sisteminin geliştirilmesi gerekmektedir. (Çolak, 2023).
- Mimarlık bölümlerinde deprem mühendisliği kürsüsü bulunmalıdır. Ancak Ülkemizde eski ve köklü üniversiteler dışında, bir çok Mimarlık bölümünde taşıyıcı sistem dersleri seçmeli olarak yürütülmektedir. Bu bağlamda mühendislik dersleri olarak mimarlık bölümlerinde yürütülen statik, mukavemet ve betonarme dersleri uygulama olarak yerini bulamama nedeni ile anlamsızlaştırılmaktadır.
- Mimarlık bir çok disiplini içine alan uygulamacı bilim dalıdır. Üniversite eğitiminde öğretim üyelerinin atama kriterleri arasında akademik çalışmalarının yanında belli sürelerde mesleki deneyimlerinin olması aranmalıdır.
- Artan nüfusla birlikte bina projelerinin çok katlı ve yumuşak zeminlerde yapılması zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Konu ile ilgili sürekli yeni seminerlere ihtiyaç bulunmaktadır. Bu kapsamda mesleki kuruluşların dinamik olması konu ile ilgili denetim firmalarını ve meslektaşlarını bilgilendirmesi gerekmektedir. Ancak Yapılan araştırma neticesinde Denetim firmalarının ortaya konulan eksikliklerinin artarak devam ettiği görülmektedir.
- Bina proje denetim firmalarında veya konu ile ilgili kurum ve kuruluşlarda görev alan yetkili mimar ve inşaat mühendislerine

mesleki kurslar ortak olarak verilmeli ve depreme dayanıklı yapı tasarımı konusunda iki disiplin arasında bilgi akışı sağlanmalıdır.

- Mimari proje tasarlama yetkisi betonarme bina şantiye şefliği yapan mimarlar arasından seçilmelidir.
- Yapı projelerinde üniversite eğitimi ve proje - uygulama denetim şartlarını ülkenin deprem kuşağında olması belirlemektedir. Ülkemizde, Yönetmelik, araştırmalar, yapı malzeme seçimi, eğitimde verilen zorunlu ve seçmeli dersler, stajlar vs.. bir çok konu için makro ölçekte dünyada deprem kuşağında olan ülkeler model alınmalıdır.
- Deprem kuşağında olan ülkemizde konu ile Gerek odalar gerekse üniversiteler taşıyıcı sistem malzeme seçimi, yönetmelikler, uygulamalar gibi konularda ki araştırmaları desteklemeli ve genişletmeli, üniversite ders içerikleri ve programları yenilenmelidir.
- Proje tasarımında ve proje denetim görevlerinde öncelikli olarak en az 5 yıllık proje tasarımı ve uygulama tecrübesi aranmalıdır.
- Hatalı mimari proje tasarımının inşaat aşamasında düzeltilmesi şantiye şefinin tecrübesine bağlıdır, ancak oldukça sıkıntılıdır. Bu sıkıntıları şöyle özetleyebiliriz;
- Şantiye planlaması; Şantiye planlaması çalışmalarında en önemli konu, doğru ve yeterli bilgi sağlanmasıdır (Özmen, 2000). Yapım eylemlerinin planlanması, iş programların hazırlanması, yapımın başlama devamlılığın sağlanması ve bitme sürecinin saptanması amaçlanmalıdır (Okan, 1979). Araştırmada,merdiven tasarımının olmayışı,duvarların farklı yerlerde oluşu,kolonların çok yakın olması ve binanın yüksek derecede burulma düzensizliğine neden olacak taşıyıcı sistem üzerine tasarlanması inşaat aşamasında projenin yenilenmesini gerektirmektedir. Projede ki ciddi değişiklikler, iş programında değişikliklere neden olmaktadır. Statik ve mimari projenin yenilenme süreci, malzeme ve işçilik farklılıkları işlerin devamlılığında aksama yaratacağından bitme süresinde uzama ve şantiye iş planlamasında ciddi aksamalara neden olacaktır.

- Şantiye Maliyeti; Belirli plan ve şartlarla önceden tespit edilmiş malzeme ve garanti edilmiş fiyat belirli bir süre içinde bir projeyi tahakkuk ettirmek de şantiye çalışmalarının amaçları arasında yer alır (Bannon, 1972). Projede verilen beton sınıfı, donatı cinsi ve yapı elemanlarında boyut değişimleri gibi nedenler çimento ve demir miktarında değişimlere neden olarak, malzeme alımı için uygun fiyat bağlantılarını aksatacak, daha önceden planlanarak hazırlanmış bir çok konu değişikliği nedeniyle şantiye ekonomisini fazlasıyla negatif olarak etkilenecektir. Araştırma da Şantiye maliyetini ve planlamasını etkileyen değişimler;
 1. R süneklik katsayısının artması; Donatı işçiliğinin özellikle birleşim yerlerinde özenle yapılması nedeniyle işçilik masraflarında artış oluşturacaktır.
 2. Beton sınıfı ve Donatı cinsinde değişme
 3. Taşıyıcı sisteme bağlı değişimler; Perde alanında azalma, Kolon sayısında azalma, Döşeme değişikliği, Kiriş ayısında azalma
 4. Kalıp ve beton miktarında değişimler

KAYNAKÇA

Akıncıtürk, N. (2003). *Yapı tasarımında mimarın deprem bilinci*, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 8(1), 189-201.

Albay, A. (1994). *Deprem dayanımında mimari tasarımın önemi ve erzincen deprem konutları* (Yüksek lisans tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Avşar Ö., Tunaboyu O., Bozer A., Sülev E. (2023). *Kahramanmaraş Depremlerinde 2000 Sonrası Yapılmış Betonarme Binalar ile Bölgedeki Karayolu Köprülerinin Sismik Performansı: Hatay Saha Gözlemleri Teknik Raporu*, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir.

Ayyıldız Potur, A., ve Metin, H. (2021). *Mimarlık eğitiminde depremin yeri ve depremin eğitsel boyutu: Küresel gündem ve Türkiye bağlamı üzerine bir değerlendirme*. Megaron, 16(2), 223-252.

Bannon, J. (1972). *Problem solving in reaction and parks, englewood cliffs*. Pretice Hall. London.

Baranson, J. (1979). *Technology and MultiantionalIs*. Lexington Book Company. London.

Bingöl, K. (2020). *Depreme dayanıklı mimari tasarım aşamasında derin öğrenme ve görüntü sınıflama yöntemi ile burulma düzensizliği tespiti* (Yüksek lisans tezi), Çankaya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Çolak, Ç. (2022). *An examination of the efficiency of construction engineering classes in architectural education*. 5.Uluslararası İnsan Çalışmaları Kongresi (ICHUS-2022). Online.

Demir, A., ve Dönmez, D. (2008). *Çok katlı yapılarda burulma düzensizliğine etki eden faktörler*. Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 4(1), 31-36.

Onur Deprem Etkisi Altında Binalar Tasarımı İçin Hazırlanan Yönetmelik. (2018). *T.C. Resmi Gazete* (30364, 18 Mart 2018).

Doğan, A. (2013). *Ankara'da yapı denetim sorunlarının belirlenmesiyle ilgili bir saha çalışması* (Yüksek lisans tezi), Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Doğangün, A. (2018). *Betonarme yapıların hesap ve tasarımı*, Birsen Yayınevi, 166s. İstanbul.

ideCAD. (2019). *İde statik programı*, V10.14 sürümü, İstanbul.

Kaplan, H., Tama, Y. S., Ün, H., ve Yılmaz, S. (2017). Kamu yapılarında gözlenen yapısal kusurlar. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(2), 203-212.

Koç, V. (2021). *Mevcut binalarda taşıyıcı sistem düzensizliklerinin belirlenmesine yönelik bir çalışma*, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (33), 32-39.

Koç, V. (2021). *Taşıyıcı sistem tasarım hatalarına dair bir saha incelemesi*, 4th International Applied Sciences Congress. Mediterranean Summit, 24-25 Nisan, Girne, Kıbrıs, 105-113.

Livaoğlu, R. (2001). *Yapıların deprem hesabında burulma düzensizliğinin ve hesap yöntemlerinin etkinliğinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi), Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Meydan Yıldız, S. G. (2019). *Türkiye'de yapı denetim sistemi ve afet yönetimi ilişkisi*, Asam Uluslararası Hakemli Dergi, 389-400.

Okan, A. (1979). *Tasarım aşamalarında maliyet denetimi* (1.Baskı), Çağlayan Basımevi. İstanbul.

Özmen, G. (2000). *Plan geometrisinin burulma düzensizliği etkisi*, Türkiye Mühendislik Haberleri, 410, 37-41.

Pala, M., ve Demir, M. Ş. (2017). *Güneydoğu Anadolu Bölgesinde yapı denetimi uygulamasında karşılaşılan sorunlar ve bu sorunlara ilişkin çözüm önerileri*, Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 4(6), 20-33.

Pamukçu, O. A., Çırmık, A., Gönenç, T., ve Uluğtekin, M. (2023). *Deprem Ön Değerlendirme Raporu. Pazarcık (Kahramanmaraş Depremi), Elbistan (Kahramanmaraş Depremi), Defne (Hatay) Depremi*. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İzmir.

Safa, Ö.R. (2018). *Mimari tasarımda betonarme yapıların Türk Deprem Yönetmeliği açısından taşıyıcı sistem düzensizliğinin değerlendirilmesi* (Yüksek lisans tezi), Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Sargın, H. (2020). *Mevcut betonarme bir binanın sistem iyileştirmesi ve taşıyıcı eleman güçlendirme yöntemlerine göre karşılaştırılması* (Yüksek lisans tezi), Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.

Sever, A. (2020). *DBYBHY-2007 sonrası yapıların proje ve yapım aşamalarında karşılaşılan hatalar üzerine inceleme: Sakarya örneği* (Yüksek lisans tezi), Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. (2018). *T.C. Resmi Gazete* (30364, 18 Mart 2018).

Türkiye Deprem Tehlike Haritası ve Parametre Değerleri Hakkında Karar. (2018). *T.C. Resmi Gazete* (30364, 18 Mart 2018).

Yılmaz, H. (2007). *Yapı denetimi ve yapı denetim kuruluşları*. Yetkin Yayınları. Ankara.

BÖLÜM III

Hibrit, Cam Elyaf Takviyeli Polimer Çubuk (GFRP) ve Çelik Donatıların Performanslarının Karşılaştırmalı İncelenmesi

Mahsun DEMİR¹
Batuhan DAZ²
Kamil Bekir AFACAN³
Caner ŞİMŞEK⁴
Melih Cemal KUŞHAN⁵

1.Giriş

¹ Öğrenci, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Orcid: 0009-0001-5020-8761, mahsundemireee@gmail.com , Orcid: 0009-0001-5020-8761

² Araştırmacı, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Rektörlüğü Savunma Teknolojileri Araştırma Grubu, batuhandazeee@gmail.com ,Orcid: 0009-0004-2917-874X

³ Doç.Dr., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, kafacan@ogu.edu.tr ,Orcid: 0000-0002-3667-4432

⁴ Öğretim Görevlisi, Jandarma ve Sahil Güvenlik Akademisi, Adli Bilimler Enstitüsü, CANER.SIMSEK@jsga.edu.tr , Orcid:0000-0001-7214-145X

⁵ Prof.Dr., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Uçak Mühendisliği, erzesk@gmail.com ,Orcid: 0000-0002-9427-6192

Günümüz yapıları düşünülduğünde inşaa edilen ve edilmekte olan çoğu yapı çelik ile betonun beraberinde kullanımıyla oluşan betonarme yapılardır. Çelik donatılı betonarme yapılar çeşitli çevresel faktörlere (nem, atmosferdeki karbondioksit, tuzlu deniz suyu, harçta bulunan klorür iyonu, donma vb. gibi dış etmenler) maruz kalması durumunda uzun vadede korozyona uğramaktadır. Bu korozyon sonucunda ise; çelik-beton arayüzünde aderans dayanımı kaybı, donatıda meydana gelen çap azalması, donatının mekanik özelliklerindeki olumsuz değişimler sonucu beton çatlama oluşur (Çakır ve Aköz, 2014,70-85). Yaşlanmış yapılarda çelik donatıların uğramış olduğu korozyon etkisiyle betondaki paspayının düşmesi ile Şekil 1'deki gibi betonarme yapısındaki bozukluklar görülmektedir.



Şekil 1. Betonarme kirişindeki korozyona uğramış çelik donatılar (Beton Yapılarda Korozyonun Etkisi,2016)

Betonarme yapısındaki bu bozukluklar çeşitli korozyon oluşumunu önleyici yöntemler ve kaplamalar (Kaftan,2006) ile önlenmeye çalışılsa da bu çözümler yüksek maliyet ve iş gücünün yanında korozyon oluşumunun engellenmesinde yetersiz kalmaktadır ve yapı güvenliğinde şaibeli durumlar yaşatmaktadır. Geçtiğimiz 30 ila 40 sene öncesine kadar betonarme yapılar hakkında bu yapıların; kalıcılığı, yapı bozunumları ve korozyon faktörleri hakkında yeterli bilgi birikimi olmadığı için ve betonarme yapılar hakkında betonun zamanla dayanımının artmasına ve çelik

donatının beton pas payı tarafından korozyona karşı korunduğuna dair bir inanış söz konusuydu. Fakat bahsi geçen bu zaman aralığından günümüze kadar olan bu süreçte inşaa edilen bu yapıların yalnızca dayanımı göz önünde bulundurularak yapılmış uygulama hataları bize olumsuz sonuçları göstermektedir.

Günümüzde polimer endüstrisinin gelişimiyle birlikte inşaat endüstrisinde de yüksek dayanıma ve uzun ömre sahip olan polimer malzemelerin geleneksel elik donatılara ikame olarak kullanılması gündeme gelmiştir. Fiber Reinforced Polymer (FRP) malzemelerden üretilen donatılar özellikle korozyon ve malzeme ömrü konusunda elik donatılara alternatif olarak üretilmektedir. Standart bir elik donatının ortalama malzeme ömrü yaklaşık 30 yıl iken FRP malzemelerden ise beklenen malzeme ömrü yaklaşık 100 yıldır (Özşenol, 2014).

FRP'ler tarişesini ilk olarak 1900'lerin başlarındaki sentetik plastiklerin geliştirilmesinden alsa da ilk geliştirilen ürünlerin sertlik ve dayanıklılık özelliklerinin düşük olması sebebiyle ilk olarak donatı amaçlı kullanılmamıştır. 1950'lerde geliştirilen polimer esaslı kompozit yapıların üstün performansları sonucunda çeşitli sektörlerde ve kullanım sahalarında; değişik türde matris ve takviye elemanı kombinasyonlarıyla polimer bir reçine matrisin içine güçlü elyaflar gömerek metalik malzemelere göre çeşitli avantajlar sağlayan FRP üretimine başlanmıştır. FRP'lerin üretiminde cam, karbon, aramid ve bazalt elyaflar yaygın olarak kullanılmaktadır. Matris malzemesi olarak ise epoksi, polyester ve vinilester reçineler kullanılmaktadır. FRP'lerin en çok kullanılan kombinasyonları arasında Cam Elyaf+Polyester, Karbon Elyaf+Epoksi ve Aramid Elyaf+Epoksi bulunmaktadır. Devam eden süreçlerde seneler içerisinde radar yapıları, giydirme cephe kaplamaları, kubbe, çatı vb. olarak kullanılsa da 1960'larda Amerika Birleşik Devletleri'nde (Bank, 2006), 1970'lerde Avrupa'da (Taerwe ve Matthys, 1999) FRP'lerin yapı elemanı olarak ilk başarılı kullanımları grlmştir. Korozyon hızının yüksek olduğu yani yüksek derecede nem ve su etkisine maruz kalan yapılar başta olmak üzere elektromanyetik alan istenmeyen yapılarla ve kimyasal olarak

oksitlenmeyi hızlandıracak ortamlarda bulunan yapılarda FRP kullanımları görülmektedir. Şekil 2 ve 3'te GFRP kullanılan yapılar gösterilmiştir.



Şekil 2. Korozif Ortamlarda GFRP kullanımı (Fiberglass (GFRP) Composite Rebar,2019)



Şekil 3. Korozif Ortamlarda GFRP kullanımı (Fiberglass (GFRP) Composite Rebar,2019)

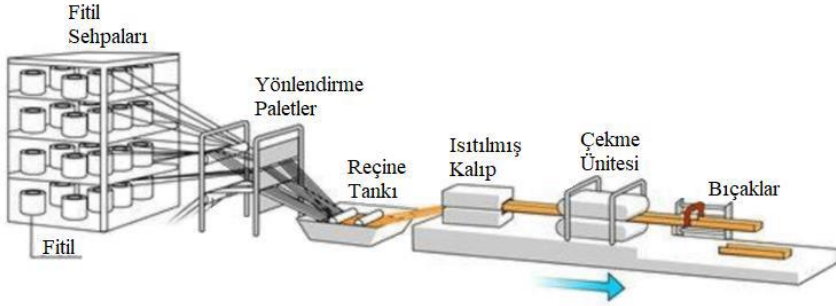
2.YÖNTEM

FRP'lerin üretim kombinasyonlarından biri olan Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) donatı; betonarme bir yapıda çelik donatıya ikame olarak ya da hibrit bir sistemde çelik ile tamamlayıcı bir sistemde birlikte kullanılabilir.

2.1.Çelik Donatı ve GFRP Donatı

Çelik donatılar geçmişten günümüze betonarme yapılar içerisindeki en bilindik ve en çok kullanılan metalik yapı malzemesi olmuştur. Fakat gelişen polimer teknolojisi sayesinde GFRP donatılar daha az iş gücü, daha az lojistik maliyet ve antikorozyon özellikleriyle çelik donatıların yerini almaktadır. Pultrüzyon yöntemiyle imal edilen GFRP donatıların mekanik ve fiziksel özellikleri kompoziti oluşturan reçine (hasar mekanizmasını ve kompozitin kırılma tokluğunu belirler), polimer elyaf tipine ve hacim oranına (donatının elyaf yönündeki kuvveti ve sertliğine etki

eder), polimer elyaf reçine ile yapışma kabiliyetine, reçinedeki elyaf dağılımından etkilenmektedir. Donatının özelliklerini etkileyen diğer faktörler reçine kütle oranı, üretim süreci ve üretim esnasında kalite kontrolüdür (Kadı,2019:36). Şekil 4'te Pultrüzyon yöntemi ile imal edilen GFRP donatıların üretim aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 4. Pultrüzyon yöntemi konfigürasyonu (Marco, 2014)

2.1.1. Fiziksel ve Mekaniksel Özellikler Tablo Karşılaştırması

GFRP donatılar çelik donatılara göre; yüksek boyuna çekme dayanımı, hafiflik, yüksek yorulma dayanımı, manyetik yalıtıcılık, düşük termal ve elektriksel iletkenlik vb. gibi avantajlı özelliklere de sahiptir. Çelik donatıya alternatif bir yapı malzemesi olarak sunulan GFRP donatılar istenilen boy ve çapta (4mm-32mm), ASTM 7205, TS 13816, ISO 10406-1, ACI 440-5R, CSA S807 yönetmeliklerine uygun olarak, çelik donatılara göre daha ucuz malzeme ve lojistik maliyet ile temin edilmektedir. GFRP donatıların fiziksel ve mekaniksel özellikleri Tablo 1'de görülebilir.

Tablo 1. GFRP donatıların fiziksel ve mekaniksel özellikleri

İçerik	
Cam Tipi	E sınıfı cam
Reçine Tipi	Vinil Ester Epoksi (Grade I) / Polyester Epoksi (Grade II)
Cam Oranı (Ağırlıkça)	> %70
Beklenen Malzeme Ömrü	100 yıl
Teknik Özellikler	

	Değer	Birim
<i>Çekme Dayanımı</i>	>900	MPa
<i>Elastisite Modülü</i>	40-60 (~50)	GPa
<i>Kesme Dayanımı</i>	>150	MPa
<i>Betona Tutunma Dayanımı</i>	>12	MPa
<i>Alkali Ortamda Dayanım</i>	>675	MPa
<i>Akma Şekil Değiştirme</i>	Yok	
<i>Erime Sıcaklığı</i>	>400	C°
<i>Kopma Şekil Değiştirme</i>	>1.2 (1.2-3.1)	%
<i>Yoğunluk</i>	1.9-2.1	Kg/dm ³
<i>Kimyasal ve Elektriksel Etkileşim</i>	Yok	

Fiziksel Özellikler

<i>Çap (mm)</i>	<i>Ağırlık (kg/m)</i>	<i>Kesit Alanı (mm²)</i>	<i>Yoğunluk (gr / cm³) (Ort.)</i>
4	0.025	12.56	2.06
6	0.056	28.25	2.07
8	0.101	50.25	2.09
10	0.157	78.50	2.10
12	0.216	113.04	2.10
14	0.311	153.86	2.10
16	0.424	200.96	2.11
18	0.534	254.34	2.11
20	0.663	314.00	2.11
26	1.119	530.66	2.11
32	1.696	803.84	2.11

Çelik donatılar ise GFRP donatılara göre çoğu yönden GFRP donatılara göre dezavantajlı olsa da betonarme yapıların ilk zamanlarından beri kullanılan ve sektörel bazlı geleneksel bir yapı elemanı olarak görülmektedir. Mevcut kullanıcılar tarafından ve mevcut iş gücü tarafından bilinen bir yapı elemanı olması, kolay temin edilebilir ve bilinen bir donatı çeşidi olduğu için çelik donatı kullanımı yaygındır. Harici olarak çelik donatıların süneklik ve elastite modülü olarak GFRP donatılara göre daha yüksek değerler gösterdiği görülmüştür (Ruan vd.,2019:43). Bu nedenden dolayı çeşitli çalışmalarda ve yapılarda yapı elemanı olarak tercih sebebi olmaya devam etmektedir. Tablo 2’de çelik donatıların fiziksel ve mekaniksel özellikleri görülebilir. Ancak şunu da belirtmek gerekir ki çelik donatının mekanik özellikleri çelik sınıfına ve ısıtma işlemine tabi tutulup tutulmadığına bağlı olarak değişmektedir.

Tablo 2. Çelik donatıların fiziksel ve mekaniksel özellikleri

İçerik

<i>Malzeme Tipi</i>	Çelik
<i>Beklenen Malzeme Ömrü</i>	30 yıl

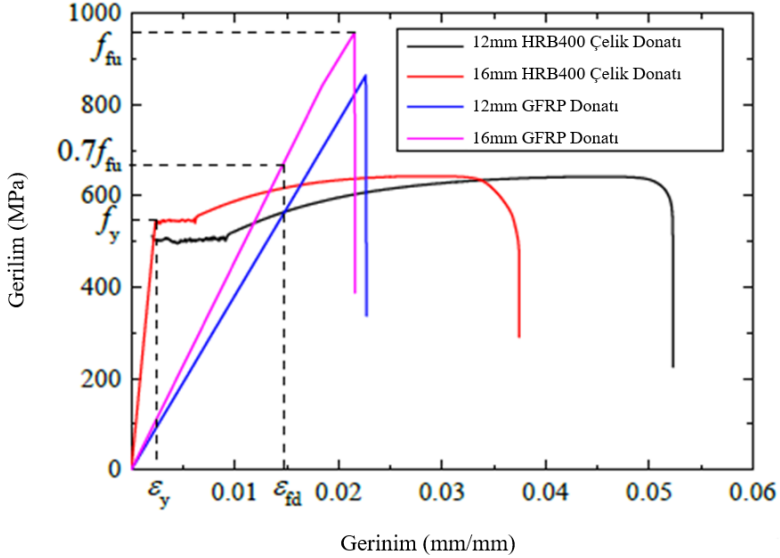
<i>Teknik Özellikler</i>		
	Değer	Birim
<i>Çekme Dayanımı</i>	480-600 (~ 520)	MPa
<i>Elastisite Modülü</i>	200	GPa
<i>Kırılmada Uzama</i>	15-25	%
<i>Kopma Şekil Değiştirme</i>	6-12	%
<i>Yoğunluk</i>	>7	Kg/dm ³
<i>Korozyon Dayanımı</i>	Yok	
<i>Kimyasal Dayanıklılık</i>	Yok	
<i>Elektriksel ve Manyetik Yalıtkanlık</i>	Yok	

<i>Fiziksel Özellikler</i>			
<i>Çap (mm)</i>	<i>Ağırlık (kg/m)</i>	<i>Kesit Alanı (mm²)</i>	<i>Yoğunluk (gr/cm³) (Ort.)</i>
8	0.395	50.25	7.84
10	0.617	78.50	7.84
12	0.888	113.04	7.84
14	1.208	153.86	7.84
16	1.578	200.96	7.85
18	1.998	254.34	7.85
20	2.466	314.00	7.85
26	4.168	530.66	7.85
32	6.310	803.84	7.85

Çelik ve GFRP donatıların mekaniksel ve fiziksel özelliklerinin verildiği Tablo 1 ve Tablo 2'deki veriler göz önünde bulundurulduğunda; GFRP donatıların çelik donatılara göre yaklaşık 2-3 kat daha fazla (çelik donatının üretim koşullarına göre değişiklik gösterebilir) çekme dayanımı sergilediği, çelik donatıların GFRP donatılara göre daha sünek bir yapılarının olduğu ve GFRP donatıların yaklaşık 4 kat daha hafif olduğu görülmektedir.

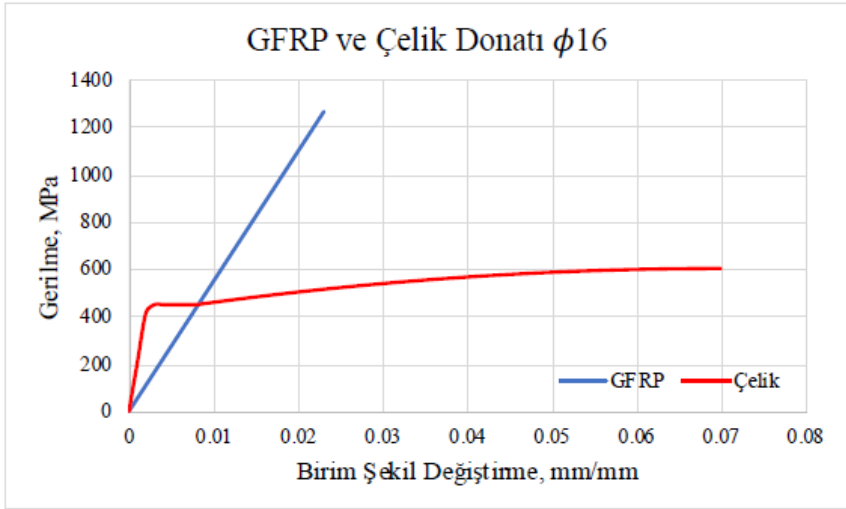
2.1.2. Çelik ve GFRP donatıların çekme dayanımı karşılaştırılması

Ruan vd. (2019:43) 12mm ve 16mm çaplarında HRB400 çelik donatı ile 12mm ve 16mm çaplarında GFRP donatı kullanarak ilgili donatıların çekme mukavemeti hakkında bilgi edinmiştir. Şekil 5'te ilgili grafik gösterilmiştir.



Şekil 5. Belirlenen çapta GFRP ve Çelik donatıların çekme mukavemeti verileri (Ruan vd.,2019:43)

Yapılan bu çalışma (Ruan vd.,2019:43) sonucunda elde edilen grafikte; her iki donatı tipinin de çekme mukavemeti üzerinde belirgin farklılıklar görülmektedir. GFRP donatıların kopma noktasına kadar lineer elastik bir çekme mukavemeti eğrisine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Çelik donatılara kıyasla GFRP donatılarda akma, pekleşme ve heterojen bölgeler gözlemlenmemiştir. Çelik donatılarda ise maksimum çekme mukavemetine ulaşıldıktan sonra uzamalar meydana gelerek en sonunda kopma yaşanmıştır. İlgili grafiğe dayalı yapılan yorumların sonucunda GFRP ve çelik donatılar arasındaki en büyük farklılıklardan biri GFRP donatıların süneklik özelliğinin bulunmamasıdır. 12mm ve 16mm GFRP donatılar 800-1000 MPa arasında gerilim gösterebilirken 12mm ve 16mm çelik donatılar ~600 MPa büyüklüğünde gerilimler göstermiştir. Yapılan başka bir çalışmada (Yıldırım,2022:18) da yapılan analizleri destekleyen benzer grafikler ortaya çıkmıştır ve Şekil 6'da görülebilir.



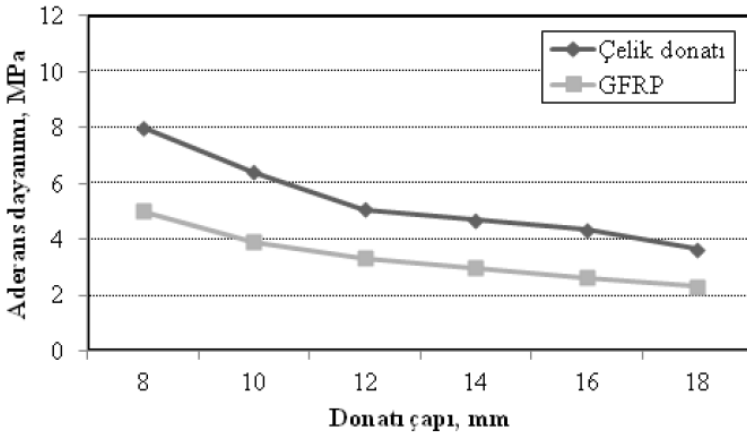
Şekil 6. 16mm Çapta GFRP ve çelik donatıların çekme mukavemeti grafiği (Yıldırım,2022:18)

Şekil 6'da bulunan grafikte görülebileceği üzere 16mm çelik ve GFRP donatıların belirgin mekaniksel farklılıkları bu çalışmada da söz konusudur. Düşük deformasyon seviyelerinde ($\epsilon=0.02$) GFRP donatı aynı çaptaki çelik donatıya göre yaklaşık 3 kat daha fazla gerilme taşımaktadır. Ayrıca GFRP donatının düşük deformasyon seviyelerinde sahip olduğu lineer eğride maksimum gerilmeden sonra kopma noktasında gevrek bir davranış sergilediği ama çelik donatının yüksek deformasyon seviyelerinde kopma noktasına kadar sünek bir davranış gösterdiği net bir şekilde görülebilir.

2.1.3. Çelik ve GFRP donatıların aderans dayanımlarının karşılaştırılması

Aderans dayanımı birden fazla çevresel şarta ve kullanılan donatıların çaplarına bağlı olarak değişebilmektedir. Çelik donatılar zaman içerisinde korozyona uğrayarak tahrip olmaktadır. Bu korozyon sonucunda ise çoğunlukla beton ile çelik donatı arasında aderans kaybı gözlemlenmektedir. GFRP donatılar çelik donatılara göre daha düşük termal genişleme göstermektedir, çelik donatılar ise

daha yüksek termal genişlemeye sahiptirler, çelik donatılar GFRP donatılara göre daha yüksek aderans dayanımı sağlamaktadırlar. Topçu ve Uygunoğlu (2020:7) yapmış oldukları çalışmalarda C25/30 sınıfındaki betonla farklı çaplardaki GFRP ve Çelik donatıların aderans dayanımlarını gözlemlemiştir. Şekil 7’de çap ve aderans dayanımındaki değişim GFRP ve çelik donatılar arasında karşılaştırılmalı olarak görülebilmektedir. Elde edilen bu grafiğe dayanarak çapın artmasıyla beraber beton ile donatı arasındaki temas yüzey alanı artacağı için elde edilen aderans değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir.



Şekil 7. Farklı çaplara göre GFRP ve çelik donatıların aderans dayanımları (Topçu ve Uygunoğlu,2022:7)

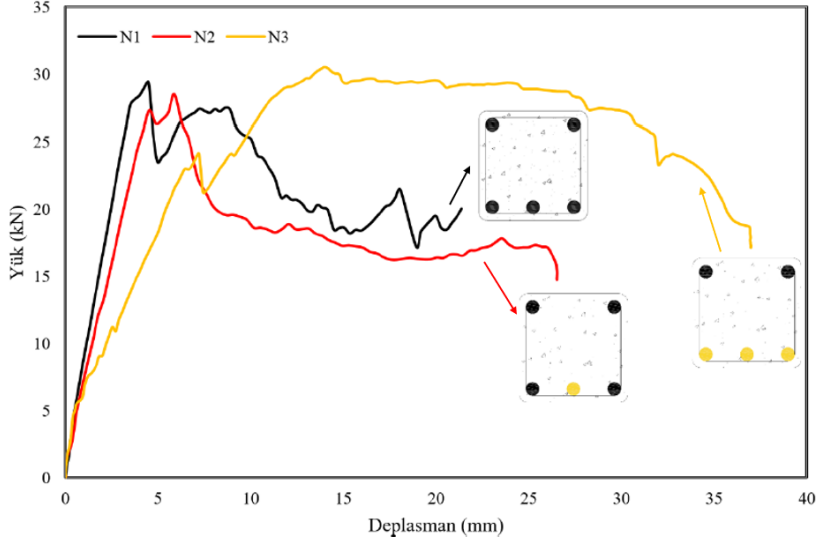
Şekil 7'de bulunan grafikte görülebileceği üzere her iki donatı malzemesinin düşük çaplardaki aderans dayanımı daha yüksektir. Değişen farklı donatı çaplarında çelik donatıların aderans dayanım değerleri ile GFRP donatıların aderans dayanım değerlerine göre yaklaşık %40-%45’lik bir farkla daha yüksektir. 8mm-12mm aralığında çeliğin donatı çapı yaklaşık %50 arttırıldığında aderans dayanımı yaklaşık %40 oranında kayba uğramıştır, GFRP de ise bu aralıkta yaklaşık %30 oranında bir azalma görülmektedir. 8mm-18mm aralığından ise donatı çapı %125 arttırılmış ve çelik donatının

aderans dayanımı yaklaşık %55 azalırken GFRP donatıda aderans dayanımı yaklaşık %60 seviyelerindedir.

2.2. Hibrit Sistem

Hibrit sistemler birbirine ikame olarak GFRP ve çelik donatıların birbirini tamamlayıcı olarak kullanıldığı güçlendirilmiş sistemlerdir. Buradaki temel amaç bu iki donatı tipinin de eksikliklerini birbirini tamamlayarak gidermektir. Oluşturulan bir hibrit sistemde kullanılacak olan donatı düzeni çok önemlidir. GFRP donatıların düşük elastite modülüne sahip olmasından dolayı yüklerin etkisindeyken oluşan çatlaklarda rijitliklerinde önemli azalmalar gözlemlenebilir çünkü GFRP çubuklar çekme altında her ne kadar daha başarılı bir performans sergilese de basınç altındaki davranışı beklenildiği kadar iyi değildir. GFRP donatı kullanılan betonarme bir yapıda kırılmadan önce geniş çatlaklar gözlemlenebilir. Bu durumda ise en başta hizmet verebilirlik durumu göz önünde bulundurulmalıdır (Refai vd.,2015).

Gemi vd. (2020) yapmış oldukları çalışmada 3 tip numune (Çelik donatılı, GFRP donatılı ve hibrit sistem olmak üzere) üstünde çalışmalar yapmıştır. Bu üç tip numune üzerinde yapılan testler sonucunda elde edilen veriler karşılaştırıldığında ise; hibrit sistem ve çelik donatılı yapının rijitlikleri benzer, GFRP donatılı yapının ise rijitliğinin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. İlgili deneyin yük ve deplasman eğrisi Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Hibrit, çelik ve GFRP donatılar kullanılarak oluşturulan deney numunelerinin yük ve deplasman sonuçları (Gemi vd.,2020:9)

Şekil 8’de bulunan grafikte görülebileceği üzere GFRP donatılı numunenin enerji sönümleme kapasitesi çelik donatılı ve hibrit sistem numunelerin enerji sönümleme kapasitesine göre 2 kat fazladır. Ayrıca çelik donatılı numune ve hibrit sistem numunenin maksimum taşıma kapasitesi birbirine yakın değerlerdir.

3.SONUÇLAR

Bu çalışmada, çelik donatılı betonarme yapılarda başta korozyona maruz kalması üzere ortaya çıkan çeşitli sorunlara alternatif olarak Fiber Reinforced Polymer (FRP) malzemelerden biri olan GFRP donatıların kullanılabilirliğini ve hibrit sistemlerin avantajları incelemiştir.

- Çelik donatılı betonarme yapıların uzun vadede korozyona uğramasının; malzeme ömrünün kısılmasına (30 yıl), beton ile donatı yüzeyi arasındaki aderans kaybına, donatıda çap

azalmasına ve beton çatlamalarına neden olduğu bilinen bir durumdur.

- GFRP donatıların, yüksek dayanımına (GFRP donatıların çekme dayanımı çelik donatılara göre 2-3 kat daha fazladır), uzun ömrüne (beklenen 100 yıl) ve korozyona karşı direncine dikkat çekilerek çelik donatıya ikameliği değerlendirilmiştir.
- Yürütülen çeşitli çalışmalar da göz önünde bulundurularak GFRP ve çelik donatıların fiziksel ve mekaniksel özellikleri hakkında yorumlamalar ve karşılaştırılmalar yapılmıştır. GFRP donatılar özellikle hafiflik (aynı çaptaki çelik donatıya göre yaklaşık 4 kat daha hafiftir), antikoroziv ve daha yüksek çekme dayanımı gibi özellikleriyle, çelik donatılara kıyasla daha uygun maliyet ve lojistik avantajları sağlamaktadır.
- İki donatı tipinin de çekme mukavemet grafikleri incelendiğinde GFRP donatıların lineer elastik davranış sergilemesi ve bunun sonucunda akma ve pekleşme bölgesi oluşturmadan kopma noktasına direkt geçişi kullanılabilirlik açısından görüş farklılıkları oluşturmuştur.
- Çelik donatıların aderans dayanım verilerinin daha yüksek olması ve süneklik özelliğinden dolayı kırınım gölgesine ani geçiş göstermemesi göz önünde bulundurularak hibrit bir sistemin daha sağlıklı sonuçlar vereceği düşünülmektedir. GFRP ve çelik donatılar optimum çözümler için hibrit sistemden oluşan bir yapıda çelik donatıların süneklik özelliği ve GFRP donatıların antikoroziv özellikleri ile daha uzun ömürlü, yüksek dayanımlı ve basınç altında daha verimli sonuçlar alındığı gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak her iki malzemenin de avantaj ve dezavantajlarına değinilerek uygun uygulama alanlarının belirlenmesine ve hibrit bir sistemin performansına dikkat çekilmek istenmiştir.

KAYNAKÇA

Aköz, F. Çakır, Ö. (2014). Betonarme Korozyonu. *Türkiye Hazır Beton Birliği Hazır Beton Dergisi*, Sayı 124. Temmuz-Ağustos, 70-85.

Bank, L. C. (2006). Composites for construction Structural design with FRP materials New York: John Wiley & Sons

Beton Yapılarda Korozyonun Etkisi. (2016) 24.11.2023 tarihinde Kyk Yapı Kimyasalları Blog: <https://www.kyk.com.tr/blogdetay-beton-yapilarda-korozyonun-etkisi-23-11-2016> adresinden alındı.

El Refai, A., Abed, F., Al-Rahmani, A. . (2015) “Structural performance and serviceability of concrete beams reinforced with hybrid (GFRP and steel) bars,” *Construction and Building Materials*, c. 96, ss. 518-529.

Fiberglass (GFRP) Composite Rebar. (2019) 26.11.2023 tarihinde Pulwell Composites Co.: <https://www.gfrp-china.com/composite-rebar/fiberglass-mesh/rebar-and-wire-mesh.html> adresinden alındı.

Gemi, L. Madenci, E. Ve Özkılıç Y.O. (2020). “Çelik, Cam FRP ve Hibrit Donatılı Betonarme Kirişlerin Eğilme Performansının İncelenmesi,” *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 8, ss 1470-1483.

Kadı, M. E. (2019). *Cam elyaf takviyeli polimer etriye donatılı dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerin kesme davranışlarının incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi, Sakarya

Kaftan, M. A. (2006). *Çelik yapılarda korozyon oluşumu ve korozyondan korunma yöntemlerinin maliyet açısından karşılaştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Pamukkale Üniversitesi, Denizli

Marco, F. Gallegos, C. (2014). Theoretical and experimental performance analysis of a cellular GFRP vehicular bridge deck, *Innovación, Tecnología y Sostenibilidad en la Construcción CEMCO 2014-15, 18.Baskı*. Doi: 10.13140/RG.2.1.1737.6887

Özşenol, D. (2014). *FRP malzemelerde durabilite* (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi, Sakarya

Ruan, X, Lu, C. Xu, K. Xuan, G. Ni, M. (2019). Flexural behavior and serviceability of concrete beams hybrid-reinforced with GFRP bars and steel bars, *Composite Structures*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111772> ,43

Taerwe, L. R. ve Matthys, S. (1999). FRP for Concrete Construction: Activities in Europe. *Concrete International, Cilt:21* (10): 33-36

Topçu, İ.B. Uygunoğlu, T. (2022). “GFRP Çubukların Özellikleri ve Prefabrik Altyapı Elemanlarında Kullanımı,” *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, doi: 10.31202/ecjse.602224

Yıldırım, M. (2022). *Deprem Etkisindeki Çerçevelerde GFRP ve Çelik Donatılı Kolonların Bindirme Bölgelerinin Deneysel ve Analitik İncelenmesi* (Doktora Tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir

BÖLÜM IV

Çok Fazlı Atıksu Boru Hatlarında Yumurta Kesitli Boruların Kullanımı

Esin ACAR¹

Giriş

Atıksu sistemleri kullanılmış suların tahliye edilmesi amacıyla kullanılan mühendislik yapılarıdır. Bu sistemler ile hem çevresel kirliliğin azaltılması hem de kullanılmış suların kontrollü bir biçimde yaşam alanlarından uzaklaştırılması sağlanmaktadır. Atıksular farklı malzemelerdeki boru hatları kullanılarak planlanmakta ve kullanılan bölgenin özelliklerine göre de hesaplamaları yapılmaktadır. Bu bölgeler; yerleşim, sanayi ya da tarım amaçlı olabilmektedir. Planlamalar yapılırken uzun vadeli dönemler için ekonomik ömürleri dikkate alınarak ortaya konan hesap yöntemleri kullanılmaktadır.

¹ Artvin Çoruh Üniversitesi, Borçka Acarlar MYO, İnşaat Bölümü

Bu çalışma ile çok fazlı atıksu boru hatlarında özellikle ülkemizde daha yaygın olarak kullanılan dairesel kesitli boruların yerine yumurta kesitli boru hatlarının da kullanılabileceğini belirtmektedir. Yumurta kesitli boruların kullanımı özellikle yurtdışında oldukça yaygın olup, özellikle taban şekli itibarıyla hız değerlerinin yüksek olmasından kaynaklı sediment birikimi daha düşük olmaktadır. Bu durum da uzun vadeli ekonomik ömürlerinin optimum bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır. Uygulamaya yönelik çalışmaların artırılması ile bu tarz sistemlerin yaygınlaştırılması özellikle yerleşim yerlerinin atıksu sistemlerini daha güvenli hale getirecektir.

Yurtdışı ve yurtiçi birçok firma tarafından farklı kesitlerde yumurta kesitli boruların üretimleri yapılabilmektedir. Özellikle farklı malzemeler ile imal edilebilmeleri sayesinde daha uzun ömürlü ve ekonomik kullanım sağlamaktadırlar.

Atıksu sistemleri

Atıksu karakteristikleri, debi ve atıksu özellikleri ile ilgilidir. Bu karakteristikler, meskûn bölgede kullanılan su miktarı ile sanayi ve ticari faaliyetlere sıkı sıkıya bağlıdır. Yağışlı havalarda önemli miktarda drenaj (yağış) ve sızıntı suları kanallara girer. Bu durum atık suyun özelliklerini önemli ölçüde değiştirir (Öztürk, 2017). Bu sistemler ayrı ya da birleşik sistemler olarak tasarlanmaktadır. Kullanım debileri, yerleşim yerleri, nüfus bilgileri gibi bir çok faktörlerin bir araya gelmesi ile uzun vadeli kullanım olanakları sunan kullanılmış suların uzaklaştırılması esasına dayanmaktadır.

Atıksu kanallarının fiziksel özellikleri

Atıksu kanalları geometrik özellikleri, boru materyalleri, kanal boyuna eğimleri olmak üzere fiziksel parametrelerden yararlanılarak hesaplanmaktadır.

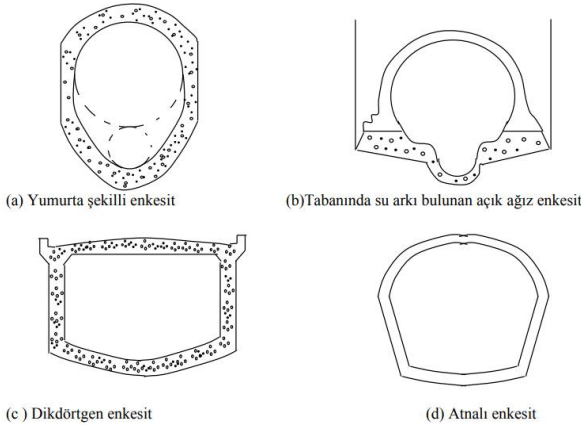
Atık su kanallarının geometrisi

Seçilecek enkesitler hidrolik yönünden en uygunu olmalıdır. Belirlenen su debisi, bu kesitlerin seçilmesinde çok önemli bir etkidir. Debi hesaplarında atıksu sistemlerinin gereksinimlerine göre parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu sebeple projelendirme esnasında tüm bu faktörlerin titizlikle ortaya konması gerekmektedir.

Bundan başka inşaat yüksekliğinin azlığı veya çokluğu da kanal en kesit şekilleri seçiminde diğer önemli bir husustur (Erdemgil& ark., 1976).

Kurak havalarda kanalda yeterli hız sağlamak için, kanalın alt kısmı sivri olan ve küçük debileri yeterli bir su yüksekliği ile iletebilen enkesitler yapılmıştır. Yumurta enkesit bu düşüncelerin sonucudur. Aslında yumurta şekilli kesitler dairesel iki kanalın bir araya gelmesinden oluşurlar. (Muslu, 2005). Yumurta enkesitler farklı genişlik ve yüksekliklerden oluşabilmekte olup, tasarım için en uygun boru kesitinin kullanılması tabanda daha hızlı hareket sağlayan özellikler taşımaktadır.

Yumurta kesitli, açık ağız, dikdörtgen ve atnalı olmak üzere bileşik sistem kanallara ait enkesitler aşağıda verilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Birleşik sistem kanallarının enine kesitleri (Muslu, 2005)

Kanalizasyon sistemlerinde farklı malzeme türlerinde boru tipleri kullanılmaktadır. Bu boru tipleri; asbestli çimento, font, çelik, CTP (Cam elyaf Takviyeli Polyester) ve beton olarak en sık kullanılmaktadır. Kullanılan boru tiplerine göre pürüzlülük değerleri esas alınarak hesaplamalar yapılmaktadır.

Farklı boru malzemelerinin pürüzlülük katsayıları Tablo 1’de verilmiştir (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Atıksu, 2017).

Tablo 1. Malzeme cinsine bağlı Pürüzlülük, Manning ve Kutter katsayıları

Malzeme	Pürüzlülük (<i>k</i>, mm)	Manning katsayısı (<i>n</i>)	Kutter katsayısı (<i>m</i>)
Asbestli çimento	0,025	0,011	0,12
Beton	0,3 – 3	0,013	0,20-0,35
Font	0,26	0,012	0,13
CTP	0,0015	0,009	0,12
Çelik	0,045	0,012	0,13

Boyuna eğim

Eğimleri belirlemek için hız kriterleri ve zemin eğimi dikkate alınmalıdır. Kanalların eğimleri şu şekilde olabilir (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Atıksu, 2017):

- Bağlantı kanalları ($\phi 300$), 1:300 ile 1:15 arasında,
- Tali kanallar ($\phi 350 - \phi 600$), 1:500 ile 1:25 arasında,
- Ana kanallar ($\phi 650 - \phi 1000$), 1:1000 ile 1:50 arasında,
- Ana kollektörler ($> \phi 1000$), 1:3000 ile 1:75 arasındadır.

Hızlar

Yağmursuyu kanallarında minimum akım hızı 0,75 – 0,90 m/s ve maksimum akım hızı 4 m/s, Atıksu kanallarında minimum

hız 0,50 – 0,60 m/s ve maksimum hız 3,0 m/s alınabilir (Şekerdağ, 2017).

Atıksu kanallarında katı maddelerin çökmesini engellemek için hız 0,5 m/s'nin altına düşmemelidir. Ayrıca hız 3,5 m/s'yi geçmemelidir (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Atıksu, 2017). Yağmursuyu kanallarında çökelmeleri engellemek için hız 0,5 m/s'nin altına düşmemelidir. Ayrıca hız 5 m/s'yi geçmemelidir (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Yağmursuyu, 2017).

Doluluk oranı

Atıksu kanallarındaki doluluk oranı %40- %60 alınır. Kanallara yeraltı suyu sızmiyorsa ve binalardan yağmursuyu gelmiyorsa bu oran %80 alınabilir. Eğer sızma ayrıca hesaplanıyorsa ve atıksu debisine ilave ediliyorsa bu takdirde de doluluk oranı %80 alınır. Ancak İSKİ yönetmeliğinde $h/D = 0,90$ alınmaktadır (Şekerdağ, 2017).

Yük kayıpları ve yerel kayıplar

Borularda sürtünmeden dolayı meydana gelen yük kayıplarını belirlemede yaygın olarak Darcy-Weisbach ifadesi kullanılmaktadır. Bu ifade,

$$h_s = \lambda \frac{L V^2}{D 2g}$$

şeklinde olup burada L: boru boyu, D: boru çapı, V: borudaki akımın ortalama hızı, g: yerçekimi ivmesidir ve sürtünme katsayısı λ rölatif boru pürüzlülüğüne ve Reynolds sayısına bağlı olarak belirlenir (Ardıçlıoğlu ve Haktanır, 2005). Burada, sürtünme katsayısı (λ) Moody diyagramı yardımı ile bulunmaktadır. Burada yerel kayıplar boru sistemlerindeki hız yüksekliğinin belirlenen kayıp katsayısı ile çarpımı olarak hesap yapılmaktadır.

$$h_y = K \frac{V^2}{2g}$$

Hazne çıkışlarında $K=0.5$, girişinde ise genellikle $K=1$ olarak alınır (Ardıçlıoğlu ve Haktanır, 2005).

Atıksu kanallarının hidrolöği

Kanalların hidrolik hesabında ayrıık ve birleşik sistem durumlarına göre farklı hareket edilir. Ayrıık sistem için yağmur suyu kanalı kısmen dolu olarak (yani serbest yüzeyli akım), birleşik sistem için ise yağışlı zamanlarda kanal tam dolu aktığı duruma göre hesaplanır ve kurak hava (atıksu) debisine göre hız ve derinli kontrolleri yapılır (Şekerdağ, 2017).

Kanaldan geöen debi, süreklilik denkleminde,

$$Q = v \cdot A$$

Formülü ile hesaplanır. Burada,

A : Islak kesit alanı

V : Akım hızı

Q : Kanaldan geöen debi

Kanaldaki akım hızı öok yaygın olarak Kutter formülünden bulunur. Kutter formülü chezy denkleminde C katsayısı yerine Kutter katsayısı yazılarak elde edilmiştir.

$$v = C\sqrt{R^j}$$

$$C = \frac{100\sqrt{R}}{m + \sqrt{R}}$$

İller Bankasına ait kanalizasyon sistemleri hesap esasları şu şekildedir (Kasap, 2016); nüfus verileri esas alınarak belirlenen atık suların, sisteme dâhil oluşlarındaki tekerrür sürelerine ve miktarının zirve yaptığı anlık dilimlere göre sisteme gelecek maksimum ve minimum debileri hesaplanarak proje debisi tayin edilir.

Atıksu sistemlerinin tasarımında daha öok, kanallarda üniform ve kararlı, türbölanslı akım olduğu kabul edilir. Kanallarda

üniform ve kararlı, türbülanslı akım Colebrook-White, Manning veya Kutter denklemleri ile hesaplanabilir. Sürtünme kayıpları, borudaki sürtünme yük kayıplarını hesaplamak için mutlak boru cidar pürüzlülüğü (k), Manning katsayısı (n) veya Kutter katsayısı (m) kullanılır (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Atıksu, 2017).

Manning denklemi;

Dairesel kesitli ve dairesel kesitli olmayan akımlar için tam dolu veya kısmi dolu olmasına bakılmaksızın, akış hızı Manning denklemi kullanılarak şu formülle hesaplanır:

$$V = \frac{1}{n} R_H^{\frac{2}{3}} J_E^{\frac{1}{2}}$$

Burada,

n : Manning katsayısı

R_H : hidrolik yarıçap (m)

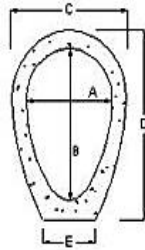
J_E : piyezometre çizgisinin eğimi (hidrolik gradyen)

İller Bankası Yönetmeliği mecralarda suyun azami (h/d= %60) doluluk oranında akıtılmasını uygun görmektedir. Ancak yeraltı suyunun bulunmadığı yerlerde, kanala yeraltı suyunun giremeyeceği ve evlerden kanala yağmur sularının gelmeyeceği bilinen bölgelerde %80 doluluk oranına kadar su akıtılabilmektedir (Samsunlu, 1986).

Yumurta kesitli atıksu boru üretim firmaları

Yumurta kesitli boru üretimi seri olarak Türkiye’de ve yurtdışında yapılmaktadır. Ülkemizde Erciyas Steel Pipe Company tarafından imal edilen ve Clover Pipelines tarafından tasarım ve projelendirmede kullanılan farklı boyutlarda yumurta kesitli boru üretilmektedir. İngiltere’de CPM (URL-1) part of Marshalls firması tarafından, Budaplast (URL-2) , Channeline (URL-3), Amitech, Simona (URL-4) gibi birçok firmalar tarafından üretim yapılmakta

ve kullanılmaktadır. Firmalardan alınan genel bilgiler ve kesitler şu şekildedir (Şekil 2, Şekil 3, Şekil 4);

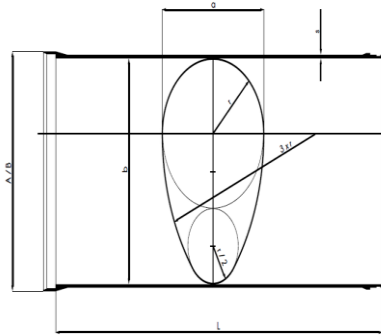


(a)

(b)

Şekil 2. Yumurta kesit firma bilgileri (a) CPM firması, (b) Budaplast firması

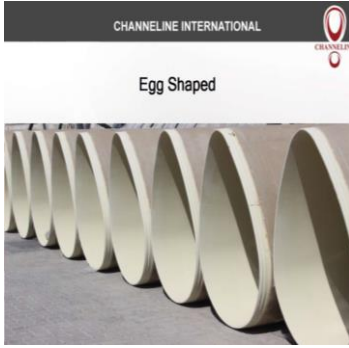
Standard sizes of egg-shaped pipes				
Nominal size (mm)	Pipe details		Socket details	
	a/b	Radius (mm)	Max. pipe length (mm)	Overall size (mm)
240/360	120	4800	290	410
300/450	150	4800	362	512
400/600	200	4800	480	680
500/750	250	4800	545	830
508/762	254	6000	548	842
600/900	300	4600	548	980
680/1020	340	6000	770	1110
700/1050	350	4600	790	1140
800/1200	400	3000	900	1300
900/1350	450	2300	1025	1475
1000/1500	500	2300	1135	1635
1200/1800	600	2300	1355	1955



(a)

(b)

Şekil 3. Budaplast firması yumurta kesit özellikleri (a) Boyutlar, (b) Kesit şekli



Product range

SIMONA® PE Ovoid Pipes, standard (in mm)

Standard profile DIN 4263 b/h	Outside diameter b _o /h _o	Wall thickness e	Inside diameter b _i /h _i	Annular space Δk
500/750	458/692	17	423/657	58
	466/700	21	423/657	50
	487/721	31	423/657	29
600/900	558/841	17	523/806	58
	567/850	21	523/806	50
	577/860	27	523/806	40
700/1.050	657/990	19	618/951	59
	667/1.000	24	618/951	50
	679/1.012	30	618/951	38
800/1.200	724/1.125	22	698/1.081	74
	753/1.136	27	698/1.081	63
	767/1.150	34	698/1.081	50
900/1.350	854/1.288	24	805/1.239	62
	867/1.300	30	805/1.239	50
	882/1.315	38	805/1.239	35

Pipes with 1,000 / 1,500 mm standard profile on request. Outside and inside diameter are approximate sizes; deviations possible.

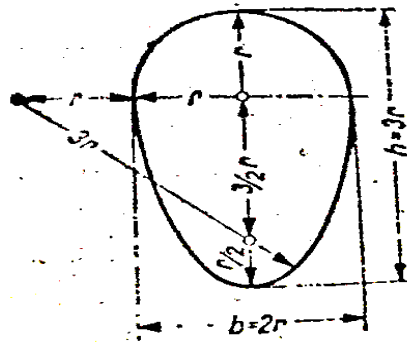
(c)

(d)

Şekil 4. Yumurta kesit firmaları (c) Channeline firması, (d) Simona firması

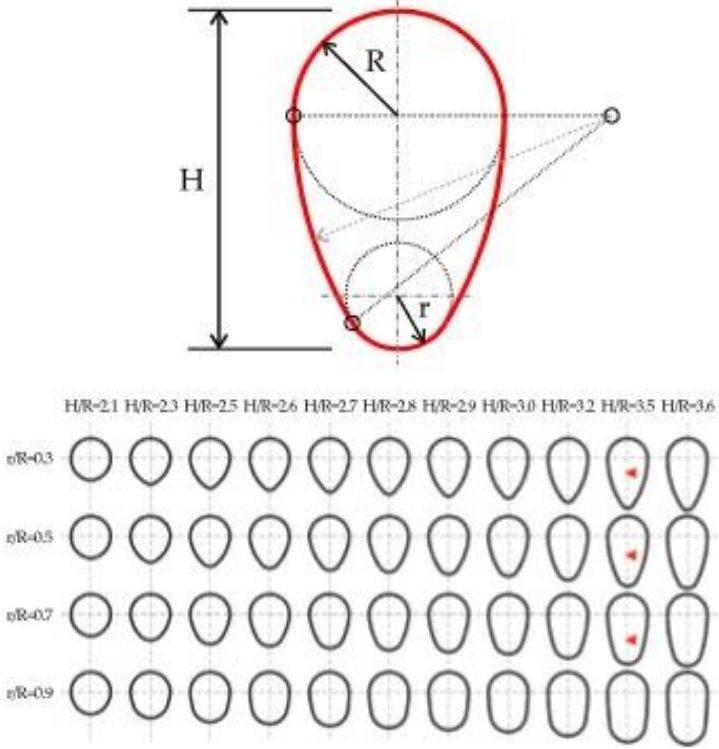
Yumurta kesitli atıksu sistemleri

Yumurta kesitli kanallar (Şekil 5) daha düşük su yüksekliklerinde başka tip kanallara göre daha büyük debiler geçirebilmektedirler. Bu sebeple kendi kendini yıkama özelliği vardır. Buna bağlı olarak tabanda yığıntı tehlikesi azdır. Bu tip profiller diğerlerine nazaran daha yüksek olduğundan daha büyük ihtiyaç vardır. Bu nedenle inşaatları pahalıya mal olur. Bilhassa zemin sularının yüksek olduğu yerlerde inşaatları zordur (Erdemgil & ark., 1976).



Şekil 5. Yumurta kesit görünümü

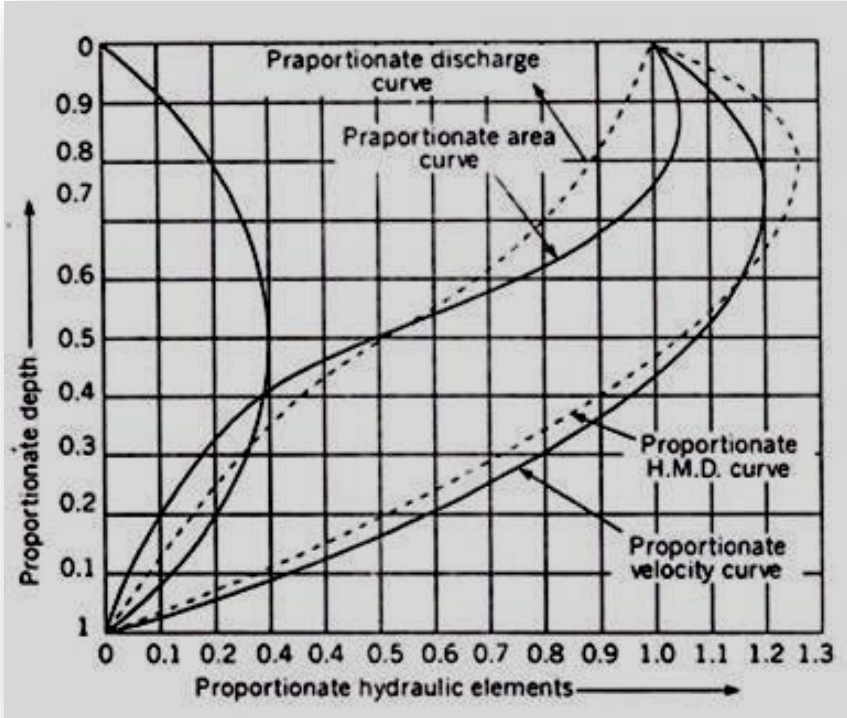
Yumurta kesitli borular farklı kesit boyutlarında olabilmektedir. Bu boyutlandırma en iyi performansı verecek boru kesitinin seçilmesi gerekmektedir. Farklı yükseklik (H) ve iç çaplarıdaki (r, R) oransal değişiklikler ile en uygun yumurta kesit bulunabilmektedir (Şekil 6) (Picallo & ark. 2016).



Şekil 6. Yumurta Kesitli Boru ve Çeşitlendirmesi

Yumurta şekilli borular, borunun tabanının şeklinden dolayı düşük hacimlerde daha yüksek hızlara sahiptir ve bu nedenle daha iyi kendi kendini temizleme özelliğine sahip olabilir. Bazı durumlarda bu iyileştirilmiş performans, boruların daha sığ eğimlerde döşenmesine izin verebilir ve standart dairesel kesitli borulara kıyasla borunun artan maliyetlerini dengeleyebilir.

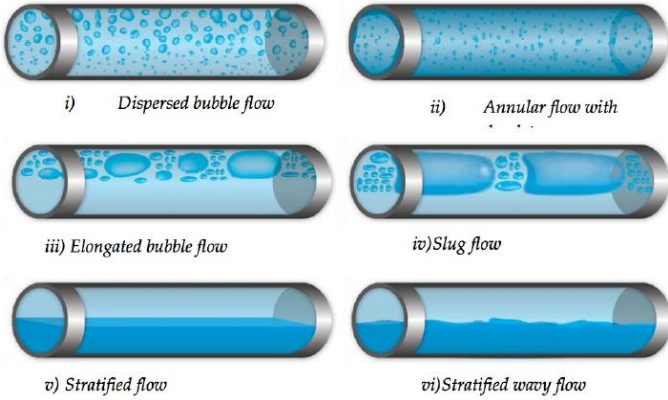
Yumurta şekilli boruların tipik hidrolik performansını gösteren bir diyagram (Şekil 7) aşağıda gösterilmiştir (URL-5);



Şekil 7. Yumurta Kesitli Boru Hidrolik Elemanları

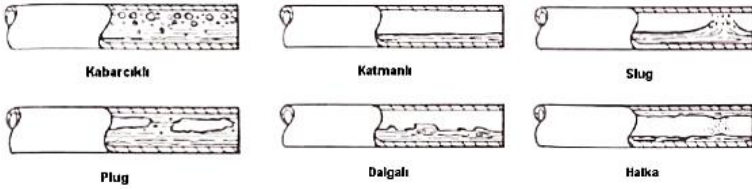
Çok fazlı atıksu akış özellikleri

Yatay borularda çok fazlı akışta yerçekimin etkisi oldukça fazladır. Bu sebeple akış kesitte simetrik olmayan bir hal alır. Yoğunluğun etkisi ile de tabanda çökelmeler meydana gelir, çökme göstermeyen maddeler ise askı haline geçer. Sıvı faz içerisinde de bir takım partiküller yer almaktadır. Bu akışlara ait farklı akış rejimleri Şekil 8' de (Bakker, 2016; Zhang, 2012) verilmiştir.

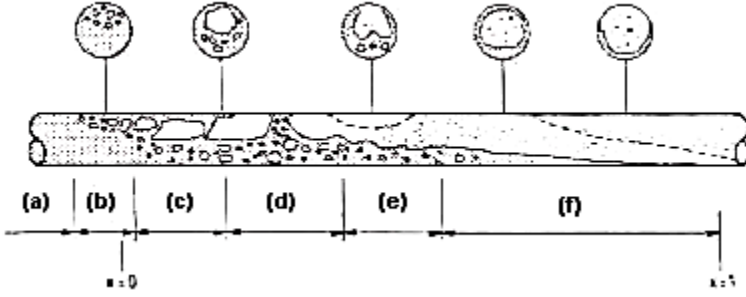


Şekil 8. 2 fazlı akış için farklı akış rejimleri

Çok fazlı akışlarda, kabarcıklı akış düşük gaz kütleli akışlarında oluşur ve kabarcıklar sıvı fazı içinde rijit partiküller şeklinde sürüklenirler. Daha büyük çaplı kabarcıkların birbiri içinde çökmesi ile çapı yaklaşık olarak boru çapına eşit kabarcıklar oluşur ve bu akış tipi slug tip akış olarak adlandırılır. Daha yüksek gaz kütleli akışlarında slug akışta gözlenen büyük kabarcıkların kopması ile plug akış tipi gözlenir. Çok yüksek gaz hızlarında ise halka akış oluşur. (Şekil 9 ve Şekil 10) (Başyazıcı, 2007).



Şekil 9. Yatay borularda akış rejimleri (Collier&Thome, 1996)



Şekil 10. Yatay boru içinde kaynamada akış rejimleri, (a) Tek Faz Sıvı, (b) Kabarcıklı Akış, (c) Plug Akışı, (d) Slug Akışı, (d) Dalgalı Akış, (f) Halka Akış (Collier&Thome, 1996)

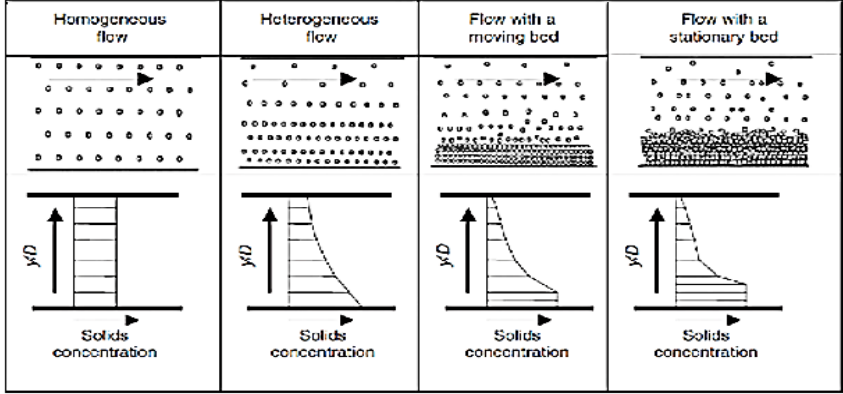
Çok fazlı akış: kimyasal ve fiziksel özellikleri farklı akışkan ya da katı haldeki partiküllerin birbirine karışmadan bir sistem içinde akışını ifade etmektedir. Farklı fazlara ait akışlar şu şekildedir (Şekil 11);

Tek fazlı akış; su ve benzeri homojen akış, sıvı akışı (homojen akış)

İki fazlı akış; su-gaz, su- katı, su-yağ, su-askı yüklü sıvı (heterojen akış)

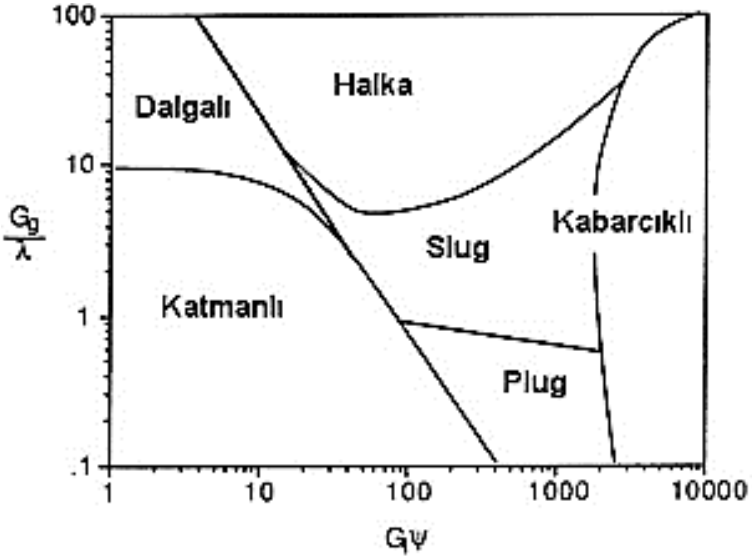
Üç fazlı akış; gaz-su-katı, gaz-yağ-katı, gaz-su-kum (heterojen akış)

Tabakalı akış (stratified flow); su-kum, gaz-su



Şekil 11. Yatay çamurlu akışta akış rejimi sınıflandırması (Polansky, 2014)

Akış rejimleri konusundaki çalışmalar Baker tarafından bağlatılmış olup, Baker (1954) yaptığı deneylerde yatay borularda su ve hava kullanarak Şekil 12’de görülen akış haritasını oluşturmuştur.



Şekil 12. Yatay boru içinde akış (Baker, 1954; Collier 1996)

Bu akış haritasına göre yatay boru hattındaki akış rejimleri belirlenerek hidrolik hesaplamalar yapılmaktadır. Atıksu boru hatlarındaki akışın iyi tespit edilebilmesi ve bu doğrultuda problemi yansıtacak doğru hesaplamaların yapılabilmesi gerekmektedir.

Kararsız (değişken) akım

Kararsız akımlar, hızın zamana bağlı olarak değişim gösterdiği akım şeklidir. Değişken akım iki tür olabilir: değişken üniform akım, değişken üniform olmayan akım (Kırkgöz, 2009).

Değişken üniform akım: Hızın sadece zamana bağlı olarak değiştiği akımlardır:

$$V=V(t)$$

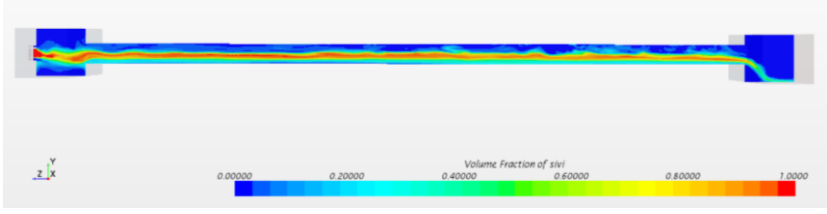
Değişken üniform olmayan akım: Hızın yere ve zamana bağlı olarak değiştiği akımlardır.

$$V= v(x,y,z,t)$$

Tartışma ve Sonuç

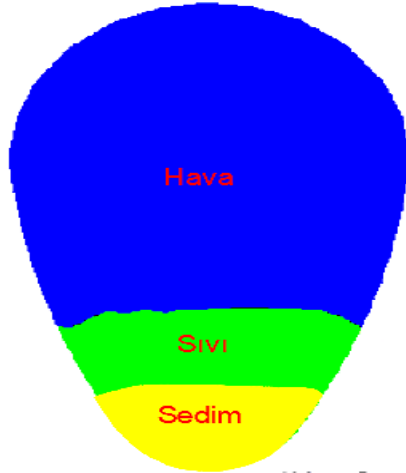
Atıksu boru hatlarına gelen akışlar zamanla değişen ve farklı hızlara sahip kararsız akımlardır. Bu akımların belirlenmesi ve hesaplanması analitik olarak çok mümkün değil ve oldukça zordur. Bu sebeple Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) programları kararsız akımların hidrolik hesaplamalarda kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Atıksu sistemlerine ortalama hız değerlerinin girilerek hesaplamalar yapılması günümüzde kullanılmakta olup, bu akımların zamana bağlı değişiklikleri göz önüne alındığında daha gerçekçi yaklaşımlar olduğu kaçınılmazdır.

Yumurta kesitli atıksu boru sistemlerinin çok fazlı akış koşullarında (Şekil 13) kabul edilmesi durumunda bu doğrultuda hesaplamaların yapılması çok daha doğru sonuçlar sağlayacaktır.



Şekil 13. Çok fazlı akışa ait yumurta kesitli atıksu boru hattı akış boykesiti

Bu fazlar tabanda katı madde birikimi dolayısıyla sediment, sıvı ve hava olmak üzere sınıflandırılabilir. Her bir fazın birbiri ile etkileşiminin incelenmesi ve fazlar arası akışın belirlenmesi önemlidir. Tabanda biriken sedimentten kaynaklı kesit daralması ve boru içindeki hızlarda sürtünme etkisi ile hız değerlerinde azalma görülür. Bu sebeple özellikle yumurta kesitin taban şekli dolayısıyla hız artışı yüksek olduğu için tabandaki katı madde birikimi daha az olacağından daha uzun ömürlü bir kullanım sağlanmaktadır. Şekil 14'te çok fazlı yumurta kesite ait bir atıksu boru hattı enkesiti yer almaktadır. Temsili olarak tabanda sedim, ortada sıvı ve üstte hava hacimleri gösterilmiştir.



Şekil 14. Yumurta kesitte 3 faz akış görünümü

Yumurta kesitli boru hatlarının kullanımının yaygınlaştırılması atıksu boru hatlarının ekonomik ömürlerini uzatarak, daha optimum seviyelerde akış koşullarının karşılanmasını da sağlayacaktır. Bu sebeple üretimden uygulamaya kadar her aşamasında ülkemizde yaygınlaştırılması amaçlanmaktadır.

KAYNAKÇA

Ardıçlıoğlu M., Haktanır T., (2005). *Kentsel Su İhtiyacının Karşılanmasında Çoklu Hazne Problemlerinin Çözümüne Nümerik Bir Yaklaşım*, TMMOB İnşaat Mühendisler Odası, 4. Kentsel Altyapı Ulusal Sempozyumu, 15-16 Aralık, Eskişehir.

Baker, W.D. (1954). *Making Movies: A Challenge to Superior Students*, Journal of Communication, 4(1), 23-26.

Bakker, M.V. (2016). *Stability analysis for two-phase pipe flow*, Delft University of Technology, Departman of Aerospace Engineering, 69 s (Yüksek lisans tezi).

Başyazıcı, İ.U. (2007). *İki fazlı akışlara sayısal yöntemlerin uygulanması*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, 117 s. (Yüksek lisans tezi).

Collier, J.G., Thome J.R. (1996). *Convective Boiling and Condensation Third Edition*, Oxford University Pres Inc, New York, 640 s.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2017). *Atıksu Toplama ve Uzaklaştırma Sistemleri Hakkında Yönetmelik*, EK-1: Kanalizasyon Sistemlerinin Etüt, Planlama ve Projelendirilmesine İlişkin Teknik Esaslar, 52 s.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2017). *Yağmursuyu Toplama, Depolama ve Deşarj Sistemleri Hakkında Yönetmelik*, EK: Yağmursuyu kanalizasyon sistemlerinin etüt planlama ve projelendirilmesine ilişkin usul ve esaslar, 71 s.

Erdemgil, N., Sırma, M., Yavuz, M. (1976). *Su Getirme ve Kanalizasyon*, Birsen Kitabevi Yayınları, İstanbul, 343 s.

Kasap, A. (2016). *Kanalizasyon ve İçme Suyu İnşaatlarında Kullanılan Boru Tiplerine Göre Maliyet Analizi*, İller Bankası Anonim Şirketi, Uzmanlık Tezi.

Kırkgöz, S. (2009). *Akışkanlar Mekaniği*, Kare Yayınları, İstanbul, 373 s.

Muslu, M. (2005). *Çözümlü Problemlerle Su Temini ve Çevre Sağlığı*, İstanbul: Su Vakfı Yayınları.

Öztürk, İ.(2017). *Atıksu Mühendisliği, Stilnet Basım*, İSKİ Teknik Kitaplar serisi, İstanbul, 583s.

Polansky, J. (2014). *Experimental investigation of Slurry flow*, University of Leeds, 17 s.

Picallo R.M., Naves J., Anta J., Puertas J., Suárez J. (2016). *Experimental and Numerical Analysis of Egg-Shaped Sewer Pipes Flow Performance*, MDPI, 8, 587.

Samsunlu, A. (1986). *Su Getirme ve Kanalizasyon Yapıtlarının projelendirilmesi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, MM/ÇEV-86, EY, 97. İzmir.

Şekerdağ, N. (2017). *Su Getirme ve Kanalizasyon Problemleri*, Nobel yayıncılık, Ankara, 291s.

URL-1 (2023): CPM, <https://www.cpm-group.com/products/drainage/concrete-pipes/ovoid-pipes/>, (Erişim tarihi: 26.11.2023).

URL-2, (2023): Budaplast, http://www.budaplast.hu/valasztek_en.html, (Erişim tarihi: 26.11.2023).

URL-3, (2023): Channeline, https://channeline-international.com/images/pdf/Channeline_Broc_hure_2020.pdf, (Erişim tarihi: 26.11.2023).

URL-4, (2023): Simona, <https://www.simona.de/?id=206&L=1&productType=Sewer+pipe>, (Erişim tarihi: 26.11.2023).

URL-5, (2023): Design of Egg-Shaped Sewers (With Diagram) Sanitary Engineering, <https://www.engineeringenotes.com/sanitary-engineering/design->

of-egg-shaped-sewers-with-diagram-sanitary-engineering/17043#,
(Erişim tarihi: 20.11.2023).

Zhang, W. (2012). *Modeling Total Suspended Solids in Combined Sewer Systems*, Southern Illinois University Carbondale, Department of Civil and Environmental Engineering, 57 s. (Yüksek lisans tezi).

BÖLÜM V

Türkiye'nin Enerji ve Ulaşım Altyapısının Sürdürülebilirliği ve Çevresel Etkileri: Şehirleşme, Enerji ve Emisyonlar Üzerine Bir İnceleme

**Emine ÇORUH¹
Abdulkaki BİLGİÇ²**

Giriş

Türkiye, coğrafi konumu gereği bulunduğu bölgede etkili bir rol oynamaktadır. 1961 yılında Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Teşkilatı'nın (Organisation for Economic Co-operation and Development/OECD), 1974 yılında Uluslararası Enerji Ajansı'nın (International Energy Agency/IEA), 1992 yılında Karadeniz Ekonomik İşbirliği Örgütü'nün (KEİÖ) üyesi olmuştur aynı zamanda G20 olarak anılan ülkeler topluluğunun önemli bir

¹Dr. Öğr. Üyesi, Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

²Prof. Dr., Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fak., Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü

ortağıdır. Dünya Bankası hızlı, artan istihdam ve gelir göstergeleri nedeniyle Türkiye'yi üst orta gelirli bir ülke olarak tanımlamaktadır. Kişi başına gayri safi yurtiçi hasılası (GSYİH) 2001 yılında 13.235 ABD dolarından (\$) 2018 yılında 24.811 \$'a çıkarak neredeyse iki katına ulaşmıştır. 2018 yılında GSYİH (902 milyar \$) ile dünyanın en büyük 19'uncu ekonomisine sahip ülke olmuştur (World Bank, 2019). Türkiye sahip olduğu coğrafi avantajı nedeniyle, bir dizi büyük üreticinin (Orta Doğu ve Orta Asya) ve tüketicinin (Avrupa) kesiştiği noktada yer alan bölgesel bir enerji ticaret merkezi olmayı hedeflemektedir. Yakın zamanda Trans Anadolu Doğal Gaz Boru Hattı (TANAP) ve TürkAkım olarak adlandırılan iki büyük boru hattı projesi başlatılmıştır. TürkAkım üzerinden gaz akışı, 2020 yılında başlatılmıştır. TANAP ise 2021 yılının başlarında Trans Adriyatik Boru Hattı'nın (TAP) devreye girmesiyle Avrupalı müşterilere gaz taşımaya başlamıştır (IEA, 2021).

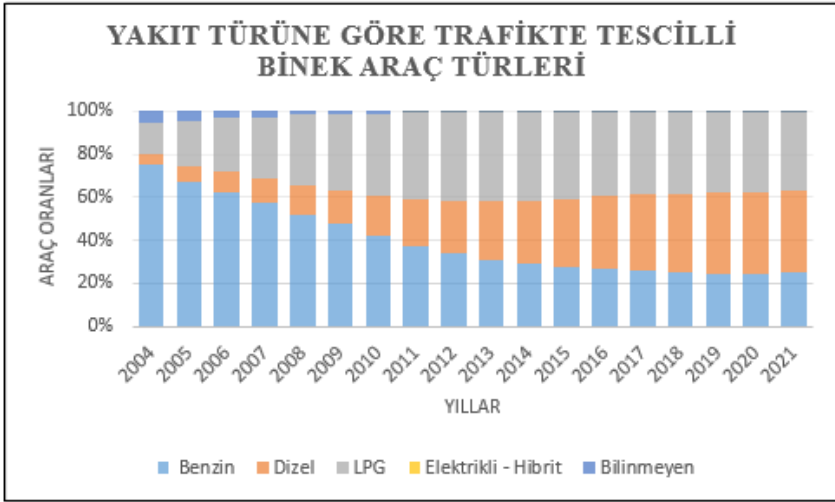
Kentsel alanlar, ekonomik ve kültürel faaliyetlerin merkezleridir ve şehirlerin sunduğu fırsatlardan yararlanmak isteyen insanları çekmeye devam etmektedir. Birleşmiş Milletler (BM) tarafından üretilen tahminlere göre, dünyanın kentsel nüfusunun 2050 yılına kadar üç katına çıkacağı ve yeryüzündeki toplam 9 milyar insanın 6 milyarının şehirlerde yaşayacağı ifade edilmiştir (Lake & Hanson, 2000). Günümüzde küresel nüfusun, % 55'i kentsel alanlarda yaşarken, 2050 yılına kadar yaklaşık % 70'lik nüfusun kentlerde olması beklenmektedir (Navigant, 2020). Türkiye'de nüfusun büyük bir çoğunluğu il ve ilçe merkezlerinde yaşamaktadır ve 81 ilden 22'sinin nüfusunun şimdiden 1 milyondan fazla olduğu bilinmektedir (Enerji Arz Güvenliği ve Verimliliği, 2018). 2050 yılına kadar, toplam küresel GSYİH'nin % 84'ü kentsel alanlarda üretilecektir (IEA, 2016). 2000 yılında dünya çapında nüfusu bir milyondan fazla olan 371 şehir varken, 2018 yılında 548 şehir olmuş ve 2030 yılında bu sayının 706'ya ulaşacağı tahmin edilmektedir (United Nations, 2018). 2020 yılı itibarıyla Türkiye'nin nüfusu 84.339.067 kişi olmuş ve 63.803.445 kişi şehirlerde yaşayarak, şehirleşme oranı %75,7'lere çıkmıştır (Worldometer, 2020). BM tahminlerine göre, Türkiye'nin nüfusu 2030 yılında da

88 milyona ulaşacaktır. 2034 yılında ise Türkiye'nin toplam nüfusunun 90 milyonu aşması beklenmektedir (Pişkin, 2017). Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tahminlerine göre ise nüfusun 2050 yılında 100-110 milyon arasında olacağı tahmin edilmektedir. Ülkenin şimdiden dört şehri, dünyanın en çok trafik sıklığı olan 100 şehri arasında yer almakta ve ülkemizden İstanbul dünya trafik sıklığı sıralamasında altıncı sırada yer almaktadır (TomTom, 2018).

1.Türkiye’de Ulaşım

Türkiye, ulaşım altyapısına yönelik harcamalarını önemli ölçüde arttırmıştır. Otoyolların uzunluğu, 2005-2016 yılları arasında 1667 km’den 2542 km’ye çıkmıştır (OECD, 2019). 2017 ile 2023 yılları arasında demiryollarına yapılan yatırımında iki katına çıkması beklenmektedir. Ülke, 2014-2023 yılları arasında demiryollarını kullanan yolcuların oranını %1’den %10’a, yük taşımacılığı oranının ise %4,4’ten %15’e çıkarmayı amaçlamaktadır (Garanti and PwC, 2017). Aynı zamanda demiryolunun, yük taşımacılığındaki payını 2023 yılında %15’e, 2035 yılında %20’ye, yolcu taşımacılığında ise 2023 yılında %10’a ve 2035 yılında %15’e çıkarmak istemektedir (OECD, 2019). Yurt içinde yolcu taşımacılığının karayollarındaki payını, 2023 yılına kadar şimdiki oranın %72’sine düşürülmesi hedeflenmektedir. 2016 yılında altyapı yatırımlarının payı demiryollarında %15, karayollarında %65 ve havalimanlarında %20 olmuştur (ITF, 2018). Ülke bu gelişmelerle OECD ülkeleri arasında enerji ihtiyacı en çok artış gösteren ülke olmuştur (OECD, 2019). Türkiye’nin enerjide dışa bağımlılığı bir önceki yıla göre yaklaşık %1,6 artarak %75,7 seviyelerinde gerçekleşmiştir (TPAO, 2019). World Energy Outlook tahminlerine göre ulaşım talebi 2030 yılına kadar artışını sürdürerek %45 büyüme gerçekleştirecektir (Prospects, 2008; Trends, 2010). Kişi başına düşen karayolu taşıt sayısı, diğer OECD ülkelerine oranla düşük olsa da 2005 ve 2016 yılları arasında % 72’lik bir oranla hızlı bir artış göstermiştir (OECD, 2018). Ülkede 2021 Şubat ayı itibariyle trafiğe kayıtlı otomobil sayısı 13.547.020’dir. Trafiğe kayıtlı araçların Şekil 1’de gösterildiği

gibi; % 25,2'si benzinli, % 37,9'u dizel, % 36,1'i LPG'li, % 0,6'sı tam elektrikli ve hibrit araçlar ve % 0,3'ü yakıt türü bilinmeyen araçlardır (TÜİK, 2021). Türkiye'de son yıllarda Sportif Çok Amaçlı Araç (Sports Utility Vehicle/SUV) segmenti araçlara ilgi artmış hafif ticari araç pazarı ve kompakt Bagaj Uzantısı Olmayan Araç (Hatchback/HB) segmenti küçülmüştür. 2019 yılında satılan 387 bin otomobilin 98 bini SUV segmenti araçlardan oluşmuştur (KPMG, 2020).



Şekil 1. Yakıt Türüne Göre Trafikte Tescilli Binek Araç Oranları (2004-2021) (TÜİK, 2021)

2019 yılında toplam otomotiv yakıt tüketimi, önceki yıla göre %2,8 oranında azalarak yaklaşık 36,2 milyon m³ olarak gerçekleşmiştir. Akaryakıt sektörünün oluşturduğu toplam parasal büyüklük 2019 yılında 2018 yılına göre %6,5 artmış ve 223 milyar TL'ye ulaşmıştır. Tüketim verileri üzerinden yapılan hesaplamalara göre, petrol sektöründen sağlanan dolaylı vergiler 2019 yılında 95,4 milyar TL olarak gerçekleşmiştir. Bu toplamın 61,9 milyar TL'sini Özel Tüketim Vergisi (ÖTV), 33,5 milyar TL'sini ise Katma Değer Vergisi (KDV) oluşturmuştur. Motorlu taşıtların, Avrupa Birliğinde (AB) vergi katkıları ise yaklaşık 413 milyar Euro (€) tutarındadır

(Eurostat, 2019). 2011 yılından itibaren ülke ekonomisinin de üzerinde bir büyüme gerçekleştiren akaryakıt piyasası 2018 yılından sonra 2019 yılında yine daralmıştır (Petder, 2019). Ancak Türkiye’de hala 1000 kişiye düşen otomobil sayısı, AB ülkeleri arasında en düşük paya sahiptir. Bu, sektörün potansiyelini göstermektedir (Petder, 2019).

AB üyesi 27 ülkenin toplam petrol talebi 2019 yılında bir önceki yıla kıyasla sabit kalarak 639.9 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. 2008 yılı rakamlarına göre dünya genelinde 14,6 milyon araç LPG’li olup, son 5 yılda küresel otagaz tüketiminde %21’lik bir artış olmuştur. Otagaz tüketiminde Kore, Türkiye, Polonya ve Japonya dünyanın ilk dört ülkesi haline gelmiştir (WLPGA, 2010). Avrupa’da ise 7 milyon binek taşıt LPG kullanmaktadır (Raslavičius & ark., 2014). Dünya motorin (dizel) arzında Türkiye 15’inci sırada (1000 Mt), benzin arzında 45’inci sırada ve LPG arzında ise 14’üncü sırada bulunmaktadır (Petder, 2019). Ülkede karbondioksit (CO₂) salınımının yüksek olmasında karayolu taşımacılığının ve eskiyen araç filosunun egemen olması ana nedenlerdendir (Mock, 2016). Trafiğe kayıtlı araçların ortalama yaşı, 2017 yılında AB ortalamasından yüksek (13,2) olmuştur (ACEA, 2018a). Binek araçlar ve hafif ticari araçlar, Türkiye’deki araç filosunun dörtte üçünü oluşturmaktadır (Mock, 2016). Ağır araçlar Türkiye’deki pazarın yalnızca yaklaşık onda birini oluştururken yakıt tüketiminin ve CO₂ emisyonlarının yarısından fazlasından da sorumludur (Mock, 2016). Ticari araç, kamyonet ve motosikletlerin sayısı nispeten az olup 2004 yılında toplam filonun %2,5’ini oluştururken bu oran 2017 yılında %2,6’ya yükselmiştir (Tüik, 2018a). AB binek araç filosu son beş yılda %5,7 büyümüş; yoldaki araç sayısı 243 milyondan 257 milyona çıkmıştır (ACEA, 2018b). AB genelinde 6,3 milyon kamyon (Polonya, AB’deki en büyük kamyon filosuna sahiptir ve onu Almanya ve İtalya izlemektedir), 31,5 milyon kamyonet (Fransa en büyük minibüs filosuna sahipken, onu İspanya, İngiltere ve İtalya izlemektedir), 745.000 otobüs dolaşımdadır. Dizel motorlu hafif ticari araçlar, Yunanistan hariç tüm AB ülkelerinde baskındır, AB kamyonet

filosunun neredeyse %90'ı ve kamyon filosunun %96,1'i dizel ile çalışmaktadır (ACEA, 2018b).

Türkiye, dünyanın en büyük araç üreten (150'den fazla ülkeye ihracat yapan) ülkelerinden biridir. AB ülkeleri içinde ise Türkiye, otomobil üretiminde 7'inci sıradaki yerini korumaktadır (Petder, 2019). 2018 yılı itibariyle Türkiye, otomotiv üretiminde dünyada 14'üncü sırada yer almaktadır (Başbuğ & Evlimoglu, 2020). Avrupa'da ticari araç üretiminde ise ilk sırada yer almaktadır (Pişkin, 2017). 2019 yılında Türkiye'de 982.642 otomobil üretilmiş ve 872.972 otomobil ise ihraç edilmiştir. İhracatın üretime oranı %84,36'dır. Aynı yıl ihraç fazlası üretilen araç sayısı 153.670 iken otomobil sayısı 104.859 artmıştır (Şenbil & Şenbil, 2020). Ekonomisinin otomotiv endüstrisine olan bağımlılığı göz önüne alındığında, bu sektörün yenilikçi araçlar sunarak hava kirliliği, iklim değişikliği ve enerji güvenliği gibi mevcut ve gelecekteki zorlukları karşılamaya hazır ve küresel pazarda rekabet edebilecek olmasını sağlamak oldukça önemlidir (Mock, 2016).

2.Enerji Güvenliği

Küresel binek araç filosu 2013 yılında yaklaşık 900 milyon araca ulaşmış ve günde 20 milyon varilden fazla ham petrol tüketilmiştir (Bauer & ark., 2015). Asya Pasifik Enerji Araştırma Merkezi'ne (Asia Pacific Energy Research Center/APERC) göre ulaşım sektöründeki enerji talebi, yaşam standartlarındaki ve araç sahipliğindeki artış nedeniyle 2030 yılına kadar en yüksek seviyelere ulaşacaktır (Ong & ark., 2012). Dünya nüfusu 2016 yılında yaklaşık 7,4 milyara ve araç sahipliliği 1 milyardan fazla binek otomobile ulaşmış durumdadır (World Bank, 2016). Küresel araç filosunun 2035 yılında yaklaşık 2 milyar araca çıkması beklenmektedir (IEA, 2012). IEA, 2018 ve 2025 yılları arası dönemde, petrol tüketiminin 6,6 milyon v/g artacağını ve 2018 ve 2024 yılları arası döneminde petrol talebinin küresel düzeyde 106,4 milyon v/g seviyesine yükseleceğini öngörmektedir (TPAO, 2020). 2019 yılında, Türkiye'de günlük ortalama 60 bin v/g ham petrol üretimi yapılmış; buna karşılık yaklaşık 684 bin v/g ham petrol tüketilmiş; 624 bin v/g

ham petrol ithalatı, 273 bin v/g ise işlenmiş ürün ithalatı gerçekleştirilmiştir (TPAO, 2019). 2018 yılında, yerli ham petrol üretiminin, ham petrol tüketimine oranı %11,9, 2019 yılında ise %8,8 olmuştur. Diğer bir ifadeyle, 2019 yılında ülkenin petrolde ithalata bağımlılığı bir önceki yıla göre artarak %91,2 oranında olmuştur (TPAO, 2020). Fosil yakıtlar dünyada tüketilen birincil enerjinin yaklaşık %80'ini sağlamaktadır ve bu enerjinin %58'ini tek başına ulaşım sektörü tüketmektedir (Salvi & ark., 2013). Türkiye'nin enerji sistemi, 2019 yılında toplam birincil enerji arzının (Total Primary Energy Supply, TPES) %83'ünü ve 2018 yılında toplam nihai tüketimin (Total Final Consumption, TFC) %73'ünü oluşturan büyük bir fosil yakıt payı ile karakterize edilmektedir (IEA, 2021). Türkiye'deki enerji arzı, hızla büyüyen ekonomisinin ihtiyaçlarını karşılamak için istikrarlı bir şekilde artmaktadır. 2000 ve 2019 yılları arasında TPES, 2018 yılındaki ekonomik yavaşlamaya bağlı olarak yakın zamanda yaşanan düşüşe rağmen %92 oranında büyümüştür (IEA, 2021) 2008 yılından 2018 yılına kadar ulaşımda enerji tüketimi ise %86 artmıştır. 2018 yılında, fosil yakıtlar Türkiye'deki TPES'in %86'sını oluşturmuştur ve bu rakamlarla ülke, IEA üyesi ülkeler arasında dokuzuncu sırada yer almıştır. Yerli petrol üretimi ancak toplam talebin yalnızca %7'sini karşılayabilmektedir (IEA, 2021) dolayısı ile %91-93'lük kısmı ithalatla karşılanmaktadır. Yerli ham petrol üretimi, 2017 yılında 2,5 milyon tondan (Mt) 2018 yılında 2,8 milyona çıkarak yaklaşık %12 artmıştır. Türkiye'de birincil enerji talebinin 2023 yılında ise, 218 milyon ton eşdeğer petrole (tep) ulaşması beklenmektedir (2016 yılındaki toplam tüketimin iki katından fazla) (OECD, 2019).

Türkiye'nin enerji talebinin çoğu tüm sektörlerde fosil yakıtlarla karşılanmaktadır. 2018 yılında petrol, ulaşım sektöründe TFC'in %97'si ile hâkim olmuştur. Dizel yakıt, IEA üye ülkeler arasındaki en yüksek paylardan biri olan toplam ulaşım enerjisi kullanımının %72'sini oluşturmuştur. Sıvılaştırılmış petrol gazları olan LPG, IEA üye ülkeleri arasında en yüksek payı alarak toplam ulaşım talebinin %13'ünü oluşturmuştur. Benzin ise ulaşım enerji tüketiminin yalnızca %8'ini oluşturmuştur ve IEA üye ülkeleri

arasındaki en düşük paya sahip olmuştur (Coruh & ark., 2022). Türkiye’de 2005-2018 yılları arasında dizel araçların payı, %6,8’den %37’ye yükselmiştir. Dizel araçların verimli yakıt özelliği ile daha fazla sürüş kilometresi sunması ve benzin fiyatlarının vergi nedeni ile daha pahalı olması, talebi tüm ülkede Şekil 2’de görüldüğü üzere dizel araçlara yöneltmiştir (Coruh & ark., 2022) dünyada da benzer bir eğilim dizelden (1971 yılında %5’den 2007 yılında %19’a yükselerek) yana kendini hissettirmiştir (Dahl, 2012). Daha az emisyon üreten LPG’li araçların payı ise 2008 yılında %17’den 2016 yılında %22’ye yükselmiştir (EAFO, 2018). Dizelin karayolu taşımacılığı ile katkı sağladığı nihai enerji tüketimindeki payı, 2005 yılında %56 iken 2015 yılında %69 olmuştur (ITF, 2018). Aynı yıllarda OECD bölgesinde ise bu oranlar, sırasıyla %34 ve %37 şeklinde gerçekleşmiştir (Oil, 2021). 2000 yılında Türkiye’de 9,7 milyon m³ olan dizel yakıt tüketimi 2014 yılında 21,2 milyon m³e yükselmiştir. Bu durum, Türkiye’deki yakıt tüketim dinamiklerinin ekonomik büyümeyle birlikte önemli ölçüde değişmiş olabileceğini düşündürmektedir (Coruh & ark., 2022; Hasanov, 2015).

Ulaştırma sektörü, dünyada hareketi sağlarken aynı zamanda emisyonları da düşürmenin en verimli ve etkili yolunu bulmak için büyük uğraşlar vermektedir (Umar & ark., 2021). Gelecek 20 yıl içinde ulaştırma sektörünün küresel enerjiye olan talebi artıracak ve yönlendirecek öncü güç olması beklenmektedir (Umar & ark., 2021). Ancak mevcut konjonktür ile yapılan tahminlere göre küresel petrol talebinin 2019 ile 2025 yılları arasında 3,5 mb/gün artacağı tahmin edilmektedir. Paris Antlaşmasının (PA) iklim hedefleri ve diğer sürdürülebilir enerji hedefleri ile petrol talebinin aynı dönemde 3 mb/gün azalması gerekmektedir (Oil, 2021). 2050 yılına kadar küresel olarak net sıfır emisyonu giden yol, daha da keskin bir düşüş gerektirecektir. 2026 da talebin 13,1 mb/gün artışa ulaşması beklenmektedir. 2026 yılında dünya petrol talebi, 2019 yılı seviyelerinin sadece 4,4 mb/gün üzerinde olacaktır. Bu artışın tamamının OECD dışı ülkelerden (Çin, Hindistan ve diğer Asya ülkelerinden) geleceği tahmin edilmektedir. Yakın gelecekte OECD

ülkelerindeki petrol talebinin de güçlü bir şekilde toparlanması beklenmektedir.

Son 10 yılda Türkiye, enerji tüketiminde, hem ekonomik gelişmeye, hem de nüfustaki artışla birlikte hızlı bir büyüme yaşamıştır. 1990 ile 2015 yılları arasında nüfus %45 oranında büyümüştür. Bu, enerji tüketimi üzerinde yukarı doğru güçlü bir baskı uygulamaktadır (Enerji Arz Güvenliği ve Verimliliği, 2018). Türkiye, dünya enerji tüketiminin % 1'inden biraz fazlasına sahip bir ülkedir. OECD ülkeleri enerji tüketiminin %2,5'ine sahip olmakla birlikte OECD ülkeleri arasında enerji talebi en hızlı artan, enerji piyasası en hızlı büyüyen ülke Türkiye olmuştur. Türkiye'nin AB ile enerji işbirliğine, enerji güvenliği risk parametreleri çerçevesinden bakılmalıdır. Türkiye'nin enerji güvenliği 1980'de olduğundan yaklaşık %20 daha kötü durumdadır. Bunun en büyük sebebi ise artan enerji ithalat bağımlılığı, enerji yoğunluğunun azaltılması konusunda yavaş ilerleme ve CO₂ emisyonlarının sürdürülemez artışıdır. Nüfusun %40'dan fazlası enerji açısından yoksul ve %50'den fazlası evlerini ısıtmak için hala yakacak odun ve katı yakıtlara bağımlıdır. Bu da Türkiye'yi en kötü hava kirliliği seviyesine sahip OECD ülkelerinden biri yapmaktadır. Türkiye'nin puanı, OECD ortalamasından %22 daha fazladır (TEPAV, 2016). 2005-2015 yılları arası dönemde, dünya enerji talebi yılda ortalama %1,8 oranında artarken ve OECD enerji talebi yılda ortalama %0,3 oranında azalmış fakat Türkiye'nin enerji talebi yılda ortalama %4,4 artmıştır (TEPAV, 2016). IEA ulaştırma sektöründeki tüketimin, dünya genelindeki enerji kullanımının %19'una tekabül ettiğini açıklamıştır. Ulaşımında ana enerji kaynağı petrol olsa da, dizel ve benzin tüketimi, petrol maliyetleri, petrol arz güvenliği konusundaki şüpheler ve sera gazı (SG) emisyonları nedeniyle bu kaynak gelecek için sorunlu kabul edilmektedir (Van Vliet & ark., 2011; De Almeida & Silva, 2009; Mitchell, 2006). Ayrıca, petrolün yerini alacak büyüklükte bir enerji kaynağı olacak, hazırda yedeklerin bulunmaması ulaşımı en korunmasız sektörlerden biri yapmaktadır (Hirsch & ark., 2005).

2.1.Pandemi Döneminde Enerji ve Ulaşım

Pandemi dönemi, II. Dünya Savaşından sonra yaşanan en kötü küresel ekonomik gerilemeye neden olmuştur. Pandemiden kaynaklanan hızlı davranış değişiklikleri (evden çalışma, eğlence alışveriş kısıtları vb.) 2020 yılında kendini her alanda olduğu gibi ulaşım ve enerji alanında da hissettirmiştir. Petrol tüketiminin hızlıca pandemi öncesine dönmesi beklenmemekle beraber 2026 yılına kadar küresel petrol tüketiminin 104,1 mb/gün'e ulaşması öngörülmektedir. Türkiye de pandemi; 5 Mayıs 2020 yılından 1 Temmuz 2020 yılına kadar İzmir'de işletilen bir rafinerinin geçici olarak kapatılmasına neden olmuştur (Güngör & ark., 2021). Ayrıca birçok akaryakıt istasyonu özellikle şehirlerarası istasyonlarda (il dışı seyahatlerin kısıtlanması nedeniyle) satışlarının yaklaşık %30'unu kaybetmiştir. Akaryakıt vergileri 2002-2019 yılları arasında Türkiye'de toplam vergi gelirlerinin %10-18'ini oluşturmuştur. Pandemi nedeniyle meydana gelen %30'luk daralma devlet gelirlerini de önemli ölçüde azaltmıştır. Dolayısı ile politika yapımcıların gelecekte benzer şokların olumsuz etkilerini azaltmak için acil eylem planlarına ihtiyacı olduğu açıktır (Güngör & ark., 2021). Pandemi önlemleri esnasında alınan kararlar sonucu evden çalışan insan sayısı büyük bir artış meydana gelmiştir. Bu da, ulaşım da yakıt tüketiminin (benzin ve dizel) 2020 yılında, 800 kb/gün' den fazla düşmesine neden olmuştur. Bu düşüş karayolu taşımacılığı yakıt talebindeki toplam azalışın yaklaşık beşte birini oluşturmuştur. Pandemi sonrası yine de bazı şirket ve çalışanların uzaktan çalışmanın avantajını devam ettireceği düşünülmektedir. Bu şekilde çalışmanın ilerleyen yıllarda günde 250 kb/gün'lük petrol talebinin yerini alacağı tahmin edilmektedir. Kişisel otomobillerde tüketilen dizel, özellikle Avrupa'da hükümetlerin uyguladığı kısıtlara paralel olarak düşerken, yük taşımacılığına yönelik güçlü talep karşısında dirençli kalmıştır (Oil, 2021). Avrupa benzin talebinin 2019 ile 2026 yılları arasında 570 kb/gün azalacağı tahmin edilmektedir. 2026 yılında, Avrupa petrol talebi 2019 yılına göre 140 kb/gün, Kuzey Amerika 670 kb/gün ve Asya'da 270 kb/gün daha düşük olacaktır (Oil, 2021). Asya talebi 110 kb/gün ve Kuzey

Amerika talebi ise 190 kb/gün azalacaktır. OECD dışı benzin talebinin ise güçlü bir büyüme kaydetmeye devam edeceği beklenmektedir. OECD dışı Asya'da benzin talebi 2019 yılından 2026 yılına kadar 830 kb/gün artacaktır (özellikle Çin ve Hindistan'ın desteği ile). Benzin talebinin yine OECD dışı diğer ekonomilerde örneğin, Latin Amerika'da 120 kb/gün ve Afrika-Orta Doğu'da 290 kb/gün artması beklenmektedir (Oil, 2021). Pandemi önlemleri sonucu OECD talebi, 2020 yılında 5,6 mb/gün olmuştur (Oil, 2021). Yakıt verimliliğinin hızlanması ve elektrikli araçlar gibi yenilikçi teknolojiler ile önümüzdeki birkaç yıl içinde ulaştırma sektöründe petrol talebinin her yıl ortalama 850-900 kb/gün düşmesi beklenmektedir (Oil, 2021). Afrika, Orta Doğu ve Güney Amerika'daki talep, pandemiden daha fazla etkilenmelerine rağmen, artmaya devam edecektir. OECD'nin talebinin ise 2023 yılından itibaren durgunlaşacağı hatta son yıllara doğru düşüş bile gösterebileceği tahmin edilmektedir (Oil, 2021). 2022-2023 yıllarına kadar küresel olarak petrol talebinde güçlü bir toparlanmanın ardından, petrol talebindeki artış bölgelere göre farklılık gösterecektir. Yüksek gelirli ekonomilerde petrol talebi durgunlaşırken gelişmekte olan ekonomilerde güçlü talep büyümesinin devam edeceği beklenmektedir (Oil, 2021).

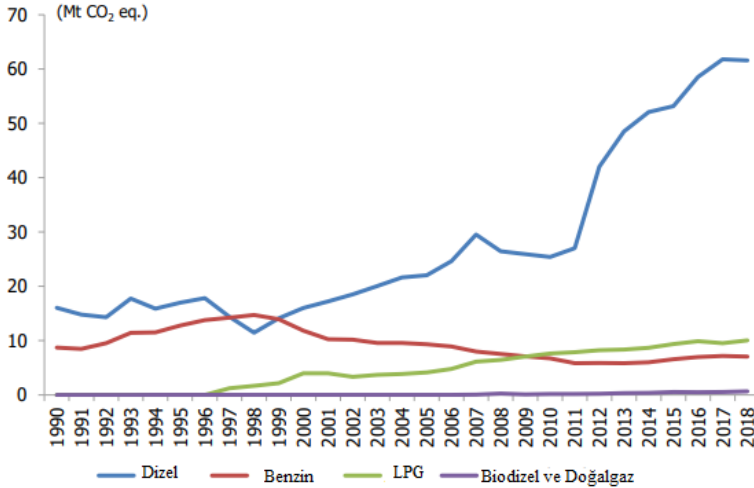
3.Vergiler, Emisyonlar ve Sera Gazı (SG)

Küresel nüfusun %91'inden fazlası Dünya Sağlık Örgütü'nün (DSÖ) belirlediği sınırların ötesinde hava kirliliğine maruz kalarak yaşamaktadır (Navigant, 2020). Türkiye'de nüfusun ince partiküler maddelere maruziyet düzeyi, AB ve OECD ortalamaları ile DSÖ'nün kılavuz değerlerinden yüksektir (OECD,2018a). Fosil yakıtların neden olduğu CO₂ salınımının %23'ünün ulaştırmadan kaynaklandığını ve bu oranın 2030 yılına kadar %50, 2050 yılına kadar %80 oranında artış göstereceğinin beklendiği açıklanmıştır (IEA, 2009, 2019).

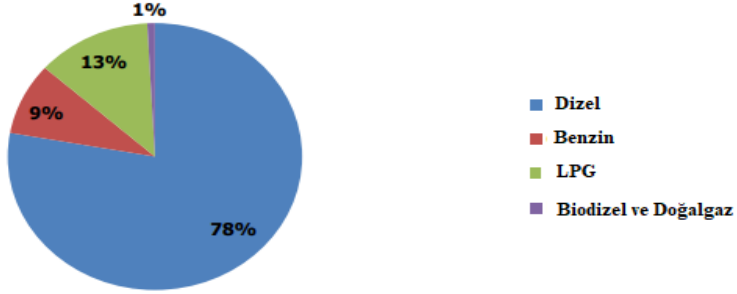
Türkiye'de akaryakıt fiyatları arasındaki fark, akaryakıtlara uygulanan vergi oranlarından kaynaklanmaktadır (Hasanov, 2015). 2012 yılında Türkiye'nin net geliri 323,2 milyar TL olmuştur ve bu

rakamın %15,7'si doğrudan akaryakıtlar (benzin, dizel ve LPG) üzerinden alınan KDV ve ÖTV'den gelmiştir (Erdogdu, 2014). OECD ülkelerinde çevre ile ilgili vergilerden elde edilen gelirlerin toplam vergi gelirleri içindeki payı ise sadece %6-7 oranındayken (Erdogdu, 2014; OECD/EEA, 2013) Türkiye'de 2012 yılında toplam vergi gelirlerinin %12,8'i tek başına ÖTV'den oluşmuştur. Aynı yıl KDV'den elde edilen toplam gelirlerin %47,5'ini akaryakıtlar, ÖTV'den elde edilen toplam gelirlerin ise %49,6'sını yine akaryakıtlardan elde edilen ÖTV'den oluşturmuştur (Petder, 2012; TGNA, 2012). 2018 yılında bir litre benzin için ödenen 6,2 TL'nin %51'i vergiden oluşmaktadır. Aynı yıl bir litre motorin almak için ödenen 5,7 TL içerisindeki verginin oranı %43 iken bir litre LPG'deki verginin oranı ise %37'di olmuştur. Bu durum ülkede akaryakıt ürünlerinden en çok benzinden en az ise LPG'den vergi alındığını göstermektedir (Çalışkan & Yavuz, 2019; Erdogdu, 2014). Türkiye, OECD ülkeleri arasında en yüksek benzin, dizel ve LPG fiyatlarına sahip ülkedir (IEA, 2013). Türkiye'de akaryakıt ürünlerinden sağlanan toplam dolaylı vergilerde en büyük paya motorinden (dizel) sağlanan dolaylı vergiler sahiptir. Buna, motorinin artan tüketiminin yanı sıra düşük vergi oranı nedeniyle benzin tüketiminin LPG'ye kayması neden olmuştur (Petder, 2019). Dizel tüketimi 2017 yılına kadar düzenli artmış, 2018 ve 2019 yıllarında düşüş göstermiştir. 2019 yılında toplam dizel tüketimi 2018 yılına göre %4,4 azalarak 27,10 milyon m³ olarak gerçekleşmiştir (Petder, 2019). Benzin tüketimi son yıllarda bir artış sergilemektedir. 2019 yılında toplam benzin tüketimi 2018 yılına göre %3,0 oranında artarak yaklaşık 3,2 milyon m³ düzeyinde olmuştur (Petder, 2019). 2018 yılında 5,9 milyon m³ olan LPG tüketimi, 2019 yılında %2,2 oranında artarak 6,0 milyon m³ olarak gerçekleşmiştir (Petder, 2019). Türkiye'de karayollarında kullanılan 30.565.439 ton yakıtın %77,8'i (23.777.421 ton) dizel, %13,3'ü (4.080.359 ton) LPG ve %8,9'u (2.707.659 ton) benzin olarak tüketilmiştir (EUM, 2020). Karayolu taşımacılığında 1997 yılına kadar sadece dizel ve benzin kullanılırken 1997 yılında LPG kullanımı başlamış ve tüketim hızla artmıştır. Dizel tüketimi ve

LPG tüketimi bu süreçte artarken, benzin tüketimi giderek azalmıştır (TGHGI 1990-2018, 2020). 2007 yılından 2010 yılına kadar, muhtemelen küresel ekonomik kriz nedeniyle dizel tüketimi azalmıştır (Hasanov, 2015). Ancak daha sonra motorin (dizel) yakıt tüketiminde dikkat çekici bir artış olmuştur. Detaylı olarak incelendiğinde tarım sektöründe kullanılan motorin verilerinin 2011 yılından bu yana karayolu taşımacılığında kullanılanlardan ayrılmadığı tespit edilmiştir. Bu nedenle 2011-2018 yılları arasında motorinden (dizel) kaynaklanan sera gazı emisyonlarında büyük bir artış olmuştur (%128'lik bir artış) (TGHGI 1990-2018, 2020). Türkiye'de hava kirliliği için dizel araçların payı, 2008 yılında %39 iken 2017 yılında % 50'ye çıkmıştır (TSI, 2018b). 1999 yılında, kişi başına düşen toplam emisyonların %49'u dizel, %43,5'i benzin ve %7,5'i LPG'den meydana gelmiştir. Benzin fiyatlarının daha fazla olması, 2011 yılında benzinin toplam emisyonlar içindeki payını %13,8'e geriletmiştir. Dizel kaynaklı emisyonlar % 68 ve LPG ise %18,2' ye yükselmiştir (Erdogdu, 2014). 1990 ve 2018 yılları arasında akaryakıt türlerinden kaynaklanan emisyon dağılımları Şekil 2'de ve 2018 yılına özel Şekil 3'te verilmiştir.



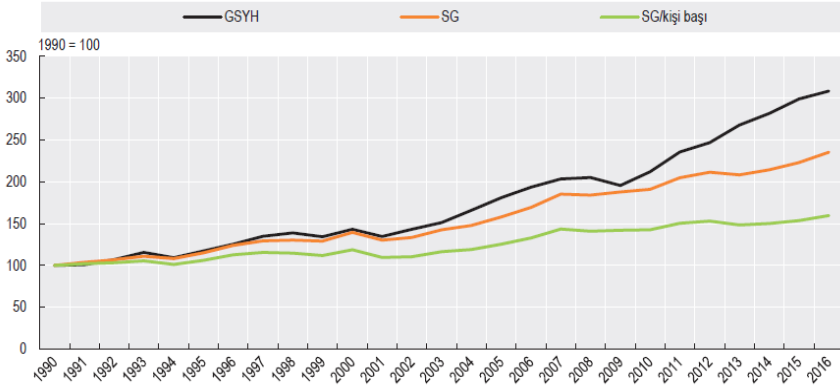
Şekil 2. Karayolu taşımacılığında yakıt türlerine göre emisyon dağılımları (1990-2018)



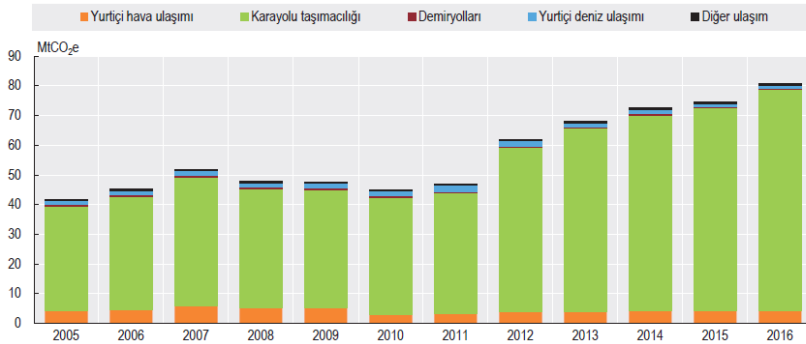
Şekil 3. Yakıt türlerine göre 2018 yılı emisyon dağılımları

Ulaşımında fosil yakıt kullanımı, ABD’de her yıl yaklaşık 2 milyar metrik ton CO₂’nin atmosfere salınmasına neden olmaktadır (Gillingham & ark., 2015). ABD toplam sera gazı (GHG) emisyonunun yaklaşık üçte biri doğrudan ulaşım sektöründen gelmektedir (Gillingham & ark., 2015). Motorlu araçlarda meydana gelen toplam gaz emisyonunun %83,7’si CO₂’dir (Hannan & ark., 2017). Dünyada ulaştırma sektöründen kaynaklanan sera gazı salınımı 1990-2003 yılları arasında 1.412 milyon ton (%31) artış göstermiştir. OECD ülkelerinde bu dönemdeki artış ise 820 milyon ton (%26) değerine ulaşmıştır. CO₂ emisyonu dünyada 1990 yılında 22,7 milyar tondan 2013 yılında 35,27 milyar tona artmıştır (Oliver & ark., 2014). OECD ülkelerinde ulaştırmadan kaynaklanan CO₂ emisyonları, tüm dünyada ulaştırmadan kaynaklanan CO₂ emisyonlarının %71’ini oluşturmaktadır (Hedef 2023, 2019). Avrupa ülkelerinde sera gazı CO₂ salınımının %28’i ulaşımdan; bunun ise %84’ü ise tek başına karayolu taşımacılığından gelmektedir. (Hedef 2019, 2023). Avrupa şehirlerinde kara yolu taşımacılığının partikül salınımının %30’unu OECD ülkelerinde ise %50’sini oluşturduğu tahmin edilmektedir. Türkiye’de 2018 yılında ulaşım, toplam sera gazı emisyonlarının %16,2’si olan 84,5 MtCO₂ eşdeğeri olarak katkıda bulunmuştur. Türkiye’deki ulaştırma emisyonlarının başlıca kaynağı (%93,4’lük oran ile) karayolu taşımacılığı olmuştur (TGHGI 1990-2018, 2020). Taşımacılık sektöründen kaynaklanan emisyonlar 2018 yılında 1990 yılına göre %213 (84,5 Mt CO₂ eşdeğer) artmıştır. Aynı dönemde karayolu

taşımacılığı emisyonlarındaki artış ise %218,5 olmuştur (TFBR, 2019). Ülkede sera gazı emisyonları, son on yıl içerisinde önemli ölçüde artış göstermiş (Şekil 4) ve 2005 yılından bugüne %49, 1990 yılından ise bugüne %135 artış göstererek Şekil 5'te verildiği üzere 2016 yılında 800 MtCO₂e seviyesine ulaşmıştır (OECD, 2019). Ortalama olarak emisyonlar yılda %7,6'dan fazla artmıştır (TFBR, 2019).



Şekil 4. Türkiye’de sera gazı emisyonlarının (1990-2016) değişimi (OECD, 2019)



Şekil 5. Karma taşımacılığın neden olduğu SG emisyonları (TÜİK, 2017; OECD, 2019).

Çeşitli uluslararası kurum ve kuruluşların (IEA, BP, ExxonMobil vb.) yaptıkları projeksiyonlara göre, petrol ve doğal

gazın birincil enerji tüketimi içindeki paylarını uzun dönemde de koruyacakları açıklanmıştır (TPAO, 2019, 2020). EIA (2016)'ya göre, ulaştırma sektörü emisyonlara en yüksek katkı oranına sahip sektörlerden biridir ve dünya çapında endişe verici atan bir eğilime sahiptir. Hızlı büyüyen ekonomileri ile Çin, Hindistan, Brezilya, Rusya, Endonezya, Meksika ve Türkiye'den oluşan E7 ülkelerinin son yıllardaki yüksek CO₂ emisyonu oranları dikkat çekmektedir. Dünyanın ana üretim merkezleri haline gelmeye başlayan E7 ülkeleri, bu hızlı büyümelerinin sonucunda G7 (Almanya, ABD, İngiltere, Fransa, İtalya, Japonya, Kanada) ülkelerinden 1,5 kat daha fazla toplam karbon emisyonu üretmiştir (PwC, 2017).

4.Araştırma Sonuçları ve Politikalar

Yakıt talebi fiyatı esnek değilse, yakıt üzerindeki artan vergilerin, tüketim ve dolayısıyla ilgili sera gazı emisyonları üzerinde çok az etkisi olacaktır. Bu durumda hükümetler bütçe gelirlerini artırmak için akaryakıtta aşırı vergiler koymaya istekli olabilir (Hasanov, 2015). Yakıtların fiyat esnekliği bilgisi, çeşitli yakıt türleri için en uygun vergi oranlarının belirlenmesi için gereklidir (Hasanov, 2015). Benzin vergileri ve yakıt ekonomisi standartları gibi politikalarındaki değişikliklerin etkileri, tüketicinin politika tarafından oluşturulan nispi fiyatlardaki değişikliklere karşı duyarlılığına bağlıdır (Gillingham & ark., 2015). Ramsey (1927), vergilerin sosyal refah üzerindeki bozucu etkilerini azaltmak için hükümetlerin daha az esnek talebe sahip mallara daha yüksek vergi oranları uygulaması gerektiğini göstermiştir. Türkiye'de akaryakıt talebinin hiç esnek olmadığı dolayısı ile vergi öncesi fiyatlardan veya vergilerdeki artıştan kaynaklanan fiyat artışlarına yanıt vermediği görülmüştür. Bu nedenle Türkiye'deki akaryakıt piyasası, firmalar (aşırı kârlar yoluyla) ve devlet (aşırı vergiler yoluyla) tarafından fırsatçı davranışlara karşı oldukça savunmasızdır (Erdogdu, 2015).

Gelecekteki petrol arzının güvenliği ve fiyat istikrarının belirsizliği ayrıca karayolu taşımacılığının çevresel etkileri ve fosil kaynaklara olan bağımlılığını azaltmak için gelişmiş araç ve yakıt

teknolojileri giderek daha da önemli hale gelmektedir (Bauer & ark., 2015). Yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan araç teknolojilerine geçiş ulaştırma sektörünün, küresel iklim ve yerel hava kalitesi üzerindeki etkisini azaltmak için çok önemli olabilir (Larsson & ark., 2015). Kentleşme politikalarının, ekonomik büyümeyi kolaylaştıran konut, eğitim, sağlık, ulaşım, altyapı vb. sektörleri teşvik edecek şekilde yeniden değerlendirilmesi gerekmektedir (Bakirtas & Akpolat, 2018). Türkiye ulaşımında baskın şekilde fosil enerji kaynaklarına bağımlıdır ve yenilenebilir veya düşük karbonlu enerjiye geçiş yeni kaynaklar ve güçlü politikalar gerektirecektir. Hızla değişen ekonomik koşullarda günümüz dünyasında politika yapımcıların son trendleri ve güncel bilgileri dikkate alarak karar vermeleri ve politika üretmeleri gerekmektedir (Yalta & Yalta, 2016).

10'uncu Kalkınma Planı'nın (2014-18) merkezinde sürdürülebilirlik yer alırken, 11'inci Plan Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerini temel almıştır. 10'uncu Plan kapsamında (SBB, 2013) toplu taşımanın, küçük motor hacimli, elektrikli ve hibrit araç kullanımının yaygınlaştırılması, akıllı bisiklet şebekeleri kurulması ve yaya yolları oluşturulması benimsenmiş ayrıca kamuda düşük yakıt tüketimi olan taşıt kullanımının yaygınlaştırılmasına karar verilmiştir. 11'inci Kalkınma Planı'nda kentlerdeki trafik problemlerinin (sıkışıklık, kazalar ve hava kirliliği gibi) azaltılması amacıyla kentiçi ulaşımında arz yönlü politikalardan ziyade talep yönlü politikaların uygulanması teşvik edilecek ve özel araç yerine toplu taşıma sistemlerinin kullanımının özendirilmesi kararı açıklanmıştır (SBB, 2019). 11'inci Planda (SBB, 2019) ayrıca toplu ulaşım ve yaya ulaşımının sağlanması konusu üzerinde durularak köprü, tünel gibi altyapıların ücretlerinin dinamik fiyatlandırılması, park-et-bin ve tercihli yollar gibi uygulamaların hayata geçirilmesi ve daha çevreci ulaşım modları ile her kent de kentiçi ulaşımında motorsuz ulaşım türleri özendirilmesinin teşvik edileceği açıklanmıştır. Enerji tüketimi daha az olan ulaşım türlerinin desteklenmesi, özellikle yaya ve bisikletle ulaşım olanaklarının

iyileştirilmesi konusunda özenle durulacağı açıklanmıştır (Hedef 2023, 2019).

Hedef 2023 Türkiye Ulaşım ve İletişim Stratejisi'nde (Hedef 2023, 2019) otoparkların kent merkezinin dışına alınarak, “park-et-bin” uygulamasını cazipleştirmesi için standartları, kapasitesi ve konforu artırılmış toplu taşıma sistemleri ile bütünleştirilmenin gerçekleştirilmesi ve diğer modlar ile uyumlu (iskele ve istasyon vb.) hale getirilmesi kararlaştırılmıştır. Stratejik planda; toplu taşımada yeni enerji modellerine, elektrik enerjisi ve akaryakıtta avantajlı fiyat uygulamasına gidilmesine, yatırımların geliştirilebilmesi için belediyelere daha fazla kaynak aktarılmasına, kent içi toplu taşıma yatırımlarından kaynaklanan değer artışına bağlı vergi sistemi oluşturulmasına ve oluşacak gelirin doğrudan toplu taşıma yatırımlarına aktarılacağı açıklanmıştır. Tüm şehirlerde yaya ulaşım ağının kesintisiz bir hale getirilerek, yaya yollarının, yaya geçitlerinin ve kaldırımların standartlara ve herkese uygun hale getirilerek en ergonomik şekilde tasarlanacağı bildirilmiştir (Hedef 2019, 2023). Çevre dostu araçların geliştirilmesine özellikle kent içi trafikteki araçların yeşil ve enerji dostu hale getirilmesine, çevreye duyarlı doğalgazlı ve hibrit araçların kullanımının teşvik edileceği açıklanmıştır (Hedef 2019, 2023). Ülkeler, elektrikli araçlara geçişte öncelikli olarak elektrikli toplu taşıma araçlarına odaklanmalıdır. Elektrikli toplu taşıma araçları, bireysel kullanım araçlarından daha uzun mesafeler kat ettiği için ticari ve kamu filolarının bu teknolojiye geçişi öncelikli olarak teşvik edilmelidir. Bu strateji, karbon emisyonlarının daha etkili bir şekilde azaltılmasına katkı sağlayacaktır. Ulaşımın yakın bir gelecekte önemli değişikliklere uğraması muhtemeldir (Lowe & ark., 2020; Cornet & ark., 2019). Özellikle toplu taşıma sektörü, adaptasyon ve inovasyon konularında duyarlı olmadığı takdirde, artan risklere maruz kalacaktır.

Hava kirliliği ve iklim değişikliği, günümüzde ihmal edilemez sorunlar arasında bulunmaktadır. Dolayısıyla, Türkiye'nin yenilenebilir enerji potansiyelini artırarak, enerji tüketimindeki aşırı fosil yakıt bağımlılığını tersine çevirmeye yönelik adımlar atmış olması şartıdır. Bu amaçla “Yenilenebilir Enerji Eylem

Planında” ulaştırma sektöründe, yenilenebilir enerjinin %10’luk paya sahip olması hedeflenmiştir (TEPAV, 2016). Türkiye, aynı zamanda önümüzdeki on yıl içinde üç nükleer enerji santralının kurulmasına yönelik planlarında ilerleme kaydetmiş ve yenilenebilir enerji çalışmalarına ivme kazandırmıştır (OECD, 2019). Türkiye’nin ekonomik yapısı ve enerji verimliliği çalışmaları, genel enerji tüketimini azaltma konusundaki başarısını belirleyecektir. Ülkenin son on yılda yenilenebilir enerjide kat ettiği mesafe istenirse ulaştırma için hem fosil yakıtların azaltımında hem de karbon ayak izi çalışmalarında önemli bir motivasyon gücü olabilir (IEA, 2021). Ulaşımdan kaynaklı sera gazı emisyonları, 2005 yılından bu yana %95, 1990 yılından bu yana ise %203 artmıştır. Bu da, Türkiye’nin 2016 yılındaki toplam sera gazı emisyonunun yaklaşık %16’sı demektir. Karayolu taşıt stoku, kişi başına düşen OECD ortalamasından çok daha düşüktür, ancak artması beklenmektedir. Buna rağmen, karayolu taşımacılığından kaynaklanan emisyonlara yönelik sınırlı önlemler bulunmaktadır. Türk otomotiv sektörü, çok sayıda üretim tesisi ile temiz teknolojilerin geliştirilmesinde (yerli elektrikli araç üretiminden ithal edilen yağa daha az bağımlı olmaya kadar) kilit bir rol oynamaktadır (Mock, 2016).

Hareketlilik ve enerji, dönüşümlerin eşzamanlı itici güçleridir ve her ikisi de demografik ve ekonomik büyümeyi desteklerken aynı zamanda tıkanıklığı ve kirliliği artırmadan sürdürülebilir bir adaptasyonu zorunlu kılan önemli unsurlardır. şehirler, sürdürülebilir, uygun fiyatlı, güvenli, kapsayıcı, müşteri odaklı altyapı ve hizmetlerle entegre mobilite ve enerji çözümlerine ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle, enerji ve hareketliliğin yakınsaması kritik öneme sahiptir (WEF, 2018). Enerji ve mobilite sektörlerinde gerçekteşen dönüşümler kaçınılmazdır ve neredeyse durdurulamaz olan piyasa faktörleri ile büyük çaplı trendlerin etkisi altındadır. Politika yapıcılar, yerel yönetimlerde yeniliği ve bunu mümkün kılacak yeni düşünme biçimlerini teşvik etme gücüne sahiptir. Enerji sektörü, temiz, dijitalleştirilmiş ve merkezi olmayan, ancak daha bağlantılı ve müşteri odaklı bir sistem yolunda hızlı bir dönüşüme yönelmek zorundadır. Dinamik fiyatlandırmayı

uygulamak ve ağlar için yeni roller oluşturmak, bu stratejinin etkinliğini sağlamak için düzenleyici paradigmayı yeniden tasarlamak açısından kritik öneme sahiptir (WEF, 2018).

Sürdürülebilir kalkınma ve yeşil büyüme, Türkiye'nin genel kalkınması için kritik bir öneme sahiptir (OECD, 2019). Ancak, Türkiye'nin çevre dostu ve sürdürülebilir bir ekonomi modeline geçişinde bazı zorluklarla karşılaşmaktadır. Mevcut taşıt vergileri, sera gazı emisyonlarını ve yerel hava kalitesini iyileştirme konusunda istenilen etkiyi sağlamada yetersiz kalmaktadır. Ancak, bu vergi politikaları, araç filosunu daha temiz ve enerji verimli araçlarla yenileme konusunda destekleyici bir rol oynayabilir. AB, bağlantılı ve otomatik çok modlu hareketlilik sistemleri de dâhil olmak üzere daha temiz, daha ucuz ve daha sağlıklı özel ve toplu taşıma biçimlerinin yaygınlaştırılması için harekete geçilmesi çağrısında bulunmuştur. Türkiye'nin AB'ne benzer bir taşımacılık politikasına geçişi, hem trafik problemlerine çözüm hem de belirgin bir emisyon düşüşüyle çevresel etkilerin olumlu bir şekilde azalmasını beraberinde getirecektir (OECD, 2018b).

5.Sonuç

Karayolu taşımacılığının çevresel etkileri, fosil kaynaklara bağımlılığı ve iklim değişikliği üzerindeki etkisi, ancak tüm ülkede benimsenen gelişmiş araç ve yakıt teknolojileri ile azaltılabilir. Öncelikle, sürdürülebilir ulaşım sistemlerinin geliştirilmesi amacıyla toplu taşıma teşvikleri, yeşil enerji kullanımı ve çevre dostu ulaşım modlarının stratejik bir öncelik haline getirilmesi gerekmektedir. Bu çerçevede, toplu taşıma sistemlerinin etkinliğinin artırılması, yaygınlaştırılması ve erişilebilir kılınması, enerji verimliliği sağlayan yeşil teknolojilere yönelişin teşvik edilmesi ve çevreye duyarlı ulaşım modlarının kullanımının özendirilmesine odaklanılmalıdır. Bu stratejik yaklaşım, çevresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda toplu taşıma altyapısının güçlendirilmesini amaçlamalıdır. Ayrıca, yeşil enerji kaynaklarına dayalı ulaşım sistemlerine geçişin desteklenmesi, sürdürülebilir kalkınma açısından da önemli bir adım olacaktır. Bu sayede, şehirlerdeki trafik

sıkışıklığı, hava kirliliği ve enerji tüketimi gibi sorunlar azaltılabilir, toplum sağlığına ve çevreye daha dost bir ulaşım ortamı oluşturulabilir.

Türkiye’de gerçekleştirilen çalışmalar, akaryakıt talebinin esnek olmadığına dair çarpıcı bulgulara işaret etmektedir. Akaryakıt talebinin fiyat değişimlerine karşı kısıtlı bir duyarlılık gösterdiği ve vergi artışlarının talep üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum, ülkedeki akaryakıt piyasasının, ekonomik değişikliklere ve politika müdahalelerine direnç göstermekte zorlandığını ve fırsatçı davranışlara karşı oldukça savunmasız olduğunu ortaya koymaktadır. Dolayısı ile akaryakıt talebinin esnekliğine ilişkin daha ayrıntılı analizler, ekonomik modellemeler ve vergi politikalarının gözden geçirilmesi gibi önlemler, akaryakıt piyasasının daha dengeli, sürdürülebilir ve krizlere karşı dirençli hale getirilmesine yönelik stratejilerin belirlenmesinde önemli olacaktır. Ayrıca, enerji politikalarının daha geniş bir perspektifte ele alınması ve piyasa katılımcıları arasında etkili iletişim kanallarının kurulması, akaryakıt piyasasının karşılaştığı zorluklara daha etkili çözümler bulunmasına da katkı sağlayabilir. Bu noktada, gelecekteki enerji talebinin belirlenmesi, vergi politikalarının enerji sektöründeki etkilerinin daha ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmesi ve sektördeki değişimlere adapte olma stratejilerinin geliştirilmesi, akaryakıt piyasasının sürdürülebilirlik ve direnç açısından güçlendirilmesine katkı sağlayacaktır.

Kentleşme politikalarının kapsamlı bir şekilde gözden geçirilmesi, ancak çevre dostu ve sürdürülebilir bir altyapıyı teşvik ederek ulaşım ağında sorunsuz bir yönetimi mümkün kılabilir. Sürdürülebilirlik ilkesi gereği kentleşme politikalarının sadece mevcut ihtiyaçları değil, aynı zamanda gelecek nesillerin gereksinimlerini de gözetmesi gerekmektedir. Ayrıca, kentleşme politikalarının yeşil enerji kullanımını teşvik etmesi, sürdürülebilir enerji kaynaklarına geçişi hızlandırabilir. Bu sayede, fosil yakıtların neden olduğu çevresel zararlar azaltılabilir ve kentler, enerji ihtiyaçlarını daha çevreci ve sürdürülebilir bir şekilde karşılayabilir. Bu politikalar, kentlerin enerji altyapısını güçlendirmek, enerji

verimliliğini artırmak ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak amacıyla uygulanabilir. Böylece çevre dostu ve sürdürülebilir altyapıya odaklanarak oluşturulacak kentleşme politikaları, hem enerji tüketimini azaltarak sürdürülebilir bir ulaşımı destekleyebilir hem de kentlerin karşılaştığı çevresel sorunların önüne geçebilir. Dolayısı ile doğru ve sürdürülebilir kentleşme politikalarının benimsenmesi, kentlerin ekonomik büyüme hedeflerini desteklemenin yanı sıra çevresel sürdürülebilirlik açısından da daha yeşil ve yaşanabilir bir çevre oluşturabilir.

Türkiye'nin ulaşım ve enerji sektörlerindeki politika değişiklikleri; ülkenin uzun vadeli kalkınma stratejilerini belirlemek amacıyla hazırlanan 10'uncu ve 11'inci Kalkınma Planlarında somut bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Bu planlar, sürdürülebilirlik odaklı politika hedeflerini benimseyerek, özellikle ulaşım ve enerji sektörlerinde çevresel etkileri azaltmaya yönelik önemli adımları içermektedir. 10'uncu ve 11'inci Kalkınma Planları, öncelikle toplu taşımanın teşvik edilmesi amacını gütmekte ve bu doğrultuda çeşitli önlemleri içermektedir. Toplu taşımanın yaygınlaştırılması, küçük motor hacimli, elektrikli ve hibrit araç kullanımının desteklenmesi gibi stratejiler, ulaşım sektörünün çevresel sürdürülebilirlik açısından dönüşümünü hedeflemektedir. Aynı zamanda, bu planlar kent içi ulaşım politikalarının gözden geçirilmesini öngörmekte, bu sayede kentlerdeki trafik problemlerinin azaltılmasını ve çevre dostu ulaşım modlarının yaygınlaşmasını amaçlamaktadır. Bu kapsamlı politikalar Türkiye'nin sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmak adına ulaşım ve enerji sektörlerindeki politika değişikliklerini şekillendirmekte ve fosil yakıtların çevresel etkilerini azaltma çabalarına ivme kazandırmaktadır. Ancak, bu planların amacına ulaşabilmesi için etkili bir uygulama mekanizması, izleme ve değerlendirme süreçleri gibi yönetim unsurlarının birbirleriyle uyum içinde hareket etmesi gerekmektedir. Bu sayede sürdürülebilir kalkınma stratejilerinin başarılı bir şekilde hayata geçirilme imkânı olacaktır.

Kaynaklar

ACEA, European Automobile Manufacturers Association. (2018a). Average Vehicle Age, webpage, European Automobile Manufacturers Association, <http://www.acea.be/statistics/tag/category/average-vehicle-age>. (Erişim Tarihi: 06.06.2018).

ACEA, European Automobile Manufacturers Association. (2018b). Vehicles in use, https://www.acea.be/uploads/statistic_documents/ACEA_Report_Vehicles_in_use-Europe_2018.pdf. (Erişim Tarihi: 06.06.2020).

Başbuğ, A. K., & Evlimoğlu, U. (2020). The Influence Mechanisms of Automotive Sector on Turkish Economy in Macroeconomic Manner and A Sector Analysis. *Third Sector Social Economic Review*, 55(1), 134-154.

Bakirtas, T., & Akpolat, A. G. (2018). The relationship between energy consumption, urbanization, and economic growth in new emerging-market countries. *Energy*, 147, 110-121

Bauer, C., Hofer, J., Althaus, H. J., Del Duce, A., & Simons, A. (2015). The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life cycle assessment based on a novel scenario analysis framework. *Applied energy*, 157, 871-883.

Cornet, A., Deubener, H., Dhawan, R., Moller, T., Padhi, A., Schaufuss, P., & Tschiesner, A. (2019). Race 2050: A vision for the European automotive industry |ACEA - European automobile manufacturers' association. <https://www.acea.be/news/article/race-2050-a-vision-for-the-european-automotive-industry>.

Coruh, E., Urak, F., Bilgic, A., & Yen, S.T. (2022). The role of household demographic factors in shaping transportation spending in Türkiye. *Environment, Development and Sustainability*, 24(3), 3485-3517.

Çalışkan, N., & Yavuz, H. (2019). Possible Impact of the Increase in Fuel Taxes on Automobile Users, Selected Articles on Environmental Economics and Financial Relations, 22.

Dahl, C.A. (2012). Measuring global gasoline and diesel price and income elasticities. *Energy Policy*, 41, 2-13.

De Almeida, P., & Silva, P.D. (2009). The peak of oil production—Timings and market recognition. *Energy Policy*, 37 (4), 1267-1276.

EAFO. (2018). Turkey: Summary, European Alternative Fuels Observatory, Brussels, www.eafo.eu/content/turkey.

EIA. (2016). Energy Information Administration, Transportation Sector Energy Consumption, International Energy Outlook 2016. <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/transportation.pdf>.

Enerji Arz Güvenliği ve Verimliliği. (2018). On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023), ÖZEL İhtisas Komisyonu Raporu, Ankara. https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2020/04/Enerji_Arz_Guvenligi_ve_VerimlilikOzelIhtisasKomisyonuRaporu.pdf.

Erdogdu, E. (2014). Motor fuel prices in Turkey. *Energy Policy* 69, 143–153.

EUM, Republic of Turkey Ministry of Environment and Urbanization. (2020). <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/ulastirma-tipine-gore-nihai-enerji-tuketimi-i-85796>. (Erişim Tarihi: 20.08. 2020).

Eurostat. (2019). Eurostat Freight transport statistics—Modal split. Eurostat- Statistics Explained. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Freight_transport_statistics_-_modal_split.

Garanti and PwC. (2017). Capital Projects and Infrastructure Spending in Turkey: Outlook to 2023, Garanti BBVA Group and PwC Turkey, January 2017. www.pwc.com.tr/en/

hizmetlerimiz/danismanlik/sirket-birlesme-ve-satin-almalari/yayinlar/turkiye-altyapi-yatirim-harcamalari-raporu.html.

Gillingham, K., Jenn, A., & Azevedo, I. (2015). Heterogeneity in the response to gasoline prices: Evidence from Pennsylvania and implications for the rebound effect. *Energy Economics*, S41-S52.

Güngör, B.O., Ertuğrul, H. M., & Soytaş, U. (2021). Impact of Covid-19 outbreak on Turkish gasoline consumption. *Technological Forecasting and Social Change*, 166, 120637.

Hannan , M.A., Hoque, M.M., Mohammed, A., & Ayob, A. (2017). Rewiew of energy storage systems for electric vehicle applications : Issues and challenges, *Renewable and Sustainable Energy Rewiews*, 69, 771-789.

Hasanov, M. (2015). The demand for transport fuels in Turkey. *Energy Economics*, 51, 125-134.

Hedef 2023. (2019). T.C. Ulaştırma Bakanlığı, Türkiye Ulaşım ve İletişim Stratejisi, file:///D:/Second%20Article/30%20OCAK%202019/Environment,%20Development%20and%20Sustainability/93C5Y+Turkiye_Ulasim_velletisim_Stratejisi.pdf.

Hirsch, R.L., Bezdek, R., & Wendling, R. (2005). Peaking of world oil production: impacts, mitigation, & risk management (No. DOE/NETL-IR-2005-093; NETL-TPR-2319). National Energy Technology Laboratory (NETL), Pittsburgh, PA, Morgantown, WV, and Albany, OR.

IEA., International Energy Agency. (2009). *World Energy Outlook*, Paris.

IEA, International Energy Agency. (2012). *World energy outlook 2012*; 2012, OECD/IEA.

IEA, International Energy Agency. (2013). *Energy Prices and Taxes* (Edition: 2013, Quarter 1). Paris/France. <http://dx.doi.org/10.5257/iea/ept/2013q1>.

IEA, International Energy Agency. (2019). Global Energy & CO2 Status Report. IEA Int. Energy Agency Paris Fr. <https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019>.

IEA Turkey, International Energy Agency. (2021). Energy Policy Review, International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/turkey-2021>.

ITF. (2018). Transport Statistics (database), International Transport Forum, <http://dx.doi.org/10.1787/trsprt-data-en> (Erişim Tarihi: 15.11.2017).

KPMG. (2020). Automotive Sector Overview. <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/tr/pdf/2020/02/sektorel-bakis-2020-otomotiv.pdf>

Lake, R. W., & Hanson, S. (2000). Needed: Geographic research on urban sustainability. *Urban Geography*, 21(1), 1-4.

Larsson, M., Mohseni, F., Wallmark, C., Grönkvist, S., & Alvfors, P. (2015). Energy system analysis of the implications of hydrogen fuel cell vehicles in the Swedish road transport system. *International journal of hydrogen energy*, 40(35), 11722-11729.

Lowe, C., Stanley, J., & Stanley, J. (2020). Transport industry adapting to change: An Australian case study. *Research in Transportation Economics*, 83, 100940.

Mitchell, J.V. (2006). *A New Era for Oil Prices*, Chatham House, Royal Institute of International Affairs, London, 32 pp.

Mock, P. (2016). The automotive sector in Turkey: A baseline analysis of vehicle fleet structure, fuel consumption and emissions, White Paper, International Council on Clean Transportation, Washington, DC, www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_Turkish_fleet_base_line_2016_03_18.pdf.

Navigant. (2020). How to reach the 1.5°C target in urban areas, Navigant, Energy, Germany GmbH, Albrechtstraße, Berlin, Germany. <https://files.danfoss.com/download/>

CorporateCommunication/UrbanEfficiency/Navigant-1,5-in-Urban-Areas.pdf. (Erişim Tarihi: 19.01.2021).

OECD/EEA. (2013). OECD/EEA Database on Instruments Used for Environmental Policy and Natural Resources Management. Paris, France.

OECD. (2018a), Environmental Performance Indicators, OECD Environment Statistics (database).

OECD. (2018b), Taxing Vehicles, Fuel and Road Use: What Mix for Road Transport? OECD Publishing, Paris.

OECD. (2019). evresel Performans İncelemeleri: Türkiye. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/ab/icerikler/oecd-epr-tr20190228120557.pdf>. (Erişim Tarihi: 21.11.2020).

Oil. (2021). Analysis and forecast to 2026, International Energy Agency, Market Report.

Olivier, J.G.J., Janssens-Maenhout, G., Muntean, M., & Peters, J.A.H.W. (2014). Trends in global CO2 emissions: 2014 Report, PBI. Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague.

Ong, H., Mahlia, T., & Masjuki, H. (2012). A review on energy pattern and policy for transportation sector in Malaysia. *Renew Sustain Energy Rev*, 16 (1):532e42.

Petder. (2012). PETDER Sector Report 2012. Turkish Petroleum Industry Association, Istanbul, Turkey.

Pişkin, S. (2017). Turkey automotive competitiveness and demand dynamics perspective of the Internal Market Prospects 2020. Automotive Sector Report, Industrial Development Bank of Turkey (IDBT) Economic Research.

Prospects, G.P. (2008). World energy outlook, 2008.

Ramsey, F. (1927). A Contribution to the Theory of Taxation. *Econ. J.* 37 (145), 47–61.

Raslavičius, L., Keršys, A., Mockus, S., Keršienė, N., & Starevičius, M. (2014). Liquefied petroleum gas (LPG) as a medium-term option in the transition to sustainable fuels and transport. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 513-525.

Salvi, B.L., Subramanian, K. A., & Panwar, N. L. (2013). Alternative fuels for transportation vehicles: A technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 404-419.

SBB, T.C. (2013). T.C. Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 10. Kalkınma Planı (2014-2028).

SBB, T.C. (2019). T.C. Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 11. Kalkınma Planı (2019-2023).

Şenbil, M., & Şenbil, E.Y. (2020). Türkiye’de son dönem otomobilleşme: 2007-2018 Arası İller Bazında Analizler. *İdealkent* 11(29), 372-404.

TPAO. (2019). 2018 Yılı Ham Petrol ve Doğal Gaz Sektör Raporu, Türkiye Petrolleri. <https://www.tpa.gov.tr/file/2003/sector-raporlari-2018-2735e5d18395d1ba.pdf>.

TPAO. (2020). 2019 Yılı Ham Petrol ve Doğal Gaz Sektör Raporu, Türkiye Petrolleri. <https://enerji.mmo.org.tr/wp-content/uploads/2020/06/2019-TPAO-SEKT%C3%96R-RAPORU.pdf>.

TEPAV. (2016). Enerji Güvenliği Perspektifi ve Riskleri. [https://www.tepav.org.tr/upload/files/1502195236-1.Daha Guclu AB Turkiye Enerji Diyaloguna Dogru Enerji Guvenligi Perspektifleri ve Riskleri.pdf](https://www.tepav.org.tr/upload/files/1502195236-1.Daha_Guclu_AB_Turkiye_Enerji_Diyaloguna_Dogru_Enerji_Guvenligi_Perspektifleri_ve_Riskleri.pdf).

TFBR. (2019). Turkey’s Fourth Biennial Report. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/FOURTH%20BIENNIAL%20REPORT%20OF%20TURKEY.pdf>. (Erişim Tarihi: 01.04. 2021).

TGHGI 1990-2018. (2020). Turkish Greenhouse Gas Inventory Report: 1990 – 2018, National Inventory Report for

submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change, Turkish Statistical Institute, Ankara.

TGNA. (2012). Central Government Final Account Law 2012, No. 6513, Dated: 20.12.2013. Turkish Grand National Assembly, Ankara/Turkey.

TomTom. (2018), TomTom Traffic Index: Measuring Congestion Worldwide, website, http://www.tomtom.com/en_gb/trafficindex/list?citySize=LARGE&continent=ALL&country=ALL. (Erişim Tarihi: 26.02.2018).

Trends, P.A.G.E. (2010). World energy outlook, 2010.

Türkiye İstatistik Kurumu, TÜİK. (2017). Ulusal Sera Gazı Envanteri Raporu 1990-2015. <http://dx.doi.org/10.1787/888933892934>. (Erişim Tarihi: 15.05.2021).

Türkiye İstatistik Kurumu, TÜİK. (2018a). Ulaşım İstatistikleri: Kullanım Amacına Göre Motorlu Karayolu Taşıt Sayıları (veri tabanı). www.turkstat.gov.tr/PreIstatistikTablo.do?istabid=355 (Erişim Tarihi: 26.02.2018).

Türkiye İstatistik Kurumu, TÜİK. (2018b). Ulaşım İstatistikleri: Kullanılan Yakıt Türüne Göre Motorlu Karayolu Taşıt Sayısı (veri tabanı), www.turkstat.gov.tr/PreTablo.do?alt_id=1051. (Erişim Tarihi: 26.02.2018).

Türkiye İstatistik Kurumu, TÜİK. (2021). Ankara, Türkiye (Erişim Tarihi: 25.08.2022)

Umar, M., Ji, X., Kirikkaleli, D., & Alola, A.A. (2021). The imperativeness of environmental quality in the United States transportation sector amidst biomass-fossil energy consumption and growth. *Journal of Cleaner Production*, 285, 124863.

United Nations. (2018). The World's Cities in 2018. https://www.un.org/en/events/citiesday/assets/pdf/the_worlds_cities_in_2018_data_booklet.pdf. (Erişim Tarihi: 16.12.2020).

Yalta, A.T., & Yalta, A.Y. (2016). The dynamics of fuel demand and illegal fuel activity in Turkey. *Energy Economics*, 54, 144-158.

Van Vliet, O., Brouwer, A. S., Kuramochi, T., van Den Broek, M., & Faaij, A. (2011). Energy use, cost and CO2 emissions of electric cars. *Journal of power sources*, 196 (4), 2298-2310.

WEF, World Economic Forum. (2018). *Electric Vehicles for Smarter Cities: The Future of Energy and Mobility*, In collaboration with Bain & Company. http://www3.weforum.org/docs/WEF_2018_%20Electric_For_Smarter_Cities.pdf. (Erişim Tarihi: 05.01.2021).

WLPGA, World LP Gas Association. (2010). *World LP Gas Association Annual Report*, Paris, France. <http://www.worldlpgas.com>.

World Bank. (2016). *World Population*. <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL>.

World Bank. (2019). *World Development Indicators*, World Bank, Washington, DC, <https://databank.worldbank.org/data/download/GDP.pdf>.

Worldometer. (2020). *Turkey Population (2020)*. <https://www.worldometers.info/world-population/turkey-population/>. (Erişim Tarihi: 29.08.2020)

BÖLÜM VI

Karayolu Taban Zemini Su İçeriğinin Esnek Yol Üstyapısına Etkileri

İlker ŞAHİNOĞLU¹
Erdoğan KESKİN²

Giriş

Karayolu esnek yol üstyapıları tipik olarak Şekil 1’de verildiği gibi yukarıdan aşağıya doğru olmak üzere kaplama tabakası, temel tabakası, alttemel tabakası ve taban zemininden meydana gelmektedir.

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kırklareli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ilker.sahinoglu@klu.edu.tr

² Dr. Öğr. Üyesi, Kırklareli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, erdinckeskin@klu.edu.tr



Şekil 1. Karayolu esnek yol üstyapı enkesiti (Garber & Hoel, 2010; Bostancıoğlu, 2021a)

Yol üstyapısını oluşturan tabakaların işlevi, trafik yüklerinden kaynaklanan gerilmeleri derinlikle birlikte azaltmak ve bu gerilmeleri taban zemininin aşırı deformasyona uğramaksızın tolere edebileceği bir gerilme düzeyine indirgemektir (Mallick & El-Korchi, 2009). Birbiri ile etkileşimde olan esnek yol üstyapı tabakalarının her biri farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip çeşitli malzemelerden oluşmaktadır (Graczyk & ark., 2016; Bostancıoğlu, 2021b). Bu tabakaların trafik yüklerini dağıtma kabiliyeti ile birlikte üstyapının hem mekanik hem de fonksiyonel özellikleri doğrudan kullanılan bu malzeme özelliklerine bağlıdır (Tunç, 2004). Bu bileşenlerin her birinin performans düzeyi üstyapının toplam performansını etkilediğinden bileşenlerin özelliklerinin ayrı ayrı ve doğru bir şekilde değerlendirilmesi gerekir (Garber & Hoel, 2010).

Taban Zemini Su İçeriğinin Yol Üstyapısına Etkileri

Taban zemini esneklik modülü değeri esnek yol üstyapı tasarımında önemli bir girdi parametresi olarak hesaplamalara dahil edilmektedir (Heydinger, 2003). Tüm inşaat mühendisliği yapılarında olduğu gibi karayollarının inşasında da yolun yapılacağı zemin özellikleri üst yapının tasarımını etkilemektedir. Bu nedenle yol güzergahlarında karşılaşılan zeminlerin üzerine yol inşa

edilebilecek nitelikte mühendislik özelliklerine sahip olması gerekmektedir. Ancak esnek yol üstyapıları servis ömrü boyunca trafik yüklerinin yanı sıra iklim ve çevresel faktörlerden de etkilenmektedir (Tunç, 2004). Bunun bir sonucu olarak karayolu taban zemininin su içeriğindeki değişim yol üstyapı performansını önemli ölçüde etkileyebilecektir (Jiang & Tayabji, 1999). Taban zemini modülü üzerinde önemli bir etkiye sahip olan su içeriğindeki aşırı artış modül değerlerini azaltacak ve dolayısıyla bu durum üstyapının ömrünü azaltabileceği gibi bakım maliyetlerini de arttırabilecektir (Ksaibati & ark., 2000).

Esnek yol üstyapılarında servis ömrü boyunca farklı türde bozulmalar meydana gelmektedir. Taban zemininde genişleyen kilin bulunması ve bu zeminin hacimsel değişimi üstyapıda boyuna çatlak, düzgünlük ve yorulma çatlakları gibi bir takım problemlere yol açmaktadır (Sebesta, 2002; Luo & Prozzi, 2010). Özellikle bu genişleyen zeminlerin varlığı mevsimsel olarak su içeriğindeki değişimler ile birlikte büzülme ve kabarmanın etkisiyle üstyapıda çatlamalara neden olmaktadır (Puppala & ark., 2011). Bu tür bozulmalara örnek Şekil 2’de görülmektedir.



Şekil 2. Genişleyen taban zemini üzerine oturan esnek yol üstyapısının bozulması (Tiwari & Satyam, 2020)

Esnek yol üstyapı tasarımında taban zemini su içeriği değişiminin etkileri üzerine literatürde birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Rahman & ark. (2023), çalışmalarında sekiz farklı taban zemini üzerinde çalışmışlardır. Su içeriğinde ve bu değerlerin hem üstünde hem de altındaki su içeriğinde hazırladıkları zemin numuneleri ile Kaliforniya taşıma oranı (CBR) ve AASHTO T307 standardına göre tekrarlı yük üç eksenli testler gerçekleştirmişlerdir. Zemin örneklerini aldıkları noktada düşen ağırlık deflektometre ile esneklik modülü değerlerini geri hesaplama yöntemi ile elde etmişlerdir. Daha sonra laboratuvarından elde ettikleri esneklik modülü değerleri ile FWD 'den elde ettikleri esneklik modülü değerleri ve CBR deneyleri arasındaki korelasyonu incelemişlerdir. Bünye esneklik modülü modelinin parametrelerini zemin indeksinin özellikleriyle ilişkilendirmek için istatistiksel modeller oluşturmuşlardır. Ayrıca taban zemini su içeriğinin esnek modülü ve kaplama tekerlek izi üzerindeki etkisini Güney Carolina'da yaygın olarak kullanılan üç temel tipi için araştırmışlardır. Su içeriği arttıkça laboratuvar esneklik modülü değerinin azaldığını, optimum su içeriğinin %2 düşüğünde sıkıştırılan numunelerin, optimum su içeriğinde sıkıştırılan numunelerden daha yüksek, optimum su içeriğinin %2 yüksekinde sıkıştırılan numunelerin ise daha düşük laboratuvar esneklik modülü değeri verdiğini, laboratuvar esneklik modülü ve CBR arasında iyi bir korelasyon kurulduğunu ve laboratuvar esneklik modülünün farklı zeminler için CBR arttıkça arttığını, laboratuvarında ölçülen esneklik modülünün, FWD'ye kıyasla daha yüksek kaplama tekerlek izi öngördüğü sonuçlarını elde etmişlerdir. Yine agregalı bir temel kullanılması durumunda, zeminin su içeriği durumunun taban zemini esneklik modülü değerini ve bunun sonucunda ortaya çıkan taban zemini tekerlek izini önemli ölçüde etkilediğini bununla birlikte, daha yüksek rijitliğe sahip temel tabakası kullanılması durumunda (yani çimento ile stabilize edilmiş vb.)su içeriği etkisinin daha az önemli olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Ping & ark. (2003), tam ölçekli bir test çukurunda tekrarlı plaka yükleme deneyini ve laboratuvar üç eksenli esneklik modülü deneyini kullanarak granüler taban zeminlerin esneklik modülünü değerlendirmek için deneysel bir program yürütmüşlerdir. Bu deneysel çalışma ile beş farklı granüler taban zemininin çeşitli su içeriği koşulları altında esneklik modülü değerlerini sunmayı amaçlamışlardır. Esneklik modülünün granüler taban zeminlerin su içeriğinden önemli ölçüde etkilendiğini ve su içeriğindeki artışın siltli kumların esneklik modülünde önemli bir azalmaya neden olduğunu belirtmişlerdir.

Chu & ark. (2023), taban zemini su içeriğindeki değişimlerin üstyapı tepkisi üzerindeki etkilerini ortaya koymayı amaçlamışlardır. KENPAVE ile üstyapının simülasyon analizini gerçekleştirmişlerdir. Analizleri asfalt kaplama tabakası, temel ve alt temel tabakalarının elastik modülü ve kalınlığının yanı sıra aks yükü gibi değişkenler ile çeşitli koşullar altında yapmışlardır. Her bir senaryo için yorulma ve tekerlek izi ömrünün yanı sıra duyarlılık indekslerini de elde etmişlerdir. Genel olarak ele aldıkları tüm zemin türleri için, su içeriğinin artmasıyla yorulma ve tekerlek izi ömrü azalırken, yorulma çatlama ve kalıcı deformasyonun arttığını ifade etmişlerdir.

Ikechukwu & Hassan (2022), genişleyen taban zemini üzerine inşa edilen mevcut yol üstyapıların bozulma nedenlerini araştırmışlardır. Üç farklı sahadaki yol üstyapısını incelemişlerdir. Seçilen bölgelerde asfalt tabakalarını incelemek amacıyla karot örnekleri ve taban zemini için de zemin örnekleri almışlardır. İncelenen kaplamalardaki bozulmaların ana nedeninin, şişme ve büzülme döngülerini tetikleyen ve yüzey tabakasına kadar ilerleyen taban zeminindeki aşırı su içeriği hareketinin olduğunu gözlemlemişlerdir.

Peng & ark. (2020), su içeriği ve gerilme ile ilgili doğrusal olmayan özelliklerini dikkate alarak taban zeminleri için yeni bir bünye modeli önermeyi ve su içeriğinin üstyapı performansı üzerindeki etkisini ölçmek için önerilen bu bünye modelini

ABAQUS tabanlı sonlu elemanlar modeline dahil etmeyi amaçlamışlardır. Su içeriğine duyarlı ve gerilmeye bağlı esneklik modülü bünye modelini ABAQUS kodundaki UMAT alt programı aracılığıyla sayısal simülasyonda uygulamışlardır. Esneklik modülü bünye modelinin, taban zeminlerin doğrusal olmayan su içeriği ve gerilmeye duyarlı ilişkisini karakterize edebileceğini ifade etmişler ve üç eksenli testler ile doğrulamışlardır. Sonlu eleman simülasyonu ile taban zemininin su içeriğinin dağılımının, taban zemininin esneklik modülü dağılımını ve yol üstyapılarının kritik tepkisini önemli ölçüde etkilediği sonucunu ifade etmişlerdir.

Li & ark. (2019), taban zeminlerin gerilme duyarlılığı ve su içeriği değişimini dikkate alarak esnek yol üstyapıların dinamik davranışını tahmin etmek için sayısal bir yaklaşım oluşturmayı amaçlamışlardır. Esnek yol üstyapısının iki boyutlu sonlu elemanlar analizini gerçekleştirmişler ve yol yüzeyine etki eden trafik yüklerini simüle etmek için yarım sinüzoidal bir yükleme yapmışlardır. Zemin emme ve oktahedral kayma gerilmesini içeren bir model önermişlerdir. Bünye modeli için tahmin sonuçlarını, tekrarlı yük üç eksenli deneylerin laboratuvar sonuçları ile doğrulamışlardır. Su içeriğinin %63 oranında artırılması durumunda taban zeminlerinin ortalama esneklik modülü değerinin %18,7 oranında azaldığını bununla birlikte taban zeminlerinin rijitlik yumuşamasının, taban zemininin üst kısmındaki düşey basınç birim şekil değiştirmeyi ve yüzey tabakasının altındaki çekme gerilmesini arttırdığını tespit etmişlerdir.

Vaitkus & ark. (2019), asfalt betonu ve taban zemini tabakalarının sıcaklığının ve taban zemini su içeriğinin yol üstyapı taşıma kapasitesine etkisini araştırmışlardır. Deneysel araştırmayı, 2007 yılında inşa edilen ve 12 yıldır işletmede olan bir deneme yolunun beş ayrı üstyapı bölümünde gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca asfalt betonu tabakalarının kalınlığı, asfalt betonu kaplamalarındaki ve yüzeyinin üstündeki sıcaklık, taban zemini su içeriği ve sıcaklığı, yüklü ve yüksüz şeritler gibi birçok parametre ile taşıma kapasitesi arasında istatistiksel bir analiz sunmuşlardır. Taşıma kapasitesini düşen ağırlık deflektometresi ile sıcaklık ve nem içeriğini elektronik

sensörler ile ve asfalt betonu tabakalarının kalınlığını ise georadar ile belirlemişlerdir. Yol üstyapısının taşıma kapasitesini etkileyen temel unsurların başında, taban zemininin su içeriği, sıcaklığa olan duyarlılığı ile taşıma kapasitesi ve bunun yanında üstyapının toplam kalınlığı ve bitümlü bağlayıcı içeren asfalt betonu tabakalarının toplam kalınlığı olduğunu belirtmişlerdir.

Elshaer & ark. (2018), zeminin su içeriği profilini esnek üstyapı değerlendirmesine dahil etmek için bir metod geliştirmeyi ve su seviyesindeki değişikliklerin üstyapı deformasyonunu nasıl etkileyeceğini belirlemeyi amaçlamışlardır. İki farklı bölgedeki düşen ağırlık deflektometre verilerini, su içeriği değişiklikleri ile yerinde ölçülen kaplama deformasyonunu tahmin etmek için kullanmışlardır. Elastik tabaka analizi yaklaşımını, çökmenin hesaplanmasında, taban zemini esneklik modülünün su içeriğine bağlı değişimini içerecek şekilde uyarlamışlardır. Bu analizlerde taban zeminini farklı su içeriklerine sahip çeşitli alt tabakalara bölmüşler ve esneklik modülünü su içeriğine bağlı olarak analizlere dahil etmişlerdir. Yerinde ölçüm ile analizden elde ettikleri verileri karşılaştırmışlardır. Genel olarak, elastik analizden tahmin edilen çökme şekli ile önerilen kesitler için düşen ağırlık deflektometre ile ölçülen çökme arasında iyi bir uyum olduğunu ifade etmişlerdir. Karşılaştırmalar ile taban zemini tabakasının su içeriği ölçümlerinin konumuna göre değişken ve su içeriğine bağlı modüle sahip alt tabakalara bölünmesinin üstyapı çökmesinin daha doğru tahmin edilmesini sağlayacağını ifade etmişlerdir.

Mieczkowski & Budziński (2018), taban zemininde suyun bulunması durumunda yol üstyapısının taşıma kapasitesi ve durabilitesinin ne şekilde etkileneceğini incelemişlerdir. İlk olarak kaplamanın yapısal kapasitesini belirlemek için düşen ağırlık deflektometre testleri ve kaplama tabakalarının kalınlıklarını belirlemek için georadar testleri de dahil olmak üzere bir dizi testler gerçekleştirmişlerdir. Üstyapının durumunu değerlendirmek için kullanılan ana performans özelliklerinden biri olan elastik çökmeyi düşen ağırlık deflektometre ölçümleri ile belirlemişlerdir. Verilerin analizi ile sıkıntının asıl nedeninin, yol ve banket kenarlarından

kaplama tabakalarının altına yağış suyunun girmesi sonucu taban zeminin yumuşaması olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Han & ark. (2018), yedi farklı sıkıştırılmış taban zemininin mukavemet özelliklerinin sıkıştırma sonrası su içeriğindeki değişim dikkate alınarak deneysel olarak incelenmesini sunmuşlardır. Serbest basınç deneyi ve esneklik modülü değerini belirlemek için tekrarlı üç eksenli deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Yedi farklı taban zemini üzerindeki deneysel sonuçları kullanarak zeminlerin fiziksel özellikleri, serbest basınç dayanımı vb. özelliklerinden esneklik modülünün tahmin edilebilmesi için amprik ilişkiler geliştirmişlerdir. Esneklik modülü değerinin azalan su içeriği ile arttığı sonucunu elde etmişlerdir.

Naji (2018), zeminlerin esnek modülünün kompaksiyon sonrası su içeriğiyle değişimini değerlendirmiştir. Bir grup numuneyi optimum su içeriğinde sıkıştırmış ve ardından esneklik modülü için test etmiş, diğer numune gruplarını optimum su içeriğinde hazırlanmış ve ardından esneklik modülü deneyi öncesi ıslatmış veya kurutmuştur. Esneklik modülü-su içeriği ilişkisinin zemin türüne göre değiştiğini ve esneklik modülü değerlerinin su içeriğindeki değişikliklerle ters orantılı olarak değiştiğini göstermiştir. Bunun yanı sıra su içeriğinin mevsimsel değişiminden dolayı kaplamaların taşıma kapasitesindeki değişikliklerinin tahmin edilebilmesi için esneklik modülünün su içeriği ile değişimini tahmin eden bir model önermiştir.

Zuo & ark. (2007), sıcaklık dağılımı ve su içeriği değişimindeki farklılıklardan kaynaklanan tahmini yol üstyapı ömründeki değişimi ölçmeyi amaçlamışlardır. Cihaz yerleştirilmiş yol üstyapı alanlarında gözlemlenen mevsimsel sıcaklık ve su içeriği değişimleri idealize edilmiş ve bu mevsimsel değişikliklerin öngörülen üstyapı ömrü üzerindeki birleşik etkilerini üç tipik yol üstyapı profili için değerlendirmişlerdir. Parametrik çalışma ile ortalama sıcaklık periyodunun, asfalttaki sıcaklık derecesinin ve ıslak temel ve taban zemini koşullarının zamanlaması ve süresinin tamamının üstyapı ömrünün tahminini etkilediğini ifade etmişlerdir.

Taban zemini su içeriğindeki değişimlerin kayda değer bir etkisi olduğunu ve bir aylık ıslak taban zemini koşullarının, saatlik sıcaklık ortalaması kullanıldığında tahmini kaplama ömrünü üçte birden fazla azalttığını belirtmişlerdir.

Khoury & Zaman (2004), taban zeminlerinin sıkıştırma sonrası nem içeriği ve emmesi ile esneklik modülü değişimini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Laboratuvarda kumlu ve killi olmak üzere iki farklı zemin ile çalışmışlardır. Numunelerin ıslatılması ve kurutulması için yeni laboratuvar prosedürleri tanıtmış ve esneklik modülü, su içeriği değişimi ve emme arasındaki korelasyonları kurmak için kullanmışlardır. Sıkıştırılmış kilin esneklik modülü-su içeriği ilişkisinin, ıslanma ve kuruma prosesinden dolayı histeretik bir davranış sergilediğini ifade etmişlerdir. Belirli bir su içeriği için, kurutma döngüsündeki esneklik modülü değerlerinin, ıslatma döngüsüne göre daha yüksek olduğunu, benzer bir davranışın kumlu zeminlerde de gözlendiğini ancak killi zeminlerde ıslanma-kuruma sürecinin etkisi daha baskın olduğunu belirtmişlerdir.

Lary & Mahoney (1984), mevsimsel değişimlerin kaplama rijitliği ve mukavemeti üzerindeki etkisini değerlendirmeyi ve saha verilerinden kolaylıkla ölçülen modüldeki mevsimsel değişiklikleri tahmin etmek için bir yöntem geliştirmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla 18 ay boyunca dört farklı sahada çökme, taban zemini su içeriği ve zemin emme ölçümleri yapmışlardır. Ayrıca bunlara ek olarak temel ve taban zemini üzerinde bir dizi laboratuvar testleri ve esnek modülü testleri gerçekleştirmişlerdir. Taban zemini rijitliğinde zaman içinde meydana gelen değişiklikleri tahmin etmek için yöntemler geliştirmek amacıyla bu laboratuvar ve saha verilerini kullanmışlardır. Laboratuvar esnek modülü verilerinden geliştirdikleri regresyon denklemlerinin (su içeriği, zemin kuru yoğunluğu ve deviatör gerilmeye dayalı) taban zemini ve temel tabakası esnek modülünü makul bir şekilde tahmin edebileceğini, ince daneli taban zeminlerinin, granüler taban zeminlere kıyasla yıl boyunca esneklik modülünde daha büyük değişkenlikler sergilediğini belirtmişlerdir.

Cumberledge & ark. (1974), taban zemini su içeriği koşullarının yüzey çökmeleri üzerindeki etkisini belirlemek ve ilgili üstyapı sistemi özelliklerindeki değişikliklerden kaynaklanan yüzey çökmelerindeki göreceli değişiklikleri tahmin etmek için bir araç geliştirmeyi amaçlamışlardır. Kurmuş oldukları beş test alanında üç yıl boyunca veriler toplamışlar ve bağımlı değişken (yüzey çökmelerindeki yüzde değişimler) ile seçilen bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi belirlemek için çoklu doğrusal regresyon analizi tekniğini kullanmışlardır. Yüzey çökmelerinin, üstyapı yüzey sıcaklığı ve taban zemini su içeriğindeki değişikliklerden önemli ölçüde etkilendiğini, önerdikleri eşitlik ile yüzey çökmelerinin güvenli bir şekilde tahmin edilebileceğini belirtmişlerdir.

Taban zemini su içeriğinin literatürde gerçeğleştirilen çalışmalar ile birlikte değerlendirildiğinde yol üstyapı performansını etkilediği görölmektedir. Yol üstyapı tabakalarındaki aşırı su içeriği bir takım problemlere neden olacak ve bu duruma karşı önlemlerin alınmaması halinde üstyapının hem yapısal olarak hem de fonksiyonel olarak bozulmasına neden olacaktır (Liang & ark., 2006). Bu sebeple taban zemini su içeriğinin değişiminin mevsimsel olarak arazide izlenmesi ve buradan elde edilen veriler ile yol üstyapı performansı ve taşıma gücündeki değişimin değerlendirilmesi yeni yapılacak bir yol üstyapı tasarımı ve rehabilitasyon süreci için çevresel etkilerin daha iyi anlaşılmasına imkan sağlayacaktır.

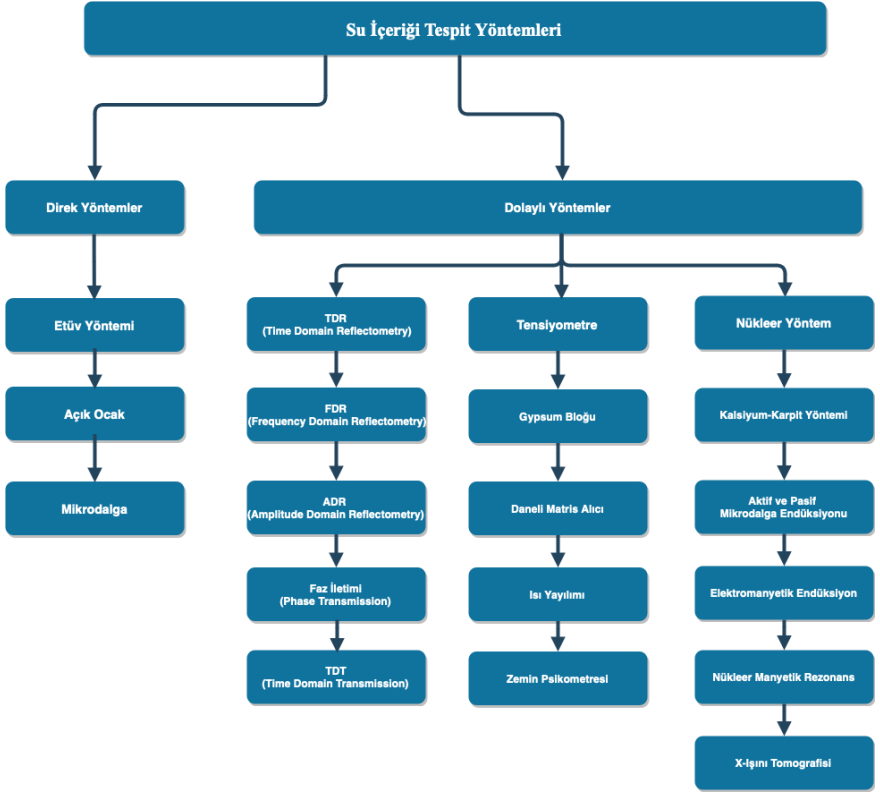
Taban Zemini Su İçeriğinin Tespit Edildiği Yöntemler

Önceki çalışmalar incelendiğinde, zemin su içeriğinin esnek yol üstyapıların performansında önemli bir parametre olduğu açıkça görölmektedir. Bu nedenle, taban zemininin su içeriğinin doğru bir şekilde tespit edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu bölümde, zemin su içeriğinin arazide ve laboratuvarında tespit edilmesi için kullanılan yöntemlere dair bilgiler verilmiştir. Ayrıca, bu yöntemlerden biri olan ve arazide yerinde tespit için kullanılabilir TDR (Time Domain Reflectometry) yöntemi detaylı bir şekilde açıklanmıştır (Arsoy & ark., 2013a).

Zemin su içeriği, zemin daneleri arasındaki boşluklarda serbest olarak bulunan suyun, zeminin kuru ağırlığına oranı olarak tanımlanmaktadır. Bu ölçüm, hem arazi hem de laboratuvar ortamlarında, özellikle geoteknik ve karayolu mühendisliği uygulamalarında, en temel ihtiyaçlardan biridir. Su içeriğinin belirlenmesi için kullanılan yöntemlerden biri, laboratuvar koşullarında sıcaklık değeri ayarlanabilen geleneksel etüv adı verilen fırınlarla gerçekleştirilir. Bu yöntem, zemin daneleri arasındaki serbest suyun buharlaştırılarak miktarının belirlenmesi prensibine dayanmaktadır. Kurutma işlemleri, $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta gerçekleştirilir. Numunenin ağırlığı, etüv içinde belirli aralıklarla tartılarak kurutma süresi boyunca takip edilir ve değişmeyen ağırlığa ulaşıldığında ölçüm tamamlanır. Bu geleneksel yöntemin doğruluğu oldukça yüksektir, ancak dezavantajı uzun süreler alması ve dolaylı maliyetlerin artmasıdır.

Bu nedenle, araştırmacılar daha hızlı ve etkili alternatif yöntemlere odaklanarak çeşitli yaklaşımlar geliştirmiştir. Su içeriğinin hızlı ölçümü için kullanılan yöntemler arasında açık ocakta zeminin kurutulması, mikrodalga fırında kurutma, kalsiyum karpit eşdeğer gaz basıncı ve nükleer nem ölçer cihazları ile ölçüm gibi yöntemler bulunmaktadır. Bunlara ek olarak, son yıllarda elektromanyetik yöntemler gibi yeni ve inovatif yaklaşımlar da geliştirilmiştir. Gelişmiş ülkelerde daha yaygın olarak kullanılan modern yöntemlere rağmen, ülkemiz gibi birçok ülkede zemin mekaniği ve karayolu mühendisliği uygulamalarında henüz bu yöntemlere geçilememiştir (Arsoy & ark., 2013b; Arsoy & ark., 2014; Rasheed & ark., 2022).

Su içeriği ölçme yöntemlerini direk ve dolaylı yöntemler olmak üzere 2 ana grupta sınıflandırabiliriz. Kurutmaya dayalı yöntemler direk yöntemler sınıfına girmektedir. Zeminin di-elektrik kapasitesini ölçerek su içeriğini dolaylı belirleyen yöntemler, zemin daneleri arasındaki suyun yüzey gerilim özelliklerine dayanan yöntemler ve diğer ölçüm yöntemleri ise dolaylı yöntemler sınıfına girmektedir. Şekil 3'te su içeriği ölçüm yöntemleri gruplandırılarak gösterilmiştir.



Şekil 3. Su içeriği tespit yöntemleri

TDR Yöntemi ile Su İçeriğinin Belirlenmesi

TDR yöntemi ilk olarak 1950’li yıllarda radar prensibinden yola çıkarak kablo hasarlarının tespit edilmesi için kullanan bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır. TDR yöntemi 1980’den sonra inşaat mühendisliği alanında kullanılmaya başlanmıştır. Zemine gönderilen elektromanyetik dalganın zemin içinden yansımaları ölçerek zeminin dielektrik katsayısını belirleme prensibine dayanan bir ölçüm tekniğidir. Bu yöntem, zeminin dielektrik katsayısı ile su içeriği arasındaki ilişkiyi kullanarak zeminin su içeriğini dolaylı olarak belirler. Elektromanyetik dalgalar, zemin içinde geçtikleri süre boyunca zeminin dielektrik katsayısına ve dolayısıyla su

içeriğine bağlı olarak değişiklik gösterir. Zeminin içeriğindeki bileşenler, hava, mineraller, organik partiküller ve su, farklı dielektrik katsayılarına sahiptir. Su, özellikle yüksek dielektrik katsayısı nedeniyle bu ölçümlerde belirgin bir etki yaratır. TDR yöntemi, zemin içine gömülen metal çubuklar aracılığıyla elektromanyetik dalganın zemin üzerinden geçiş hızını ölçerek zeminin dielektrik özelliklerini belirler (Li & ark., 2022; Moret-Fernández & ark., 2022; Pérez & ark., 2023). Bu ölçümler sayesinde, su içeriği hassas bir şekilde belirlenebilir. Şekil 4’de ölçümlerde en yaygın olarak kullanılan farklı markalara ait TDR cihazlarından üçü gösterilmiştir.



<https://www.ele.com/product/trase-soil-moisture-analyser/114>



<https://www.torontosurplus.com/tektronix-1502-opt-04-tdr-cable-tester-with-printer-recorder-in-stock.html>



<https://www.campbellsci.com/tdr100>

Şekil 4. Örnek TDR cihazları

TDR cihazı tarafından üretilen sinyal, koaksiyel bir iletim hattı üzerinde seyahat etmektedir. Koaksiyel iletim hattı, iç ve dış iletkenleri birbirinden ayıran bir iç yalıtıktan oluşur; bu, evlerimizde kullandığımız uydu kablolarının bir örneğidir. TDR cihazı, ürettiği sinyali zemin içine gömülen bir prob aracılığıyla ileterek çalışmaktadır. Gönderilen sinyal, zeminle etkileşime girdiğinde bir kısmı geri yansımaktadır. Bu yansımanın nedeni, kablunun ve zeminin empedanslarının farklı olmasıdır. Yansıyan dalga, TDR cihazına geri döner ve bu yansıma, TDR cihazı

tarafından ölçülerek bir yansıma formu oluşturur. Bu yansıma formu kullanılarak zeminin dielektrik katsayısı hesaplanabilir. Zeminde meydana gelen yansıma, zemin içindeki daneler, hava ve su tarafından etkilenir. Bu bağlamda, en büyük etki, en yüksek dielektrik katsayısına sahip olan su kaynaklıdır (Cui & Kong, 2022).

TDR ölçümlerinde kullanılan iki farklı prob, Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekil 5a'da 2 iletkenli bir TDR probu, Şekil 5b'de ise 3 iletkenli bir TDR probu görülmektedir.



<https://www.soilmoisture.com/SLAMMER/>

(a)



<https://www.ele.com/product/buriable-wave-guide->

(b)

Şekil 5. Ölçümlerde kullanılan örnek TDR probu

Her iki probun ölçüm performansı birbirine oldukça yakındır. Probların zemine gömülü kısımları paslanmaz çelikten yapılmıştır. Çubuk boyları, ölçüm alınmak istenen derinliğe göre farklı boylarda üretilmektedir, bu da çeşitli ölçüm ihtiyaçlarına uygun olarak farklı problemlerin kullanılabilmesine olanak tanımaktadır.

Literatürde TDR ile su içeriğinin belirlenmesi yönünden yapılan çalışmalar incelendiğinde, TDR yönteminin su içeriğinin belirlenmesi için oldukça kullanışlı bir yöntem olarak ön plana çıktığı görülmektedir. Zemine özgü kalibrasyon yapıldığı takdirde nükleer metotta olduğu gibi gerçek su içeriğinin oldukça yakın

sonuçlar verdiği görülmüştür. TDR yöntemi, kullanım kolaylığı, düşük maliyet, güvenilirlik ve en önemlisi zemin su içeriğini hızlı ve doğru bir şekilde tespit edebilme yeteneği ile öne çıkmaktadır. Bu zellikleri, özellikle saha çalışmalarında pratik bir zm sunarak su içeriğinin belirlenmesinde etkili bir alternatif sunmaktadır.

Sonuç

Literatürde gerçekleştirilen çalışma sonuçları incelendiğinde karayollarında taban zemini su içeriğinin yol üstyapı performansını etkilediği açıkça grlmektedir. Özellikle uzun yol güzergahlarında farklı türde zeminlerle karşılaşılması muhtemeldir. Bu zeminlerin su içeriğindeki değişime farklı tepkiler göstereceği de göz önünde bulundurulması gereken önemli bir husustur. Ayrıca taban zemini su içeriğinin aşırı artması ile birlikte yol üstyapı tabakalarında bozulmalar meydana gelebileceği gibi bu durum üstyapıdan beklenen hem yapısal hem de fonksiyonel görevini yerine getirmesi özelliğini engelleyecektir. Bu nedendir ki taban zemini su içeriğinin değişiminin doğru bir şekilde arazide incelenmesi ve yine mevsimsel olarak değişiminin takip edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda zemin su içeriğinin arazide ve laboratuvarda tespit edilmesi için kullanılan çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bunlar içerisinde TDR yönteminin literatürdeki çalışmalar ile birlikte değerlendirildiğinde kullanışlı bir yöntem olduğu grlmektedir. Bunun yanı sıra kullanım kolaylığı, düşük maliyeti, güvenilirlik ve en önemlisi zemin su içeriğini hızlı ve doğru bir şekilde tespit edebilme yeteneği ile öne çıkmakta ve saha çalışmalarında pratik bir zm sunarak su içeriğinin belirlenmesinde etkili bir alternatif sunmaktadır.

KAYNAKÇA

Arsoy, S., Ozgur, M., Keskin, E., & Yilmaz, C. (2013a). Enhancing TDR based water content measurements by ANN in sandy soils. *Geoderma*, 195, 133-144. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.11.019>

Arsoy, S., Ozgur, M., Keskin, E., & Yilmaz, C. (2013b). Usability of calcium carbide gas pressure method in hydrological sciences. *Journal of hydrology*, 503, 67-76. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.08.044>

Arsoy, S., Keskin, E., & Ozgur, M. (2014). Reliability of soil water content measurements by calcium carbide gas pressure method for small specimens. *Scientia Iranica*, 21(6), 1762-1772.

Bostancıoğlu, M. (2021a). Mekanistik ampirik esnek üstyapı tasarım modellerinin tabaka kalınlık ve rijitlik oranlarına bağlı olarak karşılaştırılması. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(1), 91-102. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.773172>

Bostancıoğlu, M. (2021b). Granüler tabakaların fonksiyonel derecelendirilmesi ile esnek üstyapılarda yorulma ve tekerlek izinde oturma dayanımının artırılması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 26(2), 557-572. <https://doi.org/10.17482/uumfd.848059>

Buriable wave guide. (n.d.). 20 Aralık 2023 tarihinde Ele.com websitesi: <https://www.ele.com/product/buriable-wave-guide-> adresinden alındı.

Campell Scientific (31 Mart 2020). California: Coastal slope monitoring. 20 Aralık 2023 tarihinde Campbellsci.com websitesi: <https://www.campbellsci.com/tdr100> adresinden alındı.

Chu, X., Dawson, A., Zhang, J., Thom, N., Guo, C., & Qin, L. (2023). Sensitivity analysis of pavement response to subgrade moisture variations. *Journal of Building Engineering*, 69, 106285. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.106285>

Cui, J., & Kong, S. (2022). Research on the Method of Measuring Soil Water Content by Time Domain Reflectometry. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2196, No. 1, p. 012010). IOP Publishing. doi:10.1088/1742-6596/2196/1/012010

Cumberledge, G., Hoffman, G. L., Bhajandas, A. C., & Cominsky, R. J. (1974). Moisture variation in highway subgrades and the associated change in surface deflections. *Transportation Research Record*, 497, Transportation Research Board, Washington, D.C., 40-49.

Elshaer, M., Ghayoomi, M., & Daniel, J. S. (2018). Methodology to evaluate performance of pavement structure using soil moisture profile. *Road materials and pavement design*, 19(4), 952-971. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1283356>

Garber, N. J. & Hoel, L. A. (2010). *Traffic and Highway Engineering*. (Forth edition). Cengage Learning.

Graczyk, M., Rafa, J., & Zofka, A. (2016). The selected problems of multi-layer pavements—influence of composite impacts vehicles and climatic factors on the behavior of roads pavements. *Transportation Research Procedia*, 14, 2487-2496. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.316>

Han, Z., Vanapalli, S. K., Ren, J. P., & Zou, W. L. (2018). Characterizing cyclic and static moduli and strength of compacted pavement subgrade soils considering moisture variation. *Soils and foundations*, 58(5), 1187-1199. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.06.003>

Heydinger, A. G. (2003). Evaluation of seasonal effects on subgrade soils. *Transportation research record*, 1821(1), 47-55. <https://doi.org/10.3141/1821-06>

Ikechukwu, A. F., & Hassan, M. M. (2022). Assessing the extent of pavement deterioration caused by subgrade volumetric movement through moisture infiltration. *International Journal of*

Pavement Research and Technology, 15(3), 676-692.
<https://doi.org/10.1007/s42947-021-00044-y>

Jiang, Y. J., & Tayabji, S. D. (1999). Evaluation of in situ moisture content at long-term pavement performance seasonal monitoring program sites. *Transportation research record*, 1655(1), 118-126. <https://doi.org/10.3141/1655-16>

Khoury, N. N., & Zaman, M. M. (2004). Correlation between resilient modulus, moisture variation, and soil suction for subgrade soils. *Transportation research record*, 1874(1), 99-107. <https://doi.org/10.3141/1874-11>

Ksaibati, K., Armaghani, J., & Fisher, J. (2000). Effect of moisture on modulus values of base and subgrade materials. *Transportation research record*, 1716(1), 20-29. <https://doi.org/10.3141/1716-03>

Lary, J. A., & Mahoney, J. P. (1984). Seasonal effects on the strength of pavement structures. *Transportation Research Record*, 954, 88-94.

Li, J., Zheng, J., Yao, Y., Zhang, J., & Peng, J. (2019). Numerical method of flexible pavement considering moisture and stress sensitivity of subgrade soils. *Advances in Civil Engineering*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/7091210>

Li, B., Wang, C., Gu, X., Zhou, X., Ma, M., Li, L., ... & Zheng, X. (2022). Accuracy calibration and evaluation of capacitance-based soil moisture sensors for a variety of soil properties. *Agricultural Water Management*, 273, 107913. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107913>

Liang, R. Y., Al-Akhras, K., & Rabab'ah, S. (2006). Field monitoring of moisture variations under flexible pavement. *Transportation research record*, 1967(1), 160-172. <https://doi.org/10.1177/0361198106196700116>

Luo, R., & Prozzi, J. A. (2010). Development of longitudinal cracks on pavement over shrinking expansive subgrade. *Road*

materials and pavement design, 11(4), 807-832.
<https://doi.org/10.1080/14680629.2010.9690308>

Mallick, R.B. & El-Korchi, T. (2009). *Pavement engineering: principles and practice*. Published by CRC Press Taylor & Francis Group.

Mieczkowski, P., & Budziński, B. (2018, May). Influence of excessive moisture in the subgrade on the durability and load-bearing capacity of road pavements. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 356, No. 1, p. 012012). IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/356/1/012012>

Moret-Fernández, D., Lera, F., Latorre, B., Tormo, J., & Revilla, J. (2022). Testing of a commercial vector network analyzer as low-cost TDR device to measure soil moisture and electrical conductivity. *Catena*, 218, 106540.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106540>

Naji, K. (2018). Resilient modulus–moisture content relationships for pavement engineering applications. *International Journal of Pavement Engineering*, 19(7), 651-660.
<https://doi.org/10.1080/10298436.2016.1199877>

Peng, J., Zhang, J., Li, J., Yao, Y., & Zhang, A. (2020). Modeling humidity and stress-dependent subgrade soils in flexible pavements. *Computers and Geotechnics*, 120, 103413.
<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103413>

Pérez, M., Mendez, D., Avellaneda, D., Fajardo, A., & Páez-Rueda, C. I. (2023). Time-domain transmission sensor system for on-site dielectric permittivity measurements in soil: A compact, low-cost and stand-alone solution. *HardwareX*, 13, e00398.
<https://doi.org/10.1016/j.ohx.2023.e00398>

Ping, W. V., Yang, Z., & Ho, R. K. (2003). Full-scale laboratory evaluation of moisture effect on resilient moduli of granular pavement subgrade layers. *Road materials and pavement*

design, 4(3),

309-330.

<https://doi.org/10.1080/14680629.2003.9689951>

Puppala, A. J., Manosuthkij, T., Nazarian, S., & Hoyos, L. R. (2011). Threshold moisture content and matric suction potentials in expansive clays prior to initiation of cracking in pavements. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(4), 519-531. <https://doi.org/10.1139/t10-087>

Rahman, M. M., Gassman, S. L., & Islam, K. M. (2023). Effect of Moisture Content on Subgrade Soils Resilient Modulus for Predicting Pavement Rutting. *Geosciences*, 13(4), 103. <https://doi.org/10.3390/geosciences13040103>

Rasheed, M. W., Tang, J., Sarwar, A., Shah, S., Saddique, N., Khan, M. U., ... & Sultan, M. (2022). Soil moisture measuring techniques and factors affecting the moisture dynamics: A comprehensive review. *Sustainability*, 14(18), 11538. <https://doi.org/10.3390/su141811538>

Sebesta, S. (2002). *Investigation of maintenance base repairs over expansive soils: Year 1 report* (No. FHWA/TX-03/0-4395-1.). Austin, TX, USA: Texas Transportation Institute, Texas A & M University System.

Soilmoisture Field (Slammer) Probes (N.d.). 20 Aralık 2023 tarihinde [Soilmoisture.com](https://www.soilmoisture.com) websitesi: <https://www.soilmoisture.com/SLAMMER/> adresinden alındı.

Tektronix 1502 opt 04 TDR cable tester with printer / recorder (in stock). (n.d.). 20 Aralık 2023 tarihinde [Torontosurplus.com](https://www.torontosurplus.com) websitesi: <https://www.torontosurplus.com/tektronix-1502-opt-04-tdr-cable-tester-with-printer-recorder-in-stock.html> adresinden alındı.

Tiwari, N., & Satyam, N. (2020). An experimental study on the behavior of lime and silica fume treated coir geotextile reinforced expansive soil subgrade. *Engineering Science and Technology, an*

International Journal, 23(5), 1214-1222.
<https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.12.006>

Tunç, A. (2004). *Kaplama mühendisliği ve uygulamaları*. (1. Baskı) Ankara: Asil Yayın Dağıtım.

Trase Soil Moisture Analyser. (n.d.). 20 Aralık 2023 tarihinde Ele.com websitesi: <https://www.ele.com/product/trase-soil-moisture-analyser/114> adresinden alındı.

Vaitkus, A., Žalimienė, L., Židanavičiūtė, J., & Žilionienė, D. (2019). Influence of temperature and moisture content on pavement bearing capacity with improved subgrade. *Materials*, 12(23), 3826.
<https://doi.org/10.3390/ma12233826>

Zuo, G., Drumm, E. C., & Meier, R. W. (2007). Environmental effects on the predicted service life of flexible pavements. *Journal of Transportation Engineering*, 133(1), 47-56.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2007\)133:1\(47\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2007)133:1(47))

BÖLÜM VII

Rijit Yol Üstyapı Kaplamalarının Hesabında Elastik Zemin Modelleri

İlker ŞAHİNOĞLU¹
Kanat Burak BOZDOĞAN²

Giriş

Karayollarında yol üstyapıları esnek, rijit ve kompozit olmak üzere farklı şekillerde inşa edilebilmektedir (Huang, 2012). Bunların içinde rijit yol üstyapılarının uygulanması da her geçen gün artmaktadır. Rijit kaplamalar genellikle ağır taşıt trafiği ve yüksek trafik hacmine sahip yollarda uygulanmaktadır (Tunç, 2004; Garber & Hoel, 2010). Şekil 1’de görüldüğü gibi bu kaplamalar doğrudan taban zemini ya da granüler bir temel tabakası üzerine portland

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kırklareli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ilker.sahinoglu@klu.edu.tr

² Prof. Dr., Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, kbbozdogan@comu.edu.tr

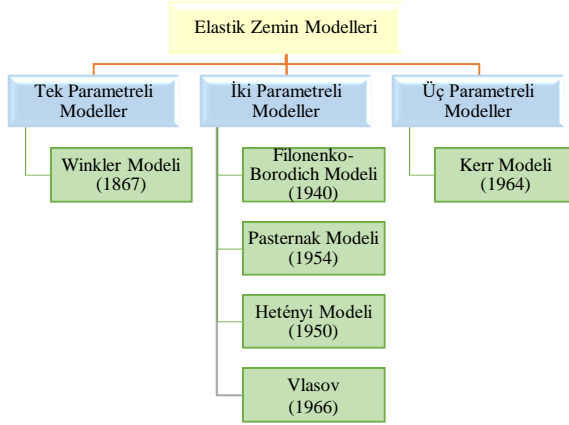
çimentolu beton bir plak olarak inşa edilmektedir (Papagiannakis & Masad, 2008; Huang, 2012). Trafik yükleri altında çok az çökme yapan rijit kaplamalar, bu yükler altında esnek kaplamalara göre farklı davranış sergilemekte ve plakların yüksek rijitlikleri nedeniyle yükü daha geniş bir alana dağıtarak altında bulunan tabakalara gelen gerilmeleri azaltmaktadır (Mallick & El-Korchi, 2009).



Şekil 1. Tipik bir beton yol üstyapı enkesiti (Papagiannakis & Masad, 2008)

İnşaat mühendisliğinde tasarımı yapılacak ve uygulanacak olan yapıların zemin ile olan etkileşimlerinin tespiti bu yapıların kendilerinden istenen fonksiyonu doğru bir şekilde yerine getirip getirmediğinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. İnşaat mühendisliğinin tüm alanlarında yapı zemin etkileşimi ile ilgili çeşitli problemlerle karşılaşmakta ve çözüm yöntemleri ile ilgili birçok çalışma gerçekleştirilmiş ve gerçekleştirilmeye devam etmektedir (Kara & ark., 2020; Kara & ark., 2021). İnşaat mühendisliğinde diferansiyel denklemler ile ifade edilebilen bu tür problemlerin çözümünde analitik ve nümerik yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu bağlamda rijit yol üstyapı

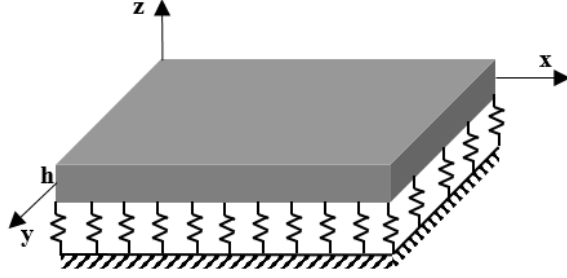
kaplamalarında da beton plakların zeminle olan etkileşimleri üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda beton plakların üzerine oturduğu zeminlerin diferansiyel denklemler ile ifade edildiği çeşitli zemin modelleri kullanılmıştır. Şekil 2’de görüldüğü üzere literatürde farklı parametreleri dikkate alan birçok zemin modeli önerilmiştir. Bu modellerin bazıları bu bölümde açıklanmıştır.



Şekil 2. Elastik zemin modelleri

Tek Parametrelili Modeller

Elastik zemin modellerinde kullanılan en basit model Şekil 3’ te gösterilen tek parametrelili zemin modelidir. Bu modelde zeminin kiriş veya plağa olan etkisi tek bir parametre ile tanımlanmaktadır.



Şekil 3. Winkler modeline ait görsel (Li & ark., 2021)

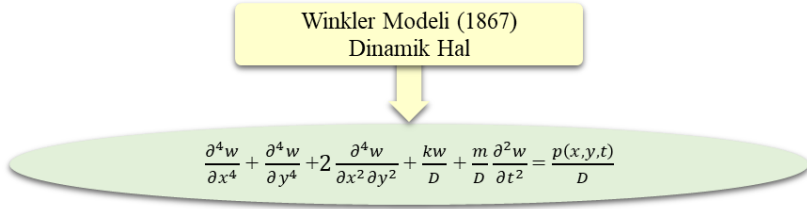
Winkler modeli olarak da bilinen tek parametrelili model kiriş ve plakların statik, dinamik ve stabilite analizinde kullanılmaktadır. Şekil 4'te Winkler zeminine oturan ince plakların statik yükler altındaki denge denklemleri verilmiştir. Verilen denklemler ince plak teorisi olan Kirchoff plak teorisine göre yazılmıştır. Kirchoff plak teorisi kirişlerdeki Euler-Bernoulli kiriş teorisine karşılık gelmektedir.

Winkler Modeli (1867)
Statik

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{k w}{D} = \frac{p(x,y)}{D}$$

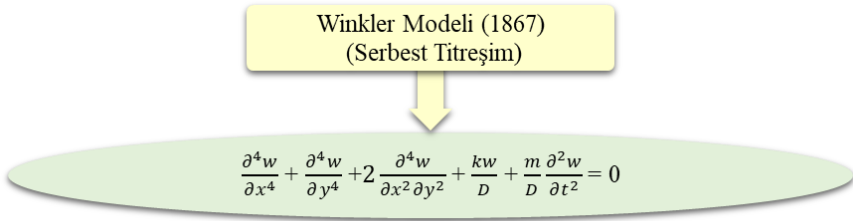
Şekil 4. Winkler zeminine oturan Kirchoff plağının statik yükler altındaki denklemleri

Dinamik hal için ise yukarıda verilen kısmi diferansiyel denklem Şekil 5'te verilen hali almaktadır.



Şekil 5. Winkler zeminine oturan Kirchoff plağının dinamik yükler altındaki denklemi

Serbest titreşim durumunda ise kısmi diferansiyel denklem Şekil'6 da verilen şekle dönüşür.



Şekil 6. Winkler zeminine oturan Kirchoff plağının serbest titreşim durumu için hareket denklemi

Literatürde Tek Parametrelili Zemin Modelleri Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Bu bölümde Winkler zemini üzerine literatürde yapılmış çalışmalardan bir kısmı özet olarak verilmiştir.

Arifin & ark. (2020), rijit kaplamayı Winkler elastik zemini üzerine oturan kiriş olarak modellemiştir. Rijit yol üstyapı kaplamasında farklı mesnetlenme durumları, trafik yükleri ve farklı

yayıllı yük kombinasyonları için analiz etmişlerdir. Elastik zemine oturan Winkler modelinin genel olarak rijit kaplamalarla ilgili çözümlerde kullanılabileceği sonucuna ulaşmışlardır.

Jia & ark. (2018), düşey kuvvetler etkisi altında elastik bir temel üzerindeki sonlu dikdörtgen ince bir plağın analitik çözümünü elde etmeyi amaçlamışlardır. Winkler zemini üzerine oturan elastik ince plak teorisine dayalı bir model kurmuş ve bu plağın yer değiştirme ve gerilmelerini elde etmişlerdir. Hesaplamalarda hem Henkel dönüşümü hem de ters Henkel dönüşümü kullanmışlardır. Yer değiştirme ve gerilme sonuçlarının karayolu tasarım-kaplama yönetmeliğine uygun olduğunu tespit etmişlerdir.

Zhang & Gao (2013), rijit yol üstyapılarında kayma demirlerinin tasarımını optimize etmek amacıyla tabakalar arasındaki teması göz önünde bulunduran Winkler zemini üzerinde uzanan çift tabakalı bir model kurmuşlardır. Derzler arası yük transferi, kayma demirlerinin iç gerilmeleri ve plak tabanındaki gerilmeler üzerinde, kayma demirlerinin çapının, boyunun, konumunun, betonla birleşiminin etkisini irdelemişlerdir. Kayma demirlerinin bu etkilerini sonuçlarda ayrıntılı olarak sunmuşlardır.

Vancura & ark. (2011), Westergaard'ın Winkler zemin üzerinde bulunan orta kalınlıktaki plak teorisine dayalı olarak mevcut bir geçirimli beton kaplamanın rijitlik ve yorulma davranışını analiz etmişlerdir. Çalışmalarında Sonlu elemanlar analizi yöntemini kullanmışlardır. Geçirimli beton kaplamanın geleneksel beton kaplamadan daha düşük elastisite modülüne sahip olmasına rağmen Westergaard modelinin geçirimli beton kaplamaların davranışını yeterince tanımladığı sonucuna ulaşmışlardır.

Li & ark. (2009), Winkler zemini üzerinde uzanan rijit bir kaplamadaki derzin yük aktarım etkinliğini değerlendirmişlerdir. Bu amaçla elastik zemine oturan plağın yüklenmiş ve yüklenmemiş olması durumları için çökme değerlerini analiz etmişlerdir. Ayrıca doğrulama yapabilmek için plakları sonlu elemanlar analizi ile modellemişlerdir.

Liang & ark. (2009), hareketli yükler altında sürekli donatılı beton yol kaplamalarının dinamik davranışını incelemişlerdir. Kaplamayı Winkler viskoelastik bir zemin üzerinde bulunan b genişliğinde ve sonsuz uzunlukta bir ortotropik ince plak olarak modellemişlerdir. Ters Fourier dönüşümü kullanılarak yükleme hızı, zeminin sönüm katsayısı ve donatı oranının kaplamanın düşey deplasmanı üzerindeki etkisini araştırıp sayısal sonuçlar elde etmişlerdir. İnceledikleri rijit kaplamadaki düşey deplasmanların yükleme hızının artması ile azaldığı, viskoelastik sönümlenmenin yükleme hızı ile benzer etkiye sahip olduğu ve donatı oranındaki artışın da düşey deplasmanı azalttığı sonuçlarına ulaşmışlardır.

Rahman & Anam (2005), hareketli taşıt yükleri etkisi altındaki rijit beton kaplamaların dinamik analizini gerçekleştirmişlerdir. Kaplamayı sonlu elemanlar ile ayrıklaştırılmış kalın plaklar olarak, hareketli araç yükünü ise AASHTO tarafından önerilen bir teker yükü olarak modellemişlerdir. Taban zeminini Winkler ve iki parametrelili olmak üzere iki farklı şekilde modellemişlerdir. Tek bir tekerleğin beton kaplamaya etkisi üzerinde zemin rijitliği, taşıt hızı ve yapısal sönümün etkilerini parametrik olarak araştırmışlar. Winkler zemin için hem statik hem de dinamik analizler yaparken iki parametrelili zemin modeli için ise sadece dinamik analiz yapmışlardır. Sayısal analiz sonuçlarından Winkler zemin modeli ile yapısal tepkilerin olduğundan daha fazla tahmin edilebileceği ve bunun kaplama tasarımında büyük kesitlere yol açabileceği sonucuna ulaşmışlardır.

Razouki & Al-Muhanna (2005), 16 tekerlekli tandem aks yüküne maruz Winkler zemini üzerindeki beton kaplama plakta maksimum eğilme momentine karşı gelen çekme gerilmelerinin hızlı bir şekilde belirlenmesi için çizelgeler oluşturmuşlardır. Maksimum eğilmede çekme gerilmesi üzerinde taban zemini reaksiyon modülünün, beton elastisite modülünün, lastik basıncının, belirtilen aks yükünün büyüklüğü ve geometrisinin etkilerini ayrıntılı olarak incelemişlerdir. Lastik basıncı ve aks geometrisinin maksimum eğilmede çekme gerilmesi üzerindeki etkisinin önemsiz olduğu, yük büyüklüğü, aks aralığı, taban zemini reaksiyon modülü, beton

elastisite modülü ve plak kalınlığının ise önemli ölçüde etkili olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Kim & McCullough (2003), değişen genliğe sahip hareketli tandem aks yüküne maruz kalan viskoz Winkler zemin üzerindeki sonsuz plağın dinamik yer değiştirme ve gerilmelerini araştırmışlardır. Rijit ve esnek kaplamaları viskoz Winkler zemin üzerindeki bir plak olarak modellemişlerdir. Yüke yakın noktalarındaki çökme ve gerilme dağılımları ile maksimum çökme ve gerilme üzerinde ön ve arka aks yükleri arasındaki viskoz sönümlenmenin, yükleme hızının, yük frekansının ve fazın etkilerini incelemişlerdir. Zeminin viskozitesini dikkate alan analizlerden elde ettikleri sonuçların elastik sistemden elde ettiği sonuçlar ile farklı olduğunu belirlemişlerdir. Yüzey düzgünsüzlüğünden kaynaklanan yük genliği değişiminin ve ön ile arka aks yükleri arasındaki faz farkının maksimum çökme ve gerilmeyi önemli ölçüde büyütebileceğini tespit etmişlerdir.

Dauids (2000), derzli donatısız beton kaplama altındaki temel ve taban zemini malzemelerinin davranışını sonlu elemanlar yöntemini kullanarak incelemişlerdir. Analizlerde EverFE sonlu elemanlar programını kullanmışlardır. Aks ve termal yüklere maruz derzli donatısız beton kaplamaların tepkisi üzerinde temel tipinin ve özelliklerinin etkilerini inceleyen parametrik çalışmaların sonuçlarını sunmuşlardır.

Dauids & Mahoney (1999), rijit kaplamayı üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile analiz etmişlerdir. Analizlerde EverFE programını kullanmışlar ve derz yük aktarımı modelleme yeteneğini elde ederek deneysel verilerle karşılaştırarak doğrulamasını yapmışlardır. Modelde en alttaki tabakayı temsil etmesi için Winkler zeminini kullanmışlardır. EverFE'nin doğrusal olmayan, iki fazlı agrega kenetlenme bünye modelini kullanan sonlu eleman analiz sonuçlarının mevcut deneysel verilerle uyumlu olduğunu göstermişlerdir.

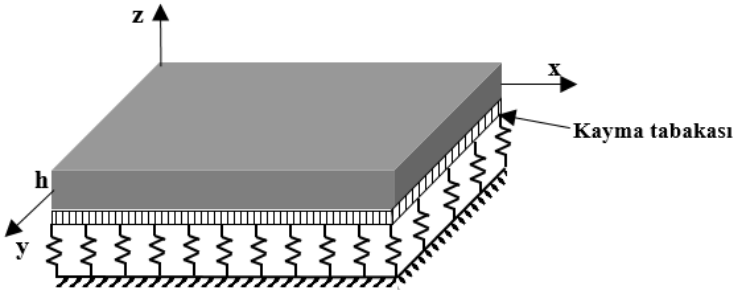
Huang & Wang (1974), kısmi taban zemini teması olan beton kaplamalardaki gerilme ve çökmeleri tanımlamak için sonlu

elemanlar yöntemini esas alan bir program geliştirmişler ve analizler yapmışlardır. Beton kaplamanın analizini taban zemini ile tam temas ve iki farklı kısmi temas durumu için gerçekleştirmişlerdir. Sundukları yöntemi Winkler zemini üzerindeki klasik ince plak teorisine dayandırmışlardır. AASHTO Yol testi ile elde ettikleri deneysel verileri sonlu elemanlardan elde ettikleri analiz sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Taban zemini ile kısmi temas durumu için elde ettikleri sonuçların tam temas durumuna nazaran deneysel veriler ile daha uyumlu olduğunu tespit etmişlerdir.

İki Parametrelili Modeller

Bu bölümde ise iki parametrelili zemin modellerine yer verilmiştir. Uygulamada bu modellerden en çok kullanılanları Pasternak, Filonenko- Borodich ve Vlasov modelleridir. Bu modellerde genel olarak diferansiyel denklemler eşdeğer olup yalnızca katsayıların hesabı değişmektedir. İki parametrelili zemin modellerinde Winkler zemininde kullanılan parametreye ilave olarak kiriş ile zemin arasındaki kayma etkilerini temsil eden ikinci bir parametre kullanılmaktadır.

Bu bölümde denklemler yalnızca Şekil 7’de gösterilen Pasternak zemin modeli için sunulmuştur.



Şekil 7. Pasternak modeline ait görsel (Li & ark., 2021)

Statik yükleme durumu için Pasternak zeminine oturan Kirchoff plağının kısmi diferansiyel denklemi Şekil 8’de sunulmuştur.

Pasternak Modeli (1954)
Statik

↓

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} - \frac{G_p}{D} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + \frac{k w}{D} = \frac{p(x,y)}{D}$$

Şekil 8. Statik yükleme durumu için Pasternak zeminine oturan Kirchoff plağının diferansiyel denklemi

Dinamik yükleme durumu için ise Şekil 8’de verilen diferansiyel denklem Şekil 9’deki hali almaktadır.

Pasternak Modeli (1954)
Dinamik Yükleme

↓

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} - \frac{G_p}{D} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + \frac{k w}{D} + \frac{m}{D} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{p(x,y,t)}{D}$$

Şekil 9. Dinamik yükleme durumu için Pasternak zeminine oturan Kirchoff plağının diferansiyel denklemi

Serbest titreşim durumu için ise Şekil 9’da verilen diferansiyel denklem Şekil 10’deki hali almaktadır.

Pasternak Modeli (1954)
Serbest Titreşim

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} - \frac{G_p}{D} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + \frac{kw}{D} + \frac{m}{D} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0$$

Şekil 10. Serbest titreşim durumu için Pasternak zeminine oturan Kirchhoff plağının diferansiyel denklemi

Literatürde İki Parametrelili Zemin Modelleri Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Bu bölümde iki parametrelili zemin modelleri üzerine literatürde yapılmış çalışmalardan bir kısmı özet olarak verilmiştir.

Reddy & Pradhan (1979), kenar yüklemesi için beton havaalanı pist kaplamalarındaki teorik çökme ve moment değerlerinin elde edilmesi amacıyla etki çizelgeleri elde etmişlerdir. Çalışmalarında beton kaplamanın üzerine oturduğu taban zeminini Filonenko-Borodich modeli ile idealize etmişlerdir.

Priono & Alisjahbana (2020), rijit kaplama plakların yerel patlama yüklerinden kaynaklanan dinamik analizini gerçekleştirmişlerdir. Rijit kaplama plağını her kenarının bir kayma-bağ demiri desteğine sahip olduğu sınır koşulu ile elastik Pasternak zemini üzerine oturan, ince plakların Kirchhoff teorisini kullanarak modellemişlerdir. İnceledikleri rijit kaplama plağını elastik, homojen ve ortotropik plak olarak modellemişler ve analizlerden eğilme moment, kesme kuvvetleri ve çökme değerlerini elde etmişlerdir. Analizlerin pozitif faz, negatif faz ve serbest titreşim olmak üzere üç yükleme fazı içerdiğini ifade etmişlerdir. Genel olarak, çökmenin azalmasında en önemli etkiye sahip olan parametrenin, ilk sırada plak kalınlığı olduğu, bunu plağın kenarına

doğru meydana geldiğinde patlamanın konumunun takip ettiğini ve en son olarak da destek zemin tabakasının rijitliğinin etkili olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Kedia & Suman (2017), statik ve dinamik etkiler için elde edilen yer değiştirmeleri karşılaştırarak rijit kaplama üzerindeki dinamik yüklerin önemini vurgulamışlardır. Rijit kaplama üzerinde sabit hızla hareket eden çeyrek kamyon modeli aracılığıyla oluşturdukları zamanla değişen sinüzoidal yükün etkisini ele almışlar ve hem dinamik hem de statik durum için iki ve tek parametrelili model üzerinde rijit üstyapıda oluşan çökme sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Taban zemini için Pasternak zemin modelini kullanmışlardır. Farklı uzunluklarda sonlu kiriş elemanlar olarak temsil edilen rijit kaplamanın dinamik analizi için sonlu elemanlar prosedürünü uygulamışlardır. Üstyapı yer değiştirmelerini uzunluk, kalınlık, kayma modülü ve taban zemini modülünün çeşitli kombinasyonları için hesaplamışlardır. Aynı uzunluk ve kayma modülü değerinde, taban zemini modülünün ve kiriş kalınlığının artmasıyla kaplamanın maksimum çökme değerinin azaldığını bununla birlikte aynı taban zemini modülü ve sabit uzunlukta, artan kayma modülü ile yine maksimum çökme değerinin azaldığını tespit etmişlerdir. Dinamik durumda oluşan maksimum çökmenin statik durumdaki değerinden daha fazla olduğunu bu nedenle kaplama tasarımı için dinamik analizin önemli olduğunu ifade etmişlerdir.

Alisjahbana & Wangsadinata (2015), hareketli trafik yükleri altında rijit karayolu kaplamaların dinamik analizi için Modifiye Bolotin Yöntemine dayalı analitik bir çözüm sunmuşlardır. Rijit karayolu kaplamasını, elastik Pasternak zemini üzerine oturan ortotropik homojen elastik dikdörtgen bir plak olarak modellemişlerdir. Hareketli yüke maruz Pasternak zemini üzerine oturan plakların dinamik tepkisi üzerinde elastik zemin rijitliği, yükleme hızı ve hareketli yükün yükleme frekansı gibi birçok faktörün etkisi olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca teorinin gerçek yükleme koşulları altındaki rijit karayolu kaplamalarına uygulanabilirliğini gösteren sayısal bir örnek sunmuşlardır. Taban zemini rijitliğinin artmasıyla plağın dinamik tepkisinin azaldığı ve

plağın merkezindeki mutlak maksimum dinamik çökmenin ise aracın hızı kritik hıza yakın olduğunda meydana geldiği sonucunu elde etmişlerdir.

Patil & ark. (2013), hareketli yükler altında rijit yol üstyapıların dinamik analizi için iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemine dayalı bir çözüm algoritması sunmuşlardır. Beton kaplamayı sonlu ve sonsuz plak elemanlar ile ayrıklaştırılmış ve alttaki zemin ortamını Pasternak modeli ile modellemişlerdir. İki parametrelili zemin ortamı üzerine oturan sonlu ve sonsuz uzunluktaki kaplamalar için farklı hızlara göre ayrıntılı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca kaplamanın tepkisi üzerinde zemin modülü, kayma modülü, üstyapı kalınlığı ve araç-üstyapı etkileşiminin etkisini de değerlendirmişlerdir. Elde ettikleri sonuç grafiklerinde herhangi bir pik noktasındaki kritik hızların ve karşılık gelen maksimum çökmelerin, sabit bir zemin modülü ve kayma modülü için kaplama kalınlığındaki artışla azaldığını, ayrıca herhangi bir pik noktasında sabit zemin modülü ve kaplama kalınlığı için kayma modülündeki artışla birlikte kritik hızın arttığı ve buna karşılık gelen maksimum sapmanın da azaldığını tespit etmişlerdir.

Wangsadinata & ark. (2011), rijit beton yol kaplamaların, beton plağı ile derzlerinde kullanılan kayma ve bağ demirlerinden oluşan bağlantı elemanlarındaki kuvvetlerinin belirlenmesini içeren dinamik trafik yükleri altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Dikdörtgen plağı, elastik düşey mesnet ve dönme kısıtlamasını temsil eden çelik kayma ve bağ demirleri tarafından sağlanan sınır destekleri ile sürekli bir Pasternak zemin tarafından desteklenen elastik homojen ortotropik plak olarak modellemişlerdir. Dinamik hareketli trafik yükünü plak üzerinde keyfi bir yönde sabit hızla hareket eden ve harmonik olarak değişen büyüklükte konsantre bir yük olarak ifade etmişlerdir. Dinamik bir trafik yükü altında rijit bir beton kaplamanın dinamik davranışını gösteren sayısal bir örnek sunmuşlardır. Çözmüş oldukları sayısal örnek ile dikdörtgen rijit bir beton kaplama plağının dinamik trafik yüklerine vereceği dinamik tepkisi için matematiksel bir kapalı çözüm bulmanın mümkün olduğu sonucuna varmışlar ancak sonuçların özellikle derzlerde

bulunan çelik bağlantı elemanlarındaki kuvvetlerin belirlenmesine yönelik deneysel araştırma sonuçları kullanılarak doğrulanması gerektiğini öne sürmüşlerdir.

Patil & ark. (2010), hareketli araç veya uçak yükleri altındaki rijit kaplamaların statik analizi için sonlu elemanlar yöntemine dayalı geliştirilmiş bir çözüm algoritması sunmuşlardır. Beton kaplamayı sonlu ve sonsuz kiriş eleman olarak ayırtmış ve alttaki zemin ortamını yay elemanları arasında kayma etkileşimine izin veren Pasternak modeli ile modellemişlerdir. Kiriş uzunluğu, kayma modülü ve farklı yükleme konumları gibi parametrelerin kirişin tepkisi üzerindeki etkisini incelemek için parametrik analizler gerçekleştirmişlerdir. Doğrulama yapmak için merkezi yükleme altında kirişin çökme ve eğilme momentlerini baz almışlardır. Sonlu ve sonsuz kirişler için analitik ve sonlu eleman sonuçları arasında çok iyi bir uyum olduğunu gözlemlemişlerdir. Parametrik çalışmalar neticesinde kiriş uzunluğunun artması ile merkezi çökme ve momentin sabit değerlere yaklaştığı, kayma modülündeki artış ile birlikte merkezi çökme ve moment değerlerinin azaldığı ve bu değerlerin her ikisinin de sonlu kiriş için sonsuz kirişe kıyasla daha yüksek olduğu sonucunu elde etmişlerdir.

Shi ve diğ. (1999) düşey yükler altındaki üç tabakalı beton yol kaplamaların yapısal analizi için süperpozisyon yöntemi kullanılarak analitik bir model geliştirmişlerdir. Kaplama plaklarının ve taban zemininin davranışını tanımlamak için sırasıyla Reissner kalın plak teorisini ve Pasternak zemin modelini kullanılmışlardır. Türetilen çözümleri, sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen çözümlere karşı sayısal örnekler kullanılarak doğrulamışlar ve çözümler arasında hem çökme hem de eğilme gerilmelerinin büyüklükleri ve dağılımları açısından çok iyi bir uyum olduğu sonucunu bulmuşlardır.

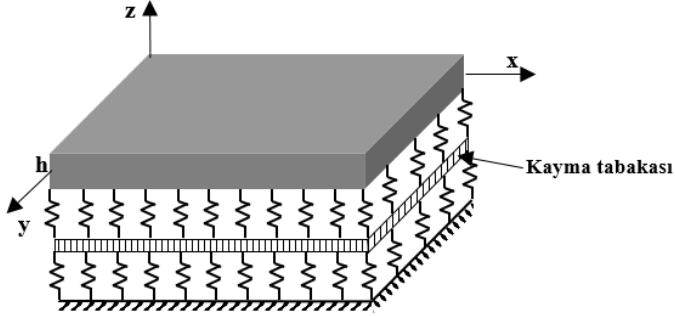
Fwa & ark. (1996), uygulanan yükler ve termal yüklemelerin etkisi altındaki beton kaplamanın tepkilerini Pasternak zemin modelini kullanarak incelemişlerdir. Pasternak zemini üzerine oturan plakların yapısal tepkileri için geliştirilmiş olan teorik

çözümleri kullanarak öngörülen plağın çökme ve eğilme gerilmelerini hesaplamışlar ve gerçek saha verileriyle karşılaştırmışlardır. Winkler zemin çözümleri ve Pasternak zemin çözümleri ile yaptıkları kaplama tepkisi tahminlerini karşılaştırarak ölçülen değerlerle kontrol etmişlerdir.

Shi & ark. (1993) Pasternak zemini üzerine oturan beton kaplama plaklarındaki çarpılma gerilmeleri için yeni bir çözüm sunmuşlardır. Plağı klasik ince plak teorisi (doğrusal elastik, izotropik ve homojen) kullanarak, taban zeminini de Pasternak zemini olarak modellemişlerdir. Deneysel ölçümlerle yapılan karşılaştırma ile sunulan çözümün Winkler zemin çözümü kullanılarak elde edilenlerden daha doğru çarpılma gerilmeleri ürettiğini, geleneksel çözümün çarpılma gerilmelerini olduğundan fazla tahmin ettiğini, bilinen bir sıcaklık gradyanı ve plak boyutları göz önüne alındığında, beton kaplamalardaki çarpılma gerilmelerinin taban zemini kayma modülünün artması ile arttığı sonucunu ifade etmişlerdir.

Üç Parametrelî Modeller

Zeminin plak veya kirişe olan etkisini daha gerçekçi temsil etmek adına zeminin etkisini üç parametre ile temsil etme yaklaşımı da ileriki yıllarda ortaya çıkmıştır. Bu konuda bir dizi öneri yapılsa da bunlardan uygulamada kabul gören Kerr modeli en yaygın kullanılan modeldir. Şekil 11'de Kerr modelinin şekil olarak gösterimi verilmiştir.



Şekil 11. Kerr modeline ait görsel (Li & ark., 2021)

Kerr modelinin statik yükler altındaki diferansiyel denklemi ise Şekil 12’de verilmiştir.

Kerr Modeli (1964)
Statik

$$\left(1 + \frac{k}{c}\right)p(x, y) - \frac{G}{c} \nabla^2 p(x, y) = kw(x, y) - G\nabla^2 w(x, y)$$

Şekil 12. Statik yükleme durumu için Kerr modeli

Literatürde Üç Parametrelili Zemin Modelleri Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Bu bölümde üç parametrelili zemin ile ilgili literatürde yapılmış çalışmalara yer verilmiştir.

Alisjahbana & ark. (2018), sabit hızlı hareketli trafik yüklerine maruz kalan rijit yol kaplamalarının dinamik davranışlarını incelemiştir. Rijit yol kaplamasını, elastik bir Kerr zemini

tarafından desteklenen sönümlü dikdörtgen ortotropik bir plak olarak düşünmüşler ve yarı rijit sınır koşullarına sahip ortotropik plağın dinamik çökmesinin yarı analitik çözümlerini diferansiyel denklemler kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Zemin tiplerinin, zemin rijitlik modellerinin, değişen sabit hızların ve yükleme frekanslarının plakların dinamik tepki davranışları üzerindeki etkilerini incelemek için sayısal çalışmalar yapmışlardır. Dinamik tepki ve rezonans hızının elastik zemin rijitliğinden önemli ölçüde etkilendiğini belirtmişlerdir. Ayrıca Kerr modelindeki rijit yol kaplamasının maksimum dinamik çökmesinin Pasternak modeline kıyasla önemli ölçüde azaldığını ve bunun rijit yol kaplamasının temel tepkisini temsil etmek için kullanıldığında Kerr modelinin olası ekonomik kazancını gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Van Cauwelaert & ark. (2002), orta ve kenar yüklemelerine maruz bir beton plak için genel analitik çözüm sunmuşlardır. Kaplama plağını üç parametrelili Kerr zemin modeli üzerine oturan ince bir plak olarak ele almışlardır. Sundukları çözümün merkez veya kenar yükünden herhangi bir mesafede oluşan gerilme veya çökmeyi belirleme olanağı sağladığını ifade etmişlerdir.

Sonuç

Bu çalışmada rijit yol üstyapı kaplamalarının hesabında elastik zemin modelleri ele alınmıştır. Bu amaçla uygulamada yaygın olarak kullanılan tek parametrelili Winkler, iki parametrelili Pasternak modeli ve üç parametrelili Kerr modelleri tanıtılmış ve bu konularda literatürde yapılmış bir dizi çalışma kısaca özetlenmiştir. Rijit üstyapı kaplamalarının hesabında doğru modelin seçilmesi için bu modellerin davranışlarının iyi bilinmesi ve ona uygun olarak doğru modelin analizlerde kullanılması önemlidir.

KAYNAKÇA

Alisjahbana, S. W., & Wangsadinata, W. (2015). Dynamic response of rigid roadway pavement under moving traffic loads. In *The 8th International Structural Engineering and Construction Conference, Sydney, Australia*.

Alisjahbana, S. W., Alisjahabana, I., Kiryu, S., & Gan, B. S. (2018). Semi analytical solution of a rigid pavement under a moving load on a Kerr foundation model. *Journal of Vibroengineering*, 20(5), 2165-2174.
<https://doi.org/10.21595/jve.2018.20082>

Arifin, S., Dolu, A., & Rivani, A. (2020). Elastic Foundation Beam Analysis on Rigid Pavement and Piles. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 331, p. 05005). EDP Sciences.
<https://doi.org/10.1051/mateconf/202033105005>

Davids, W. G., & Mahoney, J. P. (1999). Experimental verification of rigid pavement joint load transfer modeling with EverFE. *Transportation Research Record*, 1684(1), 81-89.
<https://doi.org/10.3141/1684-10>

Davids, W. G. (2000). Foundation modeling for jointed concrete pavements. *Transportation research record*, 1730(1), 34-42. <https://doi.org/10.3141/1730-05>

Filonenko-Borodich, M. M. (1940). Some approximate theories of elastic foundation. *Uchenyie Zapiski Moskovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Mekhanika*, 46, 3-18.

Fwa, T. F., Shi, X. P., & Tan, S. A. (1996). Use of Pasternak foundation model in concrete pavement analysis. *Journal of transportation engineering*, 122(4), 323-328.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1996\)122:4\(323\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1996)122:4(323))

Garber, N. J. & Hoel, L. A. (2010). *Traffic and Highway Engineering*. (Forth edition). Cengage Learning.

Hetenyi, M. (1950). A general solution for the bending of beams on an elastic foundation of arbitrary continuity. *J. Appl. Phys.*, 21(1), 55–58.

Huang, Y. H., & Wang, S. T. (1974). Finite-element analysis of rigid pavements with partial subgrade contact. *Transportation Research Record*, 485, 39-54.

Huang, Y. H., (2012). *Pavement analysis and design. (Second Edition-International Edition)*. Pearson Education.

Jia, L., Zhang, L., Guo, J., Yao, K., & He, S. (2018). Displacement and Stress Analysis of Thin Plate for Cement Concrete Pavement. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/3658540>

Kara, D., Bozdoğan, K. B., & Keskin, E. (2020). Çerçeve sistemlerin yapı zemin etkileşimli serbest titreşim analizi. *Politeknik Dergisi*, 23(4), 1347-1355. <https://doi.org/10.2339/politeknik.598627>

Kara, D., Bozdogan, K. B., & Keskin, E. (2021). A simplified method for free vibration analysis of wall-frames considering soil structure interaction. *Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal*, 77(1), 37-46. <https://doi.org/10.12989/sem.2021.77.1.037>

Kedia, N. K., & Suman, S. K. (2017) Dynamic Analysis of Rigid Pavement Resting on two Parametric Foundation. *International Conference on Transportation Infrastructure and Materials (ICTIM 2017)* ISBN: 978-1-60595-442-4.

Kerr, A. D. (1964). Elastic and viscoelastic foundation models. *J. Appl. Mech.*, 25(80), 491–498.

Kim, S. M., & McCullough, B. F. (2003). Dynamic response of plate on viscous Winkler foundation to moving loads of varying amplitude. *Engineering Structures*, 25(9), 1179-1188. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(03\)00066-X](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(03)00066-X)

Li, X., Hou, X., & Ma, S. (2009). Analysis of Deflection Load Transfer Efficiency of Rigid Pavement Joint on Elastic Foundation. In *International Conference on Transportation Engineering 2009* (pp. 2785-2790). [https://doi.org/10.1061/41039\(345\)459](https://doi.org/10.1061/41039(345)459)

Li, M., Soares, C. G., & Yan, R. (2021). Free vibration analysis of FGM plates on Winkler/Pasternak/Kerr foundation by using a simple quasi-3D HSDT. *Composite Structures*, 264, 113643. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113643>

Liang, S., Yang, X., Qi, T., & Liu, G. (2009). Dynamic Effects of Moving Vehicular Loads on Continuously Reinforced Concrete Pavements on Winkler Foundation. In *ICCTP 2009: Critical Issues In Transportation Systems Planning, Development, and Management* (pp. 1-8). [https://doi.org/10.1061/41064\(358\)333](https://doi.org/10.1061/41064(358)333)

Mallick, R.B. & El-Korchi, T. (2009). *Pavement engineering: principles and practice*. Published by CRC Press Taylor & Francis Group.

Papagiannakis, A. T., & Masad, E. A. (2008). *Pavement design and materials*. John Wiley & Sons.

Pasternak, P. L. (1954). On a new method of an elastic foundation by means of two foundation constants. Gosudarstvennoe Izdatelstvo Literaturi po Stroitelstvu I Arkhitekture, Moscow (in Russian).

Patil, V. A., Sawant, V. A., & Deb, K. (2010). Use of finite and infinite elements in static analysis of pavement. *Interaction Multiscale Mech. Int. J*, 3(1), 95-110. <https://doi.org/10.12989/imm.2010.3.1.095>

Patil, V. A., Sawant, V. A., & Deb, K. (2013). 2-D finite element analysis of rigid pavement considering dynamic vehicle-pavement interaction effects. *Applied Mathematical Modelling*, 37(3), 1282-1294. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.03.034>

Priono, A. B., & Alisjahbana, S. W. (2020, December). Dynamic Response of Rigid Pavement Plate due to Localized Blast Load. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1007, No. 1, p. 012057). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1007/1/012057>

Rahman, S. O., & Anam, I. (2005). Dynamic analysis of concrete pavement under moving loads. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 1(1), 1-6.

Razouki, S. S., & Al-Muhanna, R. R. (2005, November). Stress charts for rigid pavements loaded by 16-wheel tandem axles. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport* (Vol. 158, No. 4, pp. 219-230). Thomas Telford Ltd. <https://doi.org/10.1680/tran.2005.158.4.219>

Reddy, A. S., & Pradhan, B. N. (1979). Influence charts for rigid pavements for edge load. *Journal of the Indian Institute of Science*, 61(5), 105-121.

Shi, X. P., Fwa, T. F., & Tan, S. A. (1993). Warping stresses in concrete pavements on Pasternak foundation. *Journal of transportation engineering*, 119(6), 905-913. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1993\)119:6\(905\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1993)119:6(905))

Shi, X. P., Fwa, T. F., & Tan, S. A. (1999). Three-slab model for concrete pavements. *Journal of transportation engineering*, 125(5), 449-455. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1999\)125:5\(449\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1999)125:5(449))

Tunç, A. (2004). *Kaplama mühendisliği ve uygulamaları*. (1. Baskı) Ankara: Asil Yayın Dağıtım.

Van Cauwelaert, F., Stet, M., & Jasienski, A. (2002). The general solution for a slab subjected to centre and edge loads and resting on a Kerr foundation. *International Journal of Pavement Engineering*, 3(1), 1-18. <https://doi.org/10.1080/10298430290029894>

Vancura, M., MacDonald, K., & Khazanovich, L. (2011). Structural analysis of pervious concrete pavement. *Transportation research record*, 2226(1), 13-20. <https://doi.org/10.3141/2226-02>

Vlasov, V. Z., and Leont'ev, N. N. (1966). Beams, plates, and shells on elastic foundations. Trans. Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem.

Wangsadinata, W., Alisjahbana, S. W., & Baadilla, D. A. (2011). Dynamic Behaviour of Rigid Concrete Pavements under Dynamic Traffic Loads. In *EACEF-International Conference of Civil Engineering* (Vol. 1, pp. 159-159).

Winkler, E. (1867). Die Lehre von der Elastizität und Festigkeit, mit Besonderer Rücksicht auf ihre Anwendung in der Technik. H. Dominicus, Prague, Czech Republic.

Zhang, Y., & Gao, L. (2013). Mechanical analysis of dowel bar setting considering interlayer contact of rigid pavement. In *ICTE 2013: Safety, Speediness, Intelligence, Low-Carbon, Innovation* (pp. 2823-2828). <https://doi.org/10.1061/9780784413159.409>

BÖLÜM VIII

Polimerik Kompozitler için Bazı Geleneksel ve Yenilikçi Alev Geciktiricilerdeki Gelişmeler

Ceyda BİLGİÇ¹
Şafak BİLGİÇ²

Giriş

Kompozit malzemeler temel olarak metal kompozitler, seramik kompozitler ve polimer kompozitler olmak üzere üç kategoride sınıflandırılmaktadır. Bu üç türden polimer kompozitler, düşük ağırlık/mukavemet oranları nedeniyle otomobiller, uçaklar, uzay araçları, tekneler, gemiler, inşaat, ambalajlama, spor malzemeleri vb. alanlarda yaygın kullanım bulmaktadır (Dittenber & Ganga Rao, 2012; Holbery & Houston, 2006; Oprisan & ark., 2010). Polimerik kompozit malzemelerin kullanımı, iyi mekanik

¹ Doç Dr., Kimya Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, Orcid No: 0000-0002-9572-3863

² Dr. Öğr. Üyesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, Orcid No: 0000-0002-9336-7762

davranışları, kimyasal dirençleri ve korozyon direnci davranışları nedeniyle katlanarak artmaktadır, ancak yangın direnci davranışları polimerik kompozit malzemelerin kullanımında ciddi bir güvenlik sorunu ortaya çıkarmaktadır. Kimyasal olarak tüm polimerik malzemeler hidro-karbon zincirlerinden oluşur ve ateşe maruz kaldıklarında yüksek miktarda ısı, alev ve duman açığa çıkararak hızla yanarlar (Cullis & Hirschter, 1981; Camino & ark., 1991).

Cam, karbon, aramid ve bor elyafları gibi sentetik elyaflarla güçlendirilmiş polimerik kompozitler, yüksek mekanik performansları nedeniyle mühendislik uygulamalarında yaygın ve yoğun bir şekilde kullanılmaktadır (Feih & ark., 2011). Bununla birlikte, sentetik elyaf takviyeli kompozitlerin olumsuz çevresel etkileri, bozunmamaları ve zayıf geri dönüştürülebilirlikleri nedeniyle bir endişe kaynağı olmuştur. Bu nedenlerle, doğal lifler, doğal kaynaklar, düşük kirletici emisyonu, gelişmiş enerji geri kazanımı, biyolojik olarak parçalanabilirlik (Kim & ark., 2014) ve yüksek spesifik sertlik ve mukavemet değerleri (Mohanty & ark., 2000) gibi çevresel avantajları nedeniyle kompozitlerde sentetik liflere alternatif takviyeler olarak kabul edilmektedir. Geri dönüştürülebilirlikleri de doğal elyaf kompozitlerin sürdürülebilirlik yönünü daha da geliştiren ek bir avantajdır (Bourmaud & Baley, 2007). Ayrıca, doğal elyafların hidrofobik polimerlerle uyumsuzluğu da kimyasal modifikasyonlar dahil edilerek veya uyumlaştırıcılar eklenerek aşılmış ve sonuçta ortaya çıkan kompozitlerin mühendislik uygulamaları için arzu edilen özel mekanik performansı elde edilmiştir (Kalia & ark., 2009; Keener & ark., 2004). Doğal liflerin nem emilimi, liflerin polaritesini değiştirebilen alkali işlem veya asetilasyon ile de azaltılabilir (Wrongsriaksa & ark., 2013).

Ateş, insanlığın çok önemli bir icadıdır. Ancak yangın kazaları her yıl Amerika Birleşik Devletleri'nde yaklaşık 4.000, Avrupa'da ise 5.000 kişinin ölümüne ve gayrisafı yurtiçi hasılanın (GSYİH) yaklaşık %0,3'ünün kaybına neden olmaktadır (Antos & Sedlar, 2005). Merkezi Cenevre'de bulunan sivil toplum kuruluşu Uçak Kazaları Kayıt Ofisi (ACRO), 2001-2010 yılları arasında

15962 ölümle sonuçlanan 1662 resmi uçak kazası kaydı bildirmiştir. Farklı uçak kazalarının nedenleri analiz edildikten sonra, polimerik kompozit malzemelerin yangın direncinin artırılmasının kazaların şiddetini azaltabileceği bulunmuştur (Sarkos, 1996; Lacane & ark., 2015). Bu nedenle, polimerik kompozit malzemelerin herhangi bir alev geciktirme (FR) işlemi uygulanmadan kullanılması insan güvenliği için tehlikelidir. Son zamanlarda, Avrupa Topluluğu ve Amerika Birleşik Devletleri hükümeti de dahil olmak üzere gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin tüm hükümetleri, tüketicilerde güvenlik bilincini artıran farklı uygulamalar için FR-kompozit malzemelerin kullanımı konusundaki endişelerini dile getirmiştir. Şubat 1987'de, denizaltılarda kullanılan malzemelerin yangın ve toksisite gereksinimleri için bir askeri standart taslağı yayınlanmıştır. 1989 yılında NAVSEA tarafından denizaltılarda gövde, makine ve diğer yapısal uygulamalarda kullanılan kompozit malzemeler için yangın ve toksisite test yöntemi için başka bir taslak yayınlanmıştır (Draft, 1987; Sorathia & ark.,1992; Bar & ark., 2015).

Çeşitli avantajlarına rağmen, mühendislik uygulamaları için doğal elyaf kompozitlerin kritik bir sınırlaması, düşük yangın direncidir. Özellikle, bitki liflerinde ve hidrokarbon bazlı polimerlerde selüloz bulunması, kompozitlerin yüksek yanıcılığa sahip olmasına yol açmaktadır. Genel olarak, polimerler 300-500 °C'de gaz ve yoğunlaştırılmış fazlarda ayrışarak yanıcı gazlar, sıvılar, char ve duman üretir (Price & ark., 2001). Önemli miktarda ısı ve duman salınımı da sırasıyla yangının yayılmasına ve görüş mesafesinin azalmasına katkıda bulunarak insanlar için ciddi risklere ve büyük bir mal kaybına neden olabilir (Bhattacharyya & ark., 2015). Ayrıca, ısıtma altında elyaf takviyesinin ve polimer matrisinin yumuşama ve sünme davranışı, yük taşıyan kompozit yapıların bükülmesine ve bozulmasına neden olarak yapısal bütünlüğün kaybına yol açabilir. Bu nedenle, kompozitlerin yangına karşı hassasiyeti, toplu taşıma ve altyapı uygulamalarındaki katı standartlar tarafından kabul edilmelerini belirlemede hayati bir konudur. Özellikle Havacılık Yönetmelikleri, uçak iç mekanları için kompozit panellerin yangın performansını belirlemek için her bir

testin sıkı sınırlarını belirlemek için dikey yanma sonuçları, ısı salınımı ve duman yoğunluğu ölçümleri gibi üç yanıcılık kriteri gerektirmiştir. Aynı zamanda, Bina Yönetmelikleri, yapı malzemelerindeki uygulamalara izin vermek için koni kalorimetre parametrelerini kullanarak karmaşık bir prosedür izlemiştir. Bu iki standardın detayları çalışmanın ilerleyen bölümlerinde ele alınacaktır. Bu sebeplerle, yanma özelliklerini iyileştirmek ve doğal elyaf takviyeli kompozitlerin uygulanabilirliğini genişletmek için alev geciktirici işlemler çok önemlidir. Bazı çalışmalar, alev geciktirici (FR) veya alev geciktirici elyafların dahil edilmesinin doğal elyaf kompozitlerin yanma sürecini (ısıtma, ayrışma, tutuşma, yanma ve alev yayılımı) etkili bir şekilde engelleyebileceğini belirtmiştir; ancak bu genellikle mekanik özelliklerde kayıplar pahasına gerçekleşmektedir (Azwa & ark., 2013; Arao & ark., 2014). Bu nedenle, kompozitlerin mekanik ve yangın performansları arasında bir denge bulmak zor bir iştir ve bu nedenle doğal elyaf kompozitlerin alev dayanımları, son zamanlarda hak ettiği ilgiyi görmesine rağmen fiziksel ve mekanik özelliklerden daha az ilgi görmüştür (Lee & ark., 2014).

Kompozitlerin yangın performansını ölçmek için kapsamlı bir deney seti maliyetli ve zaman alıcı olabilir. Özellikle, oda köşe testi gibi büyük ölçekli yangın testleri, yangın senaryosunu bir binada uygulamak ve güvenilir veriler elde etmek için gelişmiş tesislere sahip özel ortamlar gerektirir. Elde edilen deneysel sonuçlar da gerçek hayatta meydana gelen karmaşık senaryoyu her zaman yakalayamaz. Bu nedenle, yanan bir kompozitin termo-yapısal tepkisini tahmin etmek için modellerin geliştirilmesi, kompozitlerin yangın kaynaklı hasar süreçleri hakkında bir fikir sağlamak için gereklidir (Nguyen & ark., 2014).

Günümüzde çevre bilincinin artmasıyla birlikte, teknoloji uzmanları ve bilim insanları tarafından biyolojik olarak parçalanamayan elyafların (karbon, cam, aramid vb.) biyolojik olarak parçalanabilen doğal elyaflarla (jüt, keten, sisal vb.) değiştirilmesi için önemli bir çaba sarf edilmektedir. Polimerik malzemeler gibi, bu doğal lifler de çok hızlı yanar, bu nedenle

kompozit malzeme için alev geciktirme işlemi güvenli hizmet için gereklidir. Bu çalışmada, polimerik kompozit malzemelerin alev yayılımı ve geciktirme mekanizmaları, FR-kompozitlerin geliştirilmesine yönelik farklı yaklaşımlar ve alev geciktirici maddelerle işlem yapmanın diğer kompozit özellikler üzerindeki etkisi anlaşılmaya çalışılmıştır.

Bu çalışma, polimerik kompozitler için geleneksel ve yenilikçi alev geciktiricilerde polimerlerin ve kompozitlerinin termal ve yanıcılık özelliklerine genel bir bakış sunmaktadır. Çalışmada, polimerlerin ve kompozitlerinin termal ayrışması ve yanması tartışılmakta, doğal kaynaklara dayalı bazı geleneksel ve yenilikçi alev geciktiriciler, doğal elyaf kompozitlerin yangın performansı üzerindeki etkileriyle birlikte sunulmaktadır. Ayrıca, bu kompozitlerin özel uygulamaları, ulaşım araçlarının iç kısımları ve bina altyapı ürünleri bağlamında yanıcılık standartları ile birlikte sunulmaktadır.

Polimerlerin ve Polimerik Kompozitlerin Alevlenebilirliği

Termoset, termoplastik ve biyopolimerler de dahil olmak üzere doğal elyaf takviyeli kompozitlerde kullanılmak üzere çeşitli polimerler mevcuttur. Bu polimerlerin yanıcılık özellikleri farklıdır ancak hepsi değişen derecelerde yanıcıdır (Horrocks & Kandola, 2005). Polimerler ısıya maruz kaldıklarında termal ve termal-oksidatif ayrışmaya uğrarlar (Mark & ark., 1975; Mouritz & Gibson, 2006). Başlangıçta ısı, duman ve uçucu maddeler üretilir. Uçucular, monomerler, hidrokarbonlar ve karbon monoksit gibi yanıcı uçucular ile karbon dioksit, hidrojen halojenürler ve diğerleri gibi yanıcı olmayan gazların bir karışımından oluşur. Üretilen uçucular polimerin kimyasal yapısına bağlıdır. Oluşan yanıcı uçucular, polimerin daha fazla ayrışmasında ve sürekli yanmasında rol oynayan oldukça reaktif H* ve OH* radikalleri üretmek için oksijenle temas eder. Bazı polimerler termal ayrışma sırasında tamamen parçalanabilirken, diğerleri karbonlu veya inorganik kalıntılar oluşturabilir. Termal ayrışma ürünleri, hızı ve

mekanizmaları sadece polimerin kimyasal bileşimine değil aynı zamanda fiziksel özelliklerine de bağlıdır (Hirschler, 2000).

Camsı geçiş, erime ve ayrışma sıcaklıkları gibi fiziksel özellikler termal ayrışma süreçlerini etkiler, çünkü bu sıcaklıklarda polimer faz geçişlerine uğrar ve bu da termal iletkenlik, viskozite, yoğunluk ve modül gibi fiziksel özelliklerde değişikliklere neden olur (Mark & ark., 1975). Birçok aromatik termoset polimerde, ayrışma sıcaklığı erime sıcaklığından daha düşüktür ve bu nedenle ayrışmadan önce ortaya çıkan fiziksel dönüşümler çok azdır (Hirschler, 2000).

ASTM D-2863'e (ASTM D 2863, 2008) göre ölçülen limit oksijen indeksi (LOI), genellikle farklı polimerlerin göreceli yanıcılığını göstermek için kullanılır ve LOI testinin parametreleri dahilinde, daha yüksek LOI'ye sahip bir polimer, daha düşük LOI'ye sahip bir polimerden daha düşük yanıcılığa sahip olacaktır (Mark & ark., 1975; Kourtides & ark., 1979).

Sunulan LOI değerlerinden, düşük LOI değerine sahip polivinil klorürün yanıcılık açısından bir matris polimeri olarak kullanım için uygun olduğu görülmektedir. Ancak polivinil klorür yandığında yoğun duman ve korozif hidrojen klorür gazı üretir ve bu da gemi ve uçaklarda nihai kullanıma yönelik kompozitler için matris malzemesi olarak kullanımını engeller (Lyons, 1970; Downton, 2012). Genel olarak, polimer yanıcılığının bir ölçüsü olarak LOI dikkatli kullanılmalıdır çünkü gerçek yangın durumlarında, ASTM D-2863 yöntemine göre LOI testinde kullanılanlara kıyasla daha düşük oksijen erişilebilirliği ve daha yüksek hava hızı ve sıcaklıkları gibi faktörler polimerin LOI'sini etkileyebilir (Mark & ark., 1975). Buna ek olarak, LOI ile ısı salınım oranı (HRR), duman yoğunluğu gibi diğer yangın özellikleri arasında çok az korelasyon vardır (Mouritz & Gibson, 2006).

Yanma sırasında char oluşumu, bir matris polimerin yanıcılık özelliğinin ölçülmesinde önemli bir kriterdir. Yüksek oranda çapraz bağlı olan fenolikler, ayrışma süreci sırasında çapraz bağlanmanın meydana gelebildiği polivinil klorür ve protein bazlı bir biyopolimer

olan kazein gibi polimerler yanma sırasında char oluşturur (Kandola & Kandare, 2008; Hirschler, 2000; Roff & Scott, 1971). Char, olası yanıcı uçucu maddeler pahasına oluşur ve aynı zamanda ısı kaynağı ile polimerin alt katmanları arasında bir ısı bariyeri görevi görür. Bu nedenle, char oluşturan bir polimer daha düşük bir yanıcılığa sahiptir ve bu açıdan bir matris polimeri olarak kullanım için daha fazla tercih edilirdir.

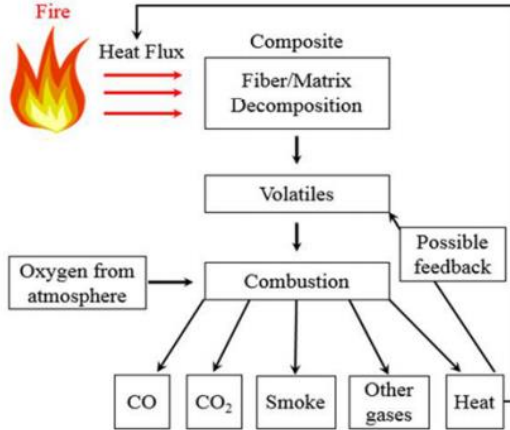
Manfredi ve arkadaşları, farklı polimer matrislerinin benzer yapıdaki jüt elyaf kompozitlerin tutuşabilirlik özellikleri üzerindeki etkisini göstermiştir. Modifiye akrilik kullanılan bir kompozitte, tutuşma süresi (TTI), pik ısı salınımı (PHRR) ve toplam ısı salınımı (THR), koni kalorimetre ile ölçüldüğü üzere sırasıyla 72 s, yaklaşık 920 kW/m² ve 74,2 MJ/m² olmuştur (Manfredi & ark., 2006). Polyester matris kullanan bir kompozit için karşılık gelen rakamlar 51 s, yaklaşık 525 kW/m² ve 77,6MJ/m² idi. Modifiye edilmiş akrilik-jüt kompozit, polyester-jüt kompozitten daha geç tutuşma ve daha düşük THR'ye sahipti, ancak daha yüksek bir PHRR'ye sahipti, bu da daha hızlı bir yangın büyümesine ve dolayısıyla bu kompozit için daha büyük bir yangın riskine işaret ediyordu. İki kompozit için ortalama spesifik alan sönmesi sırasıyla 225 ve 736 m² /kg idi. Modifiye akrilik kompozitten daha düşük duman üretimi, bu reçinenin daha fazla char oluşturma kabiliyetinden kaynaklanmıştır.

Polimer matris genellikle ısıya maruz kaldığında hızla bozunur (Methacanon & ark., 2010). Elyaf takviyesi, polimer kompozitlerin yüksek sıcaklıklardaki termal kararlılığını artırabilir. Bununla birlikte, doğal elyaflar sentetik elyaflara kıyasla daha yanıcıdır, bu nedenle doğal elyaf takviyeli kompozitler termal olarak daha az kararlı ve daha yanıcıdır (Beg & Pickering 2008).

Bir kompozitin yanıcılığı sadece matris polimerine ve elyaf türüne değil, aynı zamanda ikisi arasındaki etkileşime de bağlıdır (Kandola & Kandare, 2008) Cam, aramid veya grafit elyaflarla güçlendirilmiş kompozitlerin yanma davranışı üzerine bir dizi çalışma yapılmıştır (Hshieh & Beeson, 1996; Brown & ark., 1994). Çalışmalar, belirli kombinasyonların yanıcılığı azaltabileceğini,

diğerlerinin ise kompozitin yanıcılığını bileşenlere kıyasla artırabileceğini göstermiştir. Artış, bazı durumlarda, polimerden gelen erimiş bozunma ürünlerinin fiber takviyesi tarafından ısı kaynağı ile temas halinde tutulduğu bir 'iskele etkisi'nin sonucu olabilir (Kandola & Kandare, 2008; Schindler & Hauser, 2004).

Polimer kompozitlerin yanma altında termal ayrışması, Şekil 1'de açıklanan çok aşamalı bir olaydır. Bir kompozit ateşten kaynaklanan ısıya maruz kaldığında, çeşitli uçucu gazlara ve charlara ayrışmaya başlar. Uçucu gazların bazıları atmosferik oksijenle reaksiyona girerek yanma sürecini devam ettirir. Yanma ürünleri ısı ve karbon monoksit, karbon dioksit ve duman gibi gazlardır. Yanma sonucunda açığa çıkan ısı, ayrışma sürecini daha da destekler ve yanma döngüsü kendi kendini sürdüren bir süreç olarak çalışır. Polimer kompozitlerin tutuşabilirliği, yanma sürecine herhangi bir aşamada müdahale edilerek değiştirilebilir. Mevcut yangın geciktirici yöntemlerin çoğu, yanma sırasında char tabakaları oluşturarak ısı akışının durdurulmasına odaklanmaktadır (Chai & ark., 2012; Mouritz & Gibson, 2006; Lenza & ark., 2012; Guan & ark., 2015).



Şekil 1. Polimer kompozitlerin termal ayrışması (Hu ve ark., 2012; Sikoutris ve ark., 2015).

Farklı polimerik kompozit malzemelerin alev geciktirme mekanizmasını anlamak için öncelikle yanma mekanizmasını anlamak gerekir. Şekil 1, yanma döngüsünün şematik diyagramını ve kompozit malzemeler için olası alev geciktirme yaklaşımını göstermektedir. Herhangi bir malzemenin yanması üç bileşen gerektirir: ısı, oksijen ve yanan malzeme veya yakıt. Herhangi bir substrata ısı uygulandığında, substratın sıcaklığı artar ve kademeli olarak piroliz sıcaklığına (T_p) ulaşır. Bu sıcaklıkta, malzeme bir miktar char, sıvı kondensatlar ve bazı yanıcı ve yanıcı olmayan gazlar üretir. Sıcaklık yükselmeye devam ettikçe, sonunda bu yanıcı gazların oksijenle birleştiği ve büyük miktarlarda ışık, ısı ve duman ürettiği yanma sıcaklığına (T_c) ulaşılır. Yanma sonucu ortaya çıkan ısı, bu döngünün devam etmesine yardımcı olur (Camino & ark., 1991; Schindler & Hauser, 2004; Wichman, 2003).

Kompozitler için yaygın polimerik matrisler termoplastik ve termoset polimerlerdir. İki polimer türünün temelinde farklı yapıları termal ayrışma ve yanmayı etkilemektedir (Price & Horrocks, 2009). Doğrusal bir yapıya sahip olan termoplastik polimerler geri dönüşü olmayan çapraz bağlanma reaksiyonlarına girmezler, bunun yerine bozunma aşamasından önce ısı altında eriyip akarlar ve soğuduktan sonra yeniden katılaşırlar (Horrocks & Kandola, 2005). Öte yandan, termoset polimerler üç boyutlu çapraz bağlı bir moleküler yapı içerdiğinden, ısıtma altında şekillenmeleri engellenir (Price & ark., 2001). Polimerin yanması ısıtma, ayrışma, tutuşma ve yanma gibi farklı adımları içerir (Azwa & ark., 2013). Her iki polimer türü de ısıtmanın ilk adımında moleküler yapıların modifikasyonuna başlar. Daha fazla ısı, moleküler bağları kırmak ve piroliz aşamasında uçucu türler elde etmek için polimerleri ayrıştırır. Yüksek sıcaklık altında yanıcı ürünlerle bağ parçalanması sonucu oluşan serbest radikal, oksijen ortamında polimeri tutuşturur. Yeterli enerji ve yanıcı uçucu maddeler yanma döngüsünü oluşturabilir (Price & ark., 2001; Price ve Horrocks, 2009). Fenolik ve poliimid reçineler gibi doğal alev direncine sahip polimerler, yanma sırasında char oluşturabilir. Fenolik reçine, fenol-fenol yoğunlaşması nedeniyle su açığa çıkarır ve ardından metilen gruplarının oksidasyonu karbonil bağlantısına

yol açar. Daha fazla ayrışma CO, CO₂ ve diğer uçucuları serbest bırakır ve sonuçta char oluşur (Price & Horrocks, 2009).

Polimerik kompozit matrisleri genel olarak termoplastik matris ve termoset matris olarak iki ana kategoride sınıflandırılır. Hem termoplastik hem de termoset matrisler yangında hızla yanar ve bu polimerik malzemelerin alev geciktiriciliği üç farklı şekilde geliştirilebilir. Bunlar (i) polimer matrise alev geciktirici malzeme ekleyerek (ii) polimerik omurgaya alev geciktirici bir bileşik dahil ederek (iii) şişen sistemle. Nanopartiküller, mekanik özelliklerini iyileştirmek için polimer sistemlerine yaygın olarak eklenmektedir, ancak bazı çalışmalarda nanopartiküllerin polimerik sistemin yangın performansını artırabileceği bildirilmiştir. Bu nedenle nanopartiküllerin eklenmesi, polimer matrislerin yangın performansını iyileştirmek için başka bir yaklaşımdır.

Şişen alev geçiktirme mekanizması kavramı, termal bozunma sırasında polimer yüzeyinde genişlemiş karbonize bir tabaka oluşmasına dayanır. Bu tabaka, ısı kaynağından polimere ısı transferi için bir bariyer görevi görür ve aynı zamanda polimerden aleve doğru yakıt transferini ve oksijenin malzemeye difüzyonunu sınırlar. Bir şişen sistem temel olarak üç ana bileşenden oluşur: (i) bir asit kaynağı, (ii) bir karbonlaştırıcı madde ve (iii) bir şişirici madde. Bir şişen sistem yangına maruz kaldığında, kaynağa bağlı olarak, 150 °C ila 250 °C arasında bir miktar organik asit açığa çıkar ve bu da karbon bakımından zengin bileşenleri asit salınım sıcaklığının hemen üzerinde esterleştirir. Esterleşme sırasında veya öncesinde asit karışımı malzeme erir ve ardından dehidrasyon yoluyla ester ayrışarak karbon-inorganik bir kalıntı oluşturur ve aynı zamanda karbonize tabakanın genişlemesini tetikleyen bazı gazlar da açığa çıkarır. Bu reaksiyonun tamamlanmasına yakın, eriyik bir jel haline gelir ve daha sonra çok hücreli köpük şeklinde katılaşır (Horacek & Grabner, 1996; Camino & ark., 1989).

Çok sayıda araştırmacı doğal liflerin ve polimerlerin termal davranışlarının kompozitlerin termal ayrışması ve yanıcılığı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Kompozitlerde doğal liflerin

varlığı, saf polimer matrislere (örneğin termoplastik (Borysiak & ark., 2006, Bertini & ark., 2013; Subasinghe & Bhattacharyya, 2014) ve termoset (Chai & ark., 2012) polimerlere) kıyasla HRR, toplam ısı salınımı (THR) ve duman üretimini bastırmıştır. Ayrıca, doğal lifler eklenerek kompozitlerin dikey ve yatay yanma oranları azaltılmıştır (Chai & ark., 2012; Jeenchan & ark., 2014). Öte yandan, kompozitler herhangi bir dikey yanma derecesi elde edememiş ve kenevir kumaş takviyeli epoksi kompozitin LOI sonucu, doğal elyafın yanıcılık üzerinde önemsiz bir etkisi olduğunu göstermiştir (Szolnoki & ark., 2015). Kompozitin yangın performansı, mühendislik uygulamalarına yönelik katı düzenlemeleri karşılamak için hala yetersizdir. Özellikle, dikey yanma deneyleri, kompozitlerin çoğunun 10 saniyelik alev uygulamasından sonra yandığını tespit etmiştir. Bu nedenle, arzu edilen yangın performansına ulaşma ihtiyacı, doğal elyaf bazlı polimerik kompozitlerde yangın geciktirme alanında çok sayıda araştırmayı teşvik etmiştir.

Doğal elyaf takviyeli kompozitler söz konusu olduğunda, Helwig ve Pauksza, farklı miktarlarda keten elyaf içeren polipropilen kompozitlerin yanıcılığı üzerine bir çalışma yürütmüştür (Helwig & Pauksza, 2000). Koni kalorimetre testinde, %12,5 keten lifi içeriğinde, pik ısı salınım oranının (PHRR) saf polipropilenden yaklaşık %35 daha düşük olduğunu bulmuşlardır. Saf polipropilenle karşılaştırıldığında, kompozitlerin tutuşma süresi daha kısaydı ve duman üretimi artmıştı. Kütle kaybı oranları (MLR'ler) daha düşüktü ancak numuneler daha uzun süre yandı. Çalışmaya göre, elyaf içeriği %20'nin üzerine çıktığında kompozitin özellikleri lignoselülozik malzemelere daha çok benzedi. Borysiak ve arkadaşları, %50 çam ağacı parçacıkları içeren polipropilen kompozitler üzerinde daha sonra yaptıkları bir çalışmada, kompozitlerin dolgunsuz polipropilene kıyasla daha kısa tutuşma süresine, daha düşük PHR ve MLR'ye sahip olduğunu bulmuşlardır (Borysiak & ark., 2006). Duman oluşumu biraz azalmıştır. Ayrıca polipropilenin eriyik akış indeksinin kompozitlerin tutuşabilirlik özelliklerini etkilediğini bulmuşlardır.

Kompozitin yanma davranışı büyük ölçüde matrisin ve takviye edici elyafların özellikleri ve bunlar arasındaki sinerjik veya antagonistik etkiler tarafından belirlense de, kompozitin yanıcılığı kompozitin yapısından da etkilenir (Kandola & Kandare, 2008; Kandola & Nazare, 2007). Örneğin kompozitin kalınlığı, yüzey yanıcılığını belirli bir sınır değere kadar etkileyebilir. Isı dalgası nüfuzunun numunenin kalınlığından daha az olduğu termal olarak kalın numuneler, tutuşma süresinde ve yanma süresinde artış gösterir. Termal olarak kalın numuneler için MLR'ler termal olarak ince numunelere kıyasla daha yavaş ve PHRR'ler daha düşüktür.

Çekirdek malzemeler, mevcut olduğunda, malzemenin türüne bağlı olarak eriyebilir, yanabilir veya charlaşabilir ve dolayısıyla kompozitin yanma özelliklerini de etkileyebilir (Kandola & Kandare, 2008). Örneğin tutuşma süresi, çekirdeğin termal iletkenliğinden ve çekirdek ile kaplama arasındaki temas ya da temassızlıktan etkilenebilir (Mouritz & Gibson, 2006).

Elyaf takviyesi ve matris polimeri arasındaki bağ, sadece mekanik özellikler için değil, aynı zamanda ısı ve ateşe maruz kaldığında kompozitin stabilitesi için de kritik öneme sahiptir. Elyaf ve matris arasındaki uyumluluğun artması kompozitin termal stabilitesini artırır (Horrocks & Kandola, 2005). Albano ve arkadaşları, poliolefin/sisal kompozitlerin termal stabilitesi üzerine yaptıkları bir çalışmada, asetillenmiş sisal elyafın işlenmemiş elyafa kıyasla daha yüksek bir aktivasyon enerjisine ve dolayısıyla daha yüksek termal stabiliteye sahip olduğunu bulmuşlardır (Albano & ark.,1999). Ayrıca, asetillenmiş elyaf içeren polipropilenin aktivasyon enerjisi ve maksimum ayrışma sıcaklığının, işlenmemiş elyaf içeren polipropilenden daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Asetillenmiş elyafın dahil edilmesinin, daha fazla polimer-elyaf etkileşiminin bir sonucu olarak poliolefin kompozitlerin daha fazla stabilitesine yol açtığı sonucuna varmışlardır.

Tüm yangınlar farklıdır ve yangının yoğunluğu veya gelen ısı akışı da bir kompozitin yanıcılık özelliklerini etkiler (Kandola & Kandare, 2008; Schartel & Hull, 2007). Bir yangının ilk aşaması

tutuşmadır. Tutuşma, yüksek gaz üretimi ve düşük ısı üretimi (için için yanan tutuşma) ile uzun bir süre boyunca veya alevli yanma ve yüksek ısı salınımı (alevli tutuşma) ile karakterize edilen kısa bir süre boyunca gerçekleşebilir. Alevli tutuşma, yakıt uçucu gazları ve havanın yanıcı karışımı yeterince yüksek bir sıcaklığa ulaştığında kendiliğinden (otomatik tutuşma) veya yanıcı karışım bir kıvılcım veya açık alev gibi lokalize bir ısı kaynağı tarafından tutuşturulduğunda pilot olarak gerçekleşebilir. Isı akısı ve ortam sıcaklıkları düşüktür, havalandırma yüksektir ve alevler nispeten küçüktür (510 cm). Yakıt türü, çevreyle etkileşim, yanma türü ve oksijene erişimden etkilenen dönüşümlü bir alevlenme ve için için yanma dönemi izleyebilir. Yangın daha sonra, genellikle yaklaşık 20 kW/m²'lik bir dış ısı akısında, yerleşik bir yanma noktasına kadar büyüyebilir. Yangın artık yaklaşık 20-60 kW/m² dış ısı akısı, daha yüksek ortam sıcaklıkları (700-900 K), devam eden yüksek havalandırma - yangın hala yakıt tarafından kontrol edilir ve büyük alevler (10-100 cm) ile karakterize edilen büyüme aşamasında olacaktır. Tam gelişmiş bir yangına geçiş, parlama noktası olarak bilinir ve bu 773-873 K bölgesindeki sıcaklıklarda meydana gelebilir. Tam gelişmiş bir yangın, yüksek ortam sıcaklıkları (4900 K), yüksek dış ısı akısı (450 kW/m²), düşük havalandırma - oksijen mevcudiyeti artık sınırlayıcı faktördür ve büyük alevler (4100 cm) ile karakterize edilir. Tam gelişmiş yangın, yakıt kaynağı tükenene kadar devam eder. Yangın daha sonra sıcaklıkların düştüğü bir çürüme dönemine girecek ve sonunda sönecektir.

Bu nedenle, ısı akısı gibi yangının özellikleri yangın süresince önemli ölçüde değişir ve sonuç olarak kompozitin yanıcılık özellikleri de değişecektir. Scudamore, koni kalorimetre testlerinde kalınlığın tutuşma süresi üzerindeki etkisinin daha yüksek ısı akışlarında (75 ve 100 kW/m²) büyük ölçüde ortadan kalktığını göstermiştir (Scudamore, 1994). Oksijenin mevcudiyeti de tutuşma süresini etkileyebilir - oksijen konsantrasyonuna ve kompozitin yapısına bağlı olarak tutuşma süresini artırır veya azaltır (Mouritz & Gibson, 2006).

Yangın geciktirme

Yangın geciktirme, malzemelerin daha yavaş bir hızda yandığı ve tutuşma olasılığının daha düşük olduğu bir olgudur (Price & ark., 2001). Doğal elyaf ve polimer bazlı kompozitler, bileşenlerin tutuşma sıcaklıklarının üzerinde kolayca tutuştuğundan ve ısı kaynağı ve oksijen altında yanmaya devam ettiğinden, yanıcılığı azaltmak ve katı düzenlemeleri karşılamak için yangın geciktirme zorunludur. Malzemenin yangın geciktirmesi, yanma döngüsündeki zincirleme dallanma reaksiyonlarını kırarak veya yavaşlatarak elde edilebilir. Ayrıca, kompozitlerin yangın geciktiriciliği, polimer matrisin, elyaf takviyesinin veya kompozitin bir bütün olarak yanıcılığını azaltarak geliştirilebilir.

Kompozit malzemelerin alev geciktiriciliği, yanma döngüsünü engelleyerek veya bozarak elde edilebilir. Kompozit malzemeler için yanma döngüsü üç farklı şekilde kesintiye uğratabilir. İlk olarak, ısıya maruz kaldığında endotermik olarak ayrılan ve böylece sıcaklığın kompozit malzemelerin piroliz sıcaklığına ulaşmasını önleyen bu tür kimyasallar dahil edilerek. İkinci olarak, piroliz reaksiyonu sırasında daha fazla yanıcı olmayan yan ürün ve daha fazla char üreten bu tür kimyasalları dahil ederek. Bu char tabakası, gaz ve yoğunlaştırılmış faz arasındaki ısı ve kütle transferini engelleyen fiziksel bir bariyer görevi görür. Bu mekanizma yoğunlaştırılmış faz mekanizması olarak bilinir. Üçüncü yöntem gaz fazı mekanizması olarak bilinir. Bu durumda yanma sırasında alev geciktirici kimyasallar alev bölgesindeki etkin oksijen konsantrasyonunun azalmasına yol açan daha fazla yanıcı olmayan gaz salar ve böylece bir alev geciktirme ajanı olarak hareket ederler (Camino & ark., 1991; Schindler & Hauser, 2004; Wichman, 2003; Camino & Costa, 1988).

Son kullanım alanlarına bağlı olarak, farklı sentetik ve doğal elyaflar, özellikle mekanik performansı arttırmak için polimerik matris sistemlerinin içine yoğun bir şekilde dahil edilmektedir. Günümüzde çevre bilincinin artmasıyla birlikte, mümkün olan her yerde biyolojik olarak parçalanabilen doğal elyafların

kullanılmasına çalışılmaktadır (Wambua & ark., 2003; Chabba & Netravali, 2005). Cam, karbon ve seramik elyaflar gibi sentetik elyaflar doğaları gereği FR'dir ancak doğal elyaflar oldukça yanıcıdır ve sentetik polimerlerin aksine ısı, ışık ve duman salınımı ile hızla yanarlar. Polimerik kompozitlerde takviye maddesi olarak kullanılan doğal lifler (jüt, sisal, rami, keten, vb.) çoğunlukla lignoselülozik yapıdadır. Bu lingoselülozik doğal liflerin tutuşabilirliği, uygun alev geciktirici kimyasalları ile muamele edilerek geliştirilebilir (Kozłowski & Władyska-Przybylak, 2008).

Doğal elyafların alev geçiktirme işlemi ya i) Pad-Dry-baking yöntemi ile ya da ii) Spraying-baking yöntemi ile ya da iii) Steeping-drying yöntemi ile gerçekleştirilmiştir (Bar & ark., 2015). FR ajanları kimyasal yapılarına, alev geciktirme prensibine, finisaj dayanıklılığına vb. göre farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Dayanıklılığa dayalı olarak, lignoselülozik malzemeler için FR-kimyasalları iki ana sınıfa ayrılır. Bunlar dayanıksız alev geciktiriciler ve dayanıklı alev geciktiricilerdir (Schindler & Hauser, 2004). Dayanıklı alev geciktiricilerle karşılaştırıldığında, dayanıklı olmayan alev geciktiriciler ucuz ve uygulaması kolaydır. Güçlendirilmiş elyaflar polimer matris sisteminin içinde kaldığından, dayanıklı olmayan alev geciktiriciler güçlendirici elyafların alev geciktirici işlemi için tercih edilir. İnorganik tuzlar, boraks ve borik asit karışımı, di-amonyum fosfat, amonyum sülfamat ve amonyum bromür gibi güçlü asitlerin amonyum tuzları dayanıksız alev geciktirici kimyasallara örnektir. Genellikle bu maddelerin %10-15 katı ilavesi lignoselülozik doğal elyafları alev geciktirici yapar.

Tetrakis (hidroksimetil) fosfonyum klorür, N-metilol dimetil fosfonopropiyonamid ile trymetilol melamin ve fosforik asit kombinasyonu vb. dayanıklı alev geciktiricilere örnektir (Schindler & Hauser, 2004). Farklı FR kimyasalları ile farklı elyaf-matris sistemleri için güçlendirilmiş elyafların FR işleminin kompozitlerin yanıcılığı ve diğer özellikleri üzerindeki etkisi oldukça kapsamlı bir şekilde çalışılmamıştır. Ancak, Shumao ve ark. rami elyafının yanı sıra poli (laktik asit) (PLA) matrisini amonyum poli fosfat (APP) ile

işlemden geçirmiş ve üç işlem kullanarak kompozitler hazırlamıştır (1) PLA, APP ile harmanlanmış ve ardından elde edilen karışım rami elyaflarıyla birleştirilmiştir (FPLA-NF); (2) rami, APP ile işlemden geçirilmiş ve ardından PLA ile birleştirilmiştir (PLA-FNF); ve (3) PLA ve rami, her ikisi de APP ile işlemden geçirilmiş ve birlikte harmanlanmıştır (FPLA-FNF) (Shumao & ark., 2010). Bu kompozit malzemelerin yangın performansı LOI ve UL94 test yöntemleri ile kontrol edilmiştir. UL94 testinde, hem FPLA-NF hem de FPLA-FNF kompozitleri V-0 derecesine ulaşmış ve her iki durumda da damlama gözlenmemiştir. FR işleminin rami elyaf takviyeli kompozit üzerindeki etkisi LOI test sonuçları ile açıkça anlaşılabilir. Kontrol numunesinin LOI değeri 19,1 iken PLA-FNF numunesinde 25'e, FPLA-NF numunesinde 28,1'e ulaştığı ve hem matris hem de takviye maddesi FR kimyasalları ile işlendiğinde, yani FPLA-FNF numunelerinde LOI değerinin 35,5'e ulaştığı gözlemlenmiştir.

Bir kompozite eklenebilecek iki tür FR vardır: katkı maddesi ve reaktif tipler. Katkı tipi FR, üretimleri sırasında fiziksel yollarla kompozitlere dahil edilebilir. Mineral dolgu maddeleri, hibrit veya organik bileşikler katkılı FR türüne aittir. Öte yandan, reaktif FR tipi polimer yapısını kimyasal olarak değiştirmek için kullanılır. Alev geciktirici elementler polimerin omurgasına veya fonksiyonel gruplarına yerleştirilebilir (Lu & Hamerton, 2002). Katkılı FR'ler, kolay ve doğrudan uygulanmaları nedeniyle hem termoplastik hem de termoset polimerlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, reçinelerin, elyafların ve sertleştirici ve bağlayıcı maddeler gibi diğer katkı maddelerinin kimyasal modifikasyonları, yangın geciktiriciliği geliştirmek için aktif olarak kullanılmaktadır (Kandola, 2012). Çok çeşitli alev geciktiricilerin ayrıntıları Refs'te ayrıntılı olarak rapor edilmiştir (Hull & ark., 2011; Alongi & ark., 2015; Zhang & Horrocks, 2003).

Sonuçlar

Bu çalışmada, polimer kompozitler için kullanılan ve literatürde incelenmiş ve rapor edilmiş geniş bir alev geciktirici sistem yelpazesi analiz edilmiş ve kategorize edilmiştir. Alev

yayımlı mekanizmaları ve farklı yangın söndürme yaklaşımları gözden geçirilmiştir. Kompozitlerin yangın performansını iyileştirmek için uyarlanabilecek farklı yaklaşımlar incelenmiş ve alev geciktirme malzemeleri eklendiğinde kompozitlerin özelliklerinin nasıl değiştiği araştırılmıştır.

Polimerik kompozit malzemelerin yangın performansını iyileştirmek için önemli miktarda çalışma yapılmış olmasına rağmen, daha fazla iyileştirme için hâlâ çok fazla alan bulunmaktadır. Literatürden, iyi kalitede alev geciktirici kompozitler elde etmek için polimer matris sistemine %15'ten fazla alev geciktirici (mikro boyutlu) eklenmesi gerektiği ve bunun da mekanik özelliklerini önemli ölçüde bozduğu görülmektedir. Bununla birlikte, halojen bazlı alev geciktiriciler daha düşük konsantrasyonlarda (metal hidroksit bileşiklerine kıyasla) kompozit alev geciktiriciliğini artırabilir, ancak şu anda bunlar çevresel tehlike davranışları nedeniyle yasaklanmaktadır. Nano boyutlu alev geciktiriciler daha düşük konsantrasyonlarda iyi alev geciktiricilik sağlar ancak bunlar da nano boyutları nedeniyle sağlığa zararlı yapıları dolayısıyla yasaklanmaktadır. Şişen alev geciktiriciler, kompozit malzemelerin alev geciktiriciliğini önemli ölçüde artıran yeni alev geciktirici malzeme türleridir, ancak bu tür malzemelerin daha da iyileştirilmesi için hâlâ çok fazla araştırma yapılması gerekmektedir.

Polimer kompozitlerin tutuşabilirliği, özellikle mevcut polimer matrislerinin kapsamlı çeşitliliği göz önüne alındığında, tek bir çözüm bulunamayan çok karmaşık bir bilimsel sorun olmaya devam etmektedir. Uygun alev geciktirici katkı maddelerinin seçimi, alev dayanıklı kompozitlerin oluşturulmasını destekler ve kullanım çeşitliliğini artırır. Polimerlerle nispeten düşük miktarlarda katkı maddelerinin kullanımı çok umut verici sonuçlar göstermektedir. Halojen olmayan alev geciktirici katkı maddeleri arasında fosfor ve azot bazlı bileşiklerin, özellikle omurgalarında oksijen veya azot atomları içeren matrislerde çok etkili çözümler olduğu kanıtlanırken, silikon bazlı katkı maddelerinin de verimli çözümler sağladığı görülmektedir. Bununla birlikte, kompozit malzemelerde alev

geciktiriciliğin iyileştirilmesi büyük bir görevdir, ancak en uygun alev geciktirici katkı maddelerinin etkili bir şekilde seçilmesi ve eklenmesi, aleve dayanıklı polimer kompozitlerin üretilmesine katkıda bulunacaktır.

Hidrokarbon polimerler ve yanıcı elyaflar nedeniyle kompozitlerin yüksek tutuşabilirliği, özellikle havacılık ve bina iç mekanları olmak üzere mühendislik uygulamaları için ana dezavantajlardan biridir. Bu çalışma, kompozitlerin yanma davranışını anlamak için polimerin termal özellikleri ve yanıcılık özelliklerine ilişkin kapsamlı veriler sunmuştur. Ayrıca, kompozitlerin ısı ve dumanını azaltmak için elyaf, polimer ve kompozitleri işlemek için alev geciktirici yöntemler araştırılmış ve kullanılmıştır. Özellikle, doğal elyafın, özellikle yangına dayanıklı yünün ve halojen içermeyen alev geciktiricilerin etkili char oluşumu, ısı ve dumanın önemli ölçüde azaltılması üzerindeki birleşik etkileri, diğer kompozitlerin yangın performansı ile karşılaştırılarak tanımlanmıştır. Diğer yandan, alev geciktirici katkı maddeleri, elyaf ve polimer matris arasındaki arayüzey adezyon davranışı genellikle bozulduğu ve alev geciktirici partiküllerinin varlığı yüklem altında gerilim konsantrasyonu yarattığı için kompozitlerin mukavemetleri üzerinde olumsuz etkilere neden olmuştur. Bununla birlikte, biyobazlı elyaf ile alev geciktirici polimer matrisi yüzey işlemleri kompozit mukavemet kaybını önleyebilmiş, ancak yine de mühendislik uygulamalarının alev gereksinimlerini karşılayamamıştır.

Bu nedenle, kompozitlerin mekanik performansı ve yanıcılığı arasında bir denge sağlamak için malzeme seçimi, alev geciktirici işlemler ve/veya üretim süreci ile ilgili daha yenilikçi araştırmalar yapılması gerekmektedir. Ayrıca, doğal elyafın su emme ve kaynaklara bağlı değişkenlik gibi doğal özelliklerinin termal ve yanma davranışı üzerindeki etkilerinin de kompozit yanıcılığını değiştirip değiştirmediğinin anlaşılması gerekir.

Kaynaklar

Albano, C., Gonzalez, J., Ichazo, M. & Kaiser, D. (1999). Thermal Stability of Blends of Polyolefins and Sisal Fibre, *Polymer Degradation and Stability*, 66: 179-190.

Alongi, J., Han, Z. & Bourbigot, S. (2015). Intumescence: Tradition versus novelty. A comprehensive review. *Progress in Polymer Science*, 51, 28-73.

Arao, Y., Nakamura, S., Tomita, Y., Takakuwa, K., Umemura, T. & Tanaka, T. (2014). Improvement on fire retardancy of wood flour/polypropylene composites using various fire retardants. *Polymer degradation and stability*, 100, 79-85.

Antos, K. & Sedlar, J. (2005). Influence of brominated flame retardant thermal decomposition products on HALS. *Polymer degradation and stability*, 90(1), 188-194.

ASTM D 2863 (2008). Standard Test Method for Measuring the Minimum Oxygen Concentration to Support Candle-like Combustion of Plastics (Oxygen Index), ASTM Publication, Philadelphia.

Azwa, Z. N., Yousif, B. F., Manalo, A. C. & Karunasena, W. (2013). A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres. *Materials & Design*, 47, 424-442.

Bar, M., Alagirusamy, R. & Das, A. (2015). Flame retardant polymer composites. *Fibers and polymers*, 16(4), 705-717.

Beg, M. D. H. & Pickering, K. L. (2008), Accelerated Weathering of Unbleached and Bleached Kraft Wood Fibre Reinforced Polypropylene Composites, *Polymer Degradation and Stability*, 93(10), 1939-1946.

Bertini, F., Canetti, M., Patrucco, A. & Zoccola, M. (2013). Wool keratin-polypropylene composites: Properties and thermal degradation. *Polymer degradation and stability*, 98(5), 980-987.

Bhattacharyya, D., Subasinghe, A. & Kim, N. K. (2015). Natural fibers: Their composites and flammability characterizations. *Multifunctionality of Polymer Composites*, 1(1), 102-143.

Borysiak, S., Paukszta, D. & Helwig, M. (2006). Flammability of Wood-Polypropylene Composites. *Polymer Degradation and Stability*, 91, 3339-3343.

Bourmaud, A. & Baley, C. (2007). Investigations on the recycling of hemp and sisal fibre reinforced polypropylene composites. *Polymer Degradation and stability*, 92(6), 1034-1045.

Brown, J.R., Fawell, P.D. & Mathys, Z. (1994). Fire-hazard Assessment of Extended chain Polyethylene and Aramid Composites by Cone Calorimetry. *Fire Materials*, 18, 167-172.

Camino, G. & Costa, L. (1988). Performance and mechanisms of fire retardants in polymers—A review. *Polymer degradation and stability*, 20(3-4), 271-294.

Camino, G., Costa, L. & Martinasso, G. (1989). Intumescent fire-retardant systems. *Polymer Degradation and Stability*, 23(4), 359-376.

Camino, G., Costa, L. & Di Cortemiglia, M. L. (1991). Overview of fire retardant mechanisms. *Polymer Degradation and Stability*, 33(2), 131-154.

Chabba, S. & Netravali, A. N. (2005). ‘Green’ composites part 1: characterization of flax fabric and glutaraldehyde modified soy protein concentrate composites. *Journal of materials science*, 40(23), 6263-6273.

Chai, M. W., Bickerton, S., Bhattacharyya, D. & Das, R. (2012). Influence of natural fibre reinforcements on the flammability of bio-derived composite materials. *Composites Part B: Engineering*, 43(7), 2867-2874.

Cullis, C. F. & Hirschler, M. M. (1981). *The combustion of organic polymers* (Vol. 5). Oxford University Press, USA, pp.1-10.

Dittenber, D. B. & Ganga Rao, H. V. (2012). Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 43(8), 1419-1429.

Downton, P. (2012). Polyvinyl chloride (PVC)-its use in construction. *Environment Design Guide*, (71), 1-8.

Draft, M. S. (1987). Fire and Toxicity Performance Requirements for Composite Materials Used in Hull Machinery Applications Inside Naval Submarines. *NRL, Washington DC*.

Feih, S., Boiocchi, E., Mathys, G., Mathys, Z., Gibson, A. G., & Mouritz, A. P. (2011). Mechanical properties of thermally-treated and recycled glass fibres. *Composites Part B: Engineering*, 42(3), 350-358.

Guan, Y. H., Liao, W., Xu, Z. Z., Chen, M. J., Huang, J. Q. & Wang, Y. Z. (2015). Improvement of the flame retardancy of wood-fibre/polypropylene composites with ideal mechanical properties by a novel intumescent flame retardant system. *RSC advances*, 5(74), 59865-59873.

Helwig, M. & Paukszta, D. (2000). Flammability of Composites Based on Polypropylene and Flax Fibres. *Molecular Crystals & Liquid Crystals*, 354: 373-380.

Hirschler, M.M. (2000). Chemical Aspects of Thermal Decomposition of Polymeric Materials, In: Grand, A.F. and Wilkie, C.A. (eds), *Fire Retardancy of Polymeric Materials*, CRC Press, Boca Raton., pp. 28-79.

Holbery, J. & Houston, D. (2006). Natural-fiber-reinforced polymer composites in automotive applications. *Jom*, 58(11), 80-86.

Horacek, H. & Grabner, R. (1996). Advantages of flame retardants based on nitrogen compounds. *Polymer Degradation and Stability*, 54(2-3), 205-215.

Horrocks, A.R. & Kandola, B.K. (2005). Flammability and Fire Resistance of Composites, In: Long, A.C. (eds.), *Design and*

Manufacture of Textile Composites, Woodhead, Cambridge, pp. 330-363.

Hshieh, F.Y. & Beeson, H.D. (1996). Flammability Testing of Flame-Retarded Epoxy Composites and Phenolic Composites, In: Proceedings of the International Conference on Fire Safety, San Francisco, Vol. 21, pp. 189-205.

Hu, S., Song, L., Pan, H. & Hu, Y. (2012). Thermal properties and combustion behaviors of chitosan based flame retardant combining phosphorus and nickel. *Industrial & engineering chemistry research*, 51(9), 3663-3669.

Hull, T. R., Witkowski, A. & Hollingbery, L. (2011). Fire retardant action of mineral fillers. *Polymer degradation and stability*, 96(8), 1462-1469.

Jeencham, R., Suppakarn, N. & Jarukumjorn, K. (2014). Effect of flame retardants on flame retardant, mechanical, and thermal properties of sisal fiber/polypropylene composites. *Composites Part B: Engineering*, 56, 249-253.

Kalia, S., Kaith, B. S. & Kaur, I. (2009). Pretreatments of natural fibers and their application as reinforcing material in polymer composites—a review. *Polymer Engineering & Science*, 49(7), 1253-1272.

Kandola, B.K. & Nazare, S. (2007). An Overview of Flammability and Fire Retardancy of Fibre Reinforced Unsaturated Polyester Composites, In: Proceedings of Fibre Reinforced Composites Conference, Port Elizabeth.

Kandola, B.K. & Kandare, E. (2008). Composites Having Improved Fire Resistance, In: Horrocks, A.R. and Price, D. (eds), *Advances in Fire Retardant Materials*, Woodhead, Cambridge, pp. 398-442.

Kandola, B.K. (2012) Flame retardant characteristics of natural fibre composites, In: John, M.J., Thomas, S. (Eds.), *Natural*

Polymers, the Royal Society of Chemistry, United Kingdom, pp. 86-117.

Keener, T. J., Stuart, R. K. & Brown, T. K. (2004). Maleated coupling agents for natural fibre composites. *Composites part A: applied science and manufacturing*, 35(3), 357-362.

Kim, N. K., Lin, R. J. T. & Bhattacharyya, D. (2014). Extruded short wool fibre composites: mechanical and fire retardant properties. *Composites Part B: Engineering*, 67, 472-480.

Kourtides, D.A., Gilwee Jr, W.J. & Parker, J.A. (1979). Thermochemical Characterisation of Some Thermally Stable Thermoplastic and Thermoset Polymers, *Polymer Engineering and Science*, 19, 24-29.

Kozłowski, R. & Władyka-Przybylak, M. (2008). Flammability and fire resistance of composites reinforced by natural fibers. *Polymers for advanced technologies*, 19(6), 446-453.

Lacane, M., Anderson, S. & Sestakovs, V. (2015). Risk Analysis and Setting Priorities in Air Traffic Control by Using a Matrix of Similarities. *Transport and Aerospace Engineering*, 2(1), 19-26.

Lee, C. H., Salit, M. S. & Hassan, M. R. (2014). A review of the flammability factors of kenaf and allied fibre reinforced polymer composites. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014.

Lenza, J., Merkel, K. & Rydarowski, H. (2012) Comparison of the Effect of Montmorillonite, Magnesium Hydroxide and a Mixture of both on the Flammability Properties and Mechanism of Char Formation of HDPE Composites, *Polymer Degradation and Stability*, 97(12), 2581-2593.

Lu, S. Y. & Hamerton, I. (2002). Recent developments in the chemistry of halogen-free flame retardant polymers. *Progress in polymer science*, 27(8), 1661-1712.

Lyons, J.W. (ed.) (1970). Synthetic Polymers with All-carbon Backbones, In: *The Chemistry & Uses of Fire Retardants*, Wiley-Interscience, New York, pp. 281-344.

Manfredi, L.B., Rodriguez, E.S., Wladyka-Przybylak, M. & Vazquez, A. (2006). Thermal Degradation and Fire Resistance of Unsaturated Polyester, Modified Acrylic Resins and their Composites with Natural Fibres, *Polymer Degradation and Stability*, 91, 255-261.

Mark, H.F., Atlas, S.M., Shalaby, S.W. & Pearce, E.M. (1975). Combustion of Polymers and its Retardation, In: Lewin, M., Atlas, S.M. and Pearce, E.M. (eds), *Flame-retardant Polymeric Materials*, Plenum Press, New York, pp. 1-17.

Methacanon, P., Weerawatsophon, U., Sumransin, N., Praharn, C. & Bergado, D. (2010), Properties and Potential Application of the Selected Natural Fibers as Limited Life Geotextiles, *Carbohydrate Polymers*, 82(4), 1090-1096, 2010.

Mohanty, A. K., Misra, M. A. & Hinrichsen, G. I. (2000). Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview. *Macromolecular materials and Engineering*, 276(1), 1-24.

Mouritz, A.P. & Gibson, A.G. (eds.) (2006). Fire Reaction Properties of Composites, In: Gladwell, G.M.L. (series ed.), *Fire Properties of Polymer Composite Materials*, Springer, London, pp.59-101.

Mouritz, A.P. & Gibson, A.G. (eds.) (2006). Flame Retardant Composites, In: Gladwell, G.M.L. (series ed.), *Fire Properties of Polymer Composite Materials*, Springer, London, pp.237-286.

Mouritz, A. P. & Gibson, A. G. (2006), Thermal Decomposition of Composites in Fire, *Solid Mechanics and Applications*, 143, 19-58.

Nguyen, Q. T., Tran, P., Ngo, T. D., Tran, P. A. & Mendis, P. (2014). Experimental and computational investigations on fire

resistance of GFRP composite for building façade. *Composites Part B: Engineering*, 62, 218-229.

Oprisan, G., Taranu, N. & Munteanu, V. (2010). *Buletinul Institutului Politehnic Diniasi. LVI (LX)*, 3.

Price D., Anthony, G. & Carty, P. (2001) Introduction: polymer combustion, condensed phase pyrolysis and smoke formation, in: Horrocks, A.R., Price D. (Eds.), *Fire Retardant Materials*, Woodhead Publishing Ltd., England, pp. 1-30.

Price, D. & Horrocks, A. R. (2009). Polymer degradation and the matching of FR chemistry to degradation. *Fire Retardancy of Polymeric Materials*; Wilkie, CA, Morgan, AB, Eds, pp. 15-42.

Rajaei, M., Wang, D. Y. & Bhattacharyya, D. (2017). Combined effects of ammonium polyphosphate and talc on the fire and mechanical properties of epoxy/glass fabric composites. *Composites Part B: Engineering*, 113, 381-390.

Roff, W.J. & Scott, J.R. (eds.) (1971). Regenerated Proteins, In: *Fibres, Films, Plastics and Rubbers: Handbook of Common Polymers*, Butterworths, London, pp. 197-204.

Sarkos, C. P. (1996). The Effect of Cabin Materials on Aircraft Postcrash Fire Survivability. In *Technical Papers of The Annual Technical Conference-Society of Plastics Engineers Incorporated*. Society of Plastics Engineers Inc., pp.3068-3071.

Schartel, B. & Hull, T.R. (2007). Development of Fire-retardant Materials – Interpretation of Cone Calorimeter Data, *Fire and Materials*, 31: 327-354.

Schindler, W.D. & Hauser, P.J. (eds.) (2004). Flame-retardant Finishes, In: *Chemical Finishing of Textiles*, Woodhead, Cambridge, pp. 98-116.

Scudamore, M.J. (1994). Fire Performance Studies on Glass-reinforced Plastic Laminates, *Fire and Materials*, 18: 313-325.

Shumao, L., Jie, R., Hua, Y., Tao, Y. & Weizhong, Y. (2010). Influence of ammonium polyphosphate on the flame retardancy and mechanical properties of ramie fiber-reinforced poly (lactic acid) biocomposites. *Polymer International*, 59(2), 242-248.

Sikoutris, D. E. & Kostopoulos, V. (2015). Fire response of polymers and polymer composites. Part A: multistage degradation kinetics. *Journal of Composite Materials*, 49(2), 251-257.

Sorathia, U., Rollhauser, C. M. & Hughes, W. A. (1992). Improved fire safety of composites for naval applications. *Fire and Materials*, 16(3), 119-125.

Subasinghe, A. & Bhattacharyya, D. (2014). Performance of different intumescent ammonium polyphosphate flame retardants in PP/kenaf fibre composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 65, 91-99.

Szolnoki, B., Bocz, K., Soti, P. L., Bodzay, B., Zimonyi, E., Toldy, A., Morlin, B., Bujnowicz, K., Wladyka-Przybylak, M. & Marosi, G. (2015). Development of natural fibre reinforced flame retarded epoxy resin composites. *Polymer Degradation and Stability*, 119, 68-76.

Wambua, P., Ivens, J. & Verpoest, I. (2003). Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?. *Composites science and technology*, 63(9), 1259-1264.

Wichman, I. S. (2003). Material flammability, combustion, toxicity and fire hazard in transportation. *Progress in Energy and Combustion Science*, 29(3), 247-299.

Wrongsriaksa, P., Togashi, K., Nakai, A. & Hamada, H. (2013). Continuous natural fiber reinforced thermoplastic composites by fiber surface modification. *Advances in Mechanical Engineering*, 5, 685104.

Zhang, S. & Horrocks, A. R. (2003). A review of flame retardant polypropylene fibres. *Progress in Polymer Science*, 28(11), 1517-1538.

BÖLÜM IX

Deniz Suyu Depolamalı Hidroelektrik Santrallerin Türkiye İçin Önemi

Güngör GÜNEY¹
Yıldırım BAYAZIT²

Giriş

Ülkeler teknolojilerini geliştirdikçe sanayilerinin enerji ihtiyaçları her geçen gün artmaktadır. Ülkelerin teknolojik gelişimleri; refah düzeyinin artacağına güzel habercisi olurken, enerji kıtlığı yaşanmasının kötü habercisi sayılır. Enerji kıtlığının yaşanması; insanların yemek, çalışmak, ulaşım, tedavi, eğitim gibi temel ihtiyaçlarını karşılayamaz hale gelmesi demektir. Bu duruma sebebiyet vermeden ülkelerin gelişimlerini sürdürebilmeleri için enerjinin devamlılığı şarttır. Ülkeler enerji politikalarını, tükenbilir (fosil) enerji kaynaklarından ziyade tükenmez enerji kaynaklarına

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

² Dr. Öğr. Üyesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

yani yenilenebilir enerji kaynaklarına göre belirlemelidirler. Aksi takdirde fosil enerji rezervleri bitiminde karanlıkta kalacakları su götürmez bir gerçektir.

Günümüzde fosil enerji kaynaklarının yenilenebilir enerji kaynaklarının alternatifi olması gerekirken maalesef dünya tam tersi ile karşı karşıyadır. Yani; enerji ihtiyacının yoğun olduğu dönemlerde fosil enerji kaynaklarından yararlanmamız gerekirken şu an enerji talebi yüksek olduğu dönemlerde yenilenebilir enerji kaynaklarından açık kapatılmak istenmektedir. Fosil enerji kaynaklarının (kömür, petrol, linyit gibi) yanması sonucu birincil sera gazı olan karbondioksit (CO₂) gazı ortaya çıkar. Atmosferde yoğunluğu artan bu gazların sera etkisi yaparak dünyamızın daha çok ısınması sonucunda ise iklim değişiklikleri meydana gelmektedir (Akın, 2006). Bunun tüm dünyanın yanında ülkemizde de bir etkisinin olacağı muhakkaktır. Ülkemize etkilerinden; Güneydoğu Anadolu ve İç Anadolu bölgesinin sıcaklığını aşırı artmasından çölleşme sorunu, Karadeniz Bölgesinde sellerin artması, Marmara ve Ege Bölgelerinin ise havzaların kurumaya başlamasından kaynaklı susuzluk sorununu örnek gösterebiliriz.

Küresel ısınmadan sebebi iklim değişikliklerinin (su kaynaklarının azalması, güneşlenmesi sürelerinde değişiklik, hakim rüzgar yönlerinin değişimi gibi) her şeyde olduğu gibi enerji üretiminde de olumsuz etkileri vardır. Ülkeler yenilenebilir enerji kaynaklarından hesapladıkları sürelerde (günlük, haftalık, sezonluk) istedikleri üretimlere ulaşamayabilirler (Değer, 2013). Bu durumlarda enerji talebinin karşılanarak fosil enerji kaynaklarına ihtiyaç duyulmaması için enerjinin depolanması düşünülebilir.

Enerji Depolamanın Önemi

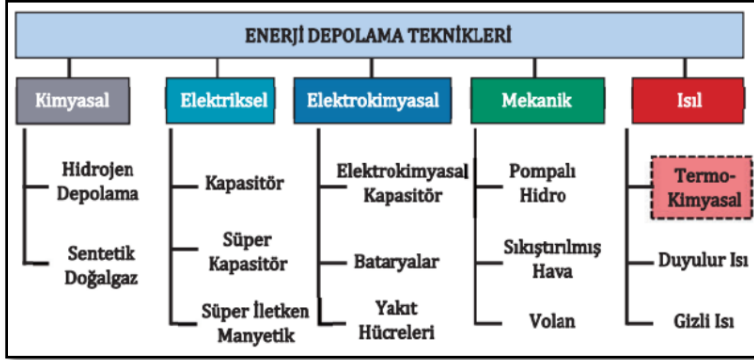
Gelişmekte olan ülkeler arasında Türkiye sanayileşmeden ve artan nüfustan kaynaklı enerji talebini sınırlı kaynaklarından karşılamaya çalışmaktadır. Ancak; ülkemizin kaynakları enerji talebini karşılayamadığı için, ülkemiz dışa bağımlı olarak fosil yakıtlardan konvansiyonel enerji ile enerji açığımızı kapatmaya çalışmaktadır. Enerjide dışa bağımlı olmamak ve sürdürülebilir

kalkınma için mevcut enerji kaynaklarımızı daha verimli kullanmamız gereklidir. Enerji ihtiyacının fazla olmadığı saat veya dönemlerde ise mevcut enerji kaynaklarımız değerlendirilerek enerjisi depolanmalıdır. Depolanan enerjinin pik saatlerde enerji taleplerini karşılamaya faydasının yanında depolanan enerji;

- Enerji üretim sistemlerinde arıza olması durumunda hızlı bir şekilde devreye girer,
- Kararlılığı bozulan şebekenin kesinti yaşamadan tekrar kararlı hale gelmesine yardımcı olur,
- Jeneratörlerin ilk başlangıcında ki ihtiyaç duyduğu enerjiyi karşılar,
- Termik santrallerin yükünü alarak çevreye katkı sağlar,
- Çok hızlı devreye girerek enerji dalgalanmalarının önüne geçer.

Enerji Depolama Yöntemleri

Enerjinin istenildiği zaman ve istenilen yerde kullanılmaya hazır olması beklenir. Enerjiyi istediğimiz zaman kullanabilmek için onu saklamaya depolama denir (Kozak & Kozak, 2012). Bu depolama çeşitli şekillerde olabilmektedir (Şekil 1). Enerji depolama tekniklerinin birbirlerine göre avantajlar veya dezavantajları olabilir (Şekil 2).



Şekil 1. Enerji Depolama Teknikleri (Emeksiz & Kara, 2014)

Kimyasal enerji depolama teknolojileri; kimyasal yakıtlar, elektrik üretimi, enerji taşımacılığı ve ayrıca enerji depolamada oldukça fazla kullanılırlar. En çok tüketilen kimyasal yakıtlar; dizel yakıt, işlenmiş kömür, benzin, doğalgaz, propan, bütan, etanol, sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), hidrojen ve biyodizeldir (Emeksiz & Kara, 2022).

Elektriksel enerji depolama teknikleri; kapasitörler, süper kapasitörler ve süper iletken manyetik enerji depolama sistemleri olarak kategorize edilebilirler. Genel olarak kapasitörler, yüksek akım durumunda kullanılabilir, fakat oldukça düşük olan kapasitans üretimlerinden dolayı sadece çok kısa süreler için kullanıma uygundur (Emeksiz & Kara, 2022).

Elektrokimyasal enerji depolama; elektrik enerjisini kimyasal enerji olarak depolayarak ihtiyaç anında tekrar elektrik enerjisine çeviren sistemlere pil, pillerin seri veya paralel bağlanarak oluşturdukları yapıya ise akümülatör (batarya) denmektedir (Mazman & Yılmaz, 2019).

Mekanik enerjiyi depolama; mekanik enerji depolamasında; basınçlı gaz, potansiyel enerji, zorlanmış yaylar ve kinetik enerji sayılabilir.

Pompajlı hidro depolama; ülkemizde potansiyeli yüksek olmasına rağmen, bu sistemler ülkemizde bulunmamaktadır. Bu tür sistemlerin farklı tipleri mevcuttur. En çok rastlanana deniz kenarlarına kurulan sistemlerdir. Enerjiye ihtiyacı az olduğu zamanlarda suyu yüksek dağ tepesine pompalanarak potansiyel enerji kazandırılır. Su tekrar döngüye alınarak enerji dönüşümü gerçekleştirilir (Özer & Sönmez, 2013).

Isıl enerji depolama; ısı enerjisi bir cisim oluşturulan atom veya moleküllerin, potansiyel ve kinetik enerjilerinin toplamıdır. Moleküllerin veya atomların titreşimleri sonucu oluşur (Kozak & Kozak, 2012).

Depolama Teknolojisi	Ana Avantajlar (Göreceli)	Dezavantajlar (Göreceli)	Güç Uygulamaları	Enerji Uygulamaları
Pompalanmış Sıvı	Yüksek Kapasite , Düşük Maliyet	Özel Yapı Gerekliliği		●
Sıkıştırılmış Hava	Yüksek Kapasite , Düşük Maliyet	Özel Yapı Gerekliliği, Yakıt İhtiyacı		●
Akım Pilleri: PSB VRB ZnBr	Yüksek Kapasite , Bağımsız Güç ve Enerji Derecelendirmesi	Düşük Enerji Yoğunluğu	◐	●
Metal-Hava	Çok Yüksek Enerji Yoğunluğu	Elektrik Şarj Zorluğu		●
Na-S	Yüksek Güç ve Enerji Yoğunluğu, Yüksek Verim	Üretim Maliyeti, Güvenlik Problemi	●	●
Li-ion	Yüksek Güç ve Enerji Yoğunluğu, Yüksek Verim	Yüksek Üretim Maliyeti, Özel Şarj Devresi Zorunluluğu	●	○
Ni-Cd	Yüksek Güç ve Enerji Yoğunluğu, Yüksek Verim		●	◐
Diğer Gelişmiş Piller	Yüksek Güç ve Enerji Yoğunluğu, Yüksek Verim	Yüksek Üretim Maliyeti	●	○
Kurşun Asit	Düşük Ana Maliyet	Tamamiyle Boşaldığında Düşük Çevrim Ömrü	●	○
Volan (Atalet)	Yüksek Güç	Düşük Enerji Yoğunluğu	●	○
SMES-DSMES	Yüksek Güç	Düşük Enerji Yoğunluğu, Yüksek Üretim Maliyeti	●	
E.C Kapasitörler	Uzun Çevrim Ömrü Yüksek Verim	Düşük Enerji Yoğunluğu	●	◐

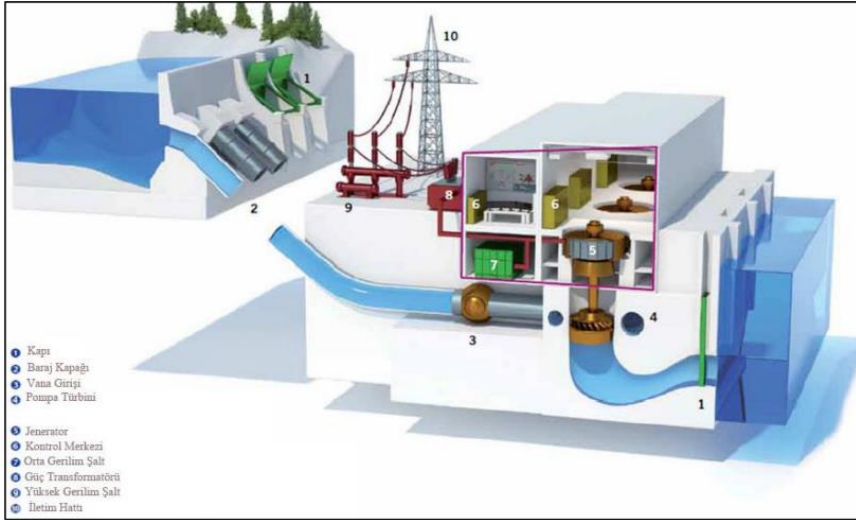
Şekil 2. Enerji Depolama Sistemlerinin Karşılaştırılması (Özer & Sönmez, 2013)

Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santrallerin Önemi

Yenilenebilir enerji kaynaklarından hidroelektrik enerjiden daha fazla yararlanmak adına, su çevrim halinde değerlendirilerek sisteme daha faydalı hale getirilebilir. Örnek olarak, jeotermal enerji için rezervuardan çıkarılan sıcak suyun reenjeksiyon yapılarak rezervuara tekrar basılması gösterilebilir. Yani tekrar basım işlemi olarak açıklanabilen reenjeksiyon işlemi ile jeotermal enerjinin devamlılığı sağlanırken enerji kaynağı da korunmuş olmaktadır. Benzer bir işlem olarak Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Elektrik Santraller (PDHES) düşünülebilir. Enerji ihtiyacının fazla olduğu saatlerde enerji üretimi olarak değerlendirilen su, enerji ihtiyacının az olduğu saatlerde üst rezervuara tekrar pompalanarak çevrim halinde kullanılabilir. Böylelikle yenilenebilir enerji kaynaklarından geri dönüşümlü olarak enerji elde edilebilir.

Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santrallerin Çalışma Prensipleri

PDHES sistemlerinde alt rezervuar ve üst rezervuar olmak üzere iki rezervuar bulunmaktadır (Karataş, 2019). Alt rezervuar nehir, göl, deniz veya mevcut baraj rezervuarı olabilir. Üst rezervuar, dağ veya tepe üzerine, şekline ve jeolojisine göre doğal yapısı kullanılabilen gibi yapay rezervuarda yapılabilmektedir. Su alma yapısı üst rezervuarın altında veya yanında olabilir. Su alma yapısına bağlı olarak iletim hattı veya iletim tünelleri bulunur. Bu yapılardan akışa geçen potansiyel enerji, yüksek su santral yapısında türbinler vasıtasıyla kinetik enerjiye dönüşür ve elektrik enerjisini meydana getirir. Türbinlenen su ise kuyruk suyu yapısıyla (cebri boru veya tünel) alt rezervuara iletilir. Bir PDHES sistemine ait şematik gösterim Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. PDHES Sistemi ve Elemanları (Göktaş, 2018)

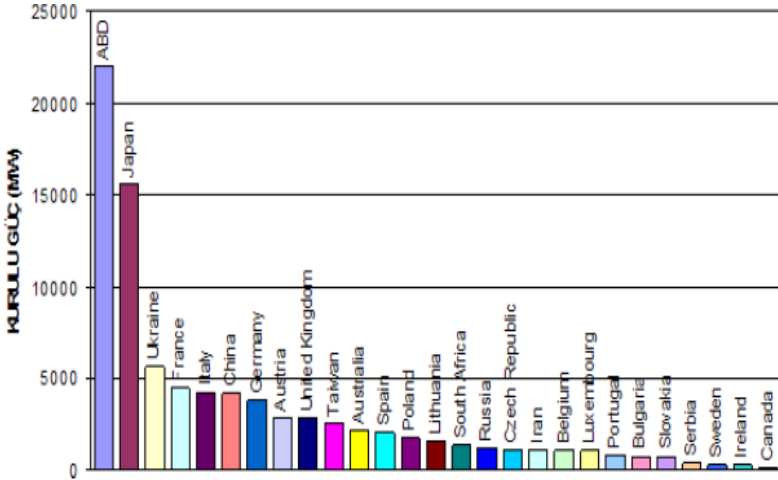
Elektrik kullanımının az olduğu saatlerde üst rezervuara pompalanan su, enerji kullanımının fazla olduğu saatlerde elektrik üretimi için kullanılır. PDHES'ler günlük enerji ihtiyaçlarını karşılamak için planlanabildiği gibi haftalık, aylık veya sezonluk olarak da planlanabilir. Talebin azlığına göre sistem durdurulabilir.

Temiz ve güvenilir enerji kaynağı olan PDHES'lerin yük dengelemesi, hızlı devreye girme, black-start yeteneği ve enerji depolayabilme gibi avantajlarının olmasının yanında jeolojik alt yapının önemli olması, erozyon olasılığı ya da kaya düşmesi, ulaşım sorunları gibi dezavantajları vardır. İşletme ve bakım maliyeti açısından düşük olmasının yanında inşası için yüksek yatırımlar gerekebilir.

Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santrallerin Dünya Örnekleri

Dünyanın ilk PDHES örnekleri 1890 yıllarında İtalya ve İsviçre'de görülmektedir. Mevcutta 39'dan fazla ülke PDHES'lerden faydalanarak enerji üretimi gerçekleştirmektedir.

Ülkelerin PDHES kurulu güçlerine bakıldığında dünyanın bu konuya önem verdiği görülmektedir (Şekil 4).



Şekil 4. Ülkelerin Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santral Potansiyelleri (Karaçay, 2010)

PDHES'ler; uzun ömürlü olmaları, yatırım maliyetlerinin diğer santrallere göre düşük olması ve yüksek verim alındığından, ülkelerin enerji yatırımları açısından odağındadır. Ayrıca çok hızlı devreye girebilen (3-5 dk) ve çok hızlı devreden çıkabilen PDHES'ler enerji ihtiyacına ani karşılık verebildiğinden enerji projelerinde dikkatleri üzerine çekmektedir.

Dünyada depolamalı sistemler ile enerji ihtiyacının karşılanmasında, PDHES'ler bu enerjilerin %94'ünü oluşturmaktadır. Ülkelerin PDHES örneklerine baktığımızda dünyanın en büyük PDHES'i potansiyeline sahip Amerika'daki 3003 MW kapasitesindeki Bath County PDHES'dir (Brandi, 2014). Bunu Çin'de Guangdong PDHES'i 2400 MW, Japonya'da Okutataragi PDHES'i 1932 MW kapasitesi ile takip etmektedir. Ayrıca Çin'de hala yapımı devam eden ve 2025 yılında bitirilmesi düşünülen Fengning PDHES'i 3600 MW kapasitesi ile dünyanın en büyük PDHES santrali olacaktır (Zhu & Ma, 2019). Bu da ülkelerin

PDHES potansiyel sıralamalarında değişiklikler olacağının ve ülkelerin PDHES projelerine ilginin artmış olduğunun göstergesidir.

Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santrallerin Türkiye Örnekleri

Türkiye şimdiiye kadar enerjinin depolanması hususunda gereken önemi gösterememiştir. Türkiye’de enerji fiyatının saatlere bağlı değişkenliği depolamalı enerjilere ilgiyi arttırmaktadır. Bunun göstergesi olarak Türkiye’de yapılması planlanan 16 PDHES projesi gösterilebilir (Tablo 1). Hatta bunlardan biri olan Gökçekaya PDHES’inin (1400 MW) fizibilite çalışmaları Devlet Su İşleri (DSİ), Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ), Elektrik Üretim Anonim Şirketi (EÜAŞ), Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü (YEGM) iş birliği ile 2015 yılında tamamlanmış ve 2021 yılında ihale edilmiştir. Ancak ülkemizde şu an inşası süren bir PDHES projesi bulunmamaktadır. PDHES’ler ile ilgili ülkemizde 16 kanun ve 31 yönetmelik olmasına karşın hala PDHES bulunmamaktadır. PDHES uygulamalarına teşviki arttıra bilmek amaçlı 10 Nisan 2023 tarihli ve 32159 sayılı Resmi Gazetede, PDHES yatırımları Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması (YEKDEM) kapsamına alındı.

Tablo 1. PDHES Proje Planlamaları (Peker, 2022)

Proje	Yeri	Kurulu Güç (MW)	Proje debisi (m³/s)	Düşü (m)
Gökçekaya	Eskişehir	1600	193	962
İznic-I	Bursa	1500	687	255
Kargı	Ankara	1000	238	496
Sarıyar	Ankara	1000	270	434
Adıgüzel	Denizli	1000	484	242
Burdur Gölü	Burdur	1000	316	370
Eğridir Gölü	İsparta	1000	175	672
Karacaören-11	Burdur	1000	190	615
Bayramhacılı	Kayseri	1000	720	161
Haşan Uğurlu	Samsun	1000	204	570
İznic-II	Bursa	500	221	263
Yalova	Yalova	500	147	400
Oymapınar	Antalya	500	156	372
Aslantaş PHES	Osmaniye	500	379	154
Yamula	Kayseri	500	228	260
Demirköprü	Manisa	300	166	213

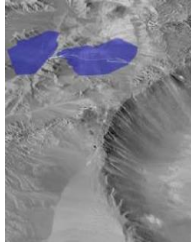
Deniz Suyu Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santrallerin Dünyadaki Durumu

PDHES'ler deniz suyu ile de kullanılabilir. Bu durumda PDHES'in alt rezervuarı olarak deniz kullanılır. Buna örnek olarak etrafı denizlerle çevrili Japonya'nın Okinawa Adasında inşa edilmiş dünyada ilk deniz suyu pompaj depolamalı hidroelektrik santrali (DPDHES) gösterilebilir (Şekil 5a). Proje debisi 26 m³/sn, yüksekliği 136 m ve 30 MW kurulu gücündedir (Aras, 2017). Diğer DPHES örnekleri ise;

- Espejo Güneş ve Valhalla DPDHES'i; Şili'de bulunan Atacama çölünde 600 MW kapasiteli güneş enerjisi santrali ve 300 MW kurulu güçlü Valhalla PDHES projesinden oluşmaktadır (Şekil 5b) Bu hibrit santral proje inşasına 2017 yılında başlanılmıştır. Projede Atacama Çölü'nde güneş enerjisi panelleri kurulması ve güneş enerjisi üretimi ile çölün okyanus kıyısında oluşunun avantajlarından faydalanılmıştır. (Pitre, 2015)
- Kerma DPDHES'i; Kuzey Denizi ortalarındaki Kerma projesi, doğrudan denizde inşa edilen fütüristik projelerdendir. PDHES projelerinin en yeni uygulama projelerinden biridir (Şekil 1c). Kotu deniz seviyesinden yaklaşık 40 m aşağıda bir iç göl özelliğine sahip, 10 x 6 km'lik büyük bir atolün bentler vasıtasıyla oluşturulan, kuvvetli rüzgâr enerjisi kullanarak iç gölün boşaltılması için pompalama kullanılan, kurulu gücü 1500 MW mertebesinde olan bu hibrit santral sıra dışı PDHES projeleri arasındadır (TESAB, 2022).



(a)



(b)



(c)

Şekil 5. (a) Okinawa DPDHES, (b) Valhalla DPDHES, (c) Kerma DPDHES

DPDHES'lerin geleneksel bir PDHES'e göre avantajları vardır (TESAB, 2022). Bunlar;

- Alt rezervuar için yapı gerekliliği bulunmamaktadır.
- Termik enerji, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi santrallerinin yakınlıklarına kurularak hızlı bir şekilde devreye girerek enerji dalgalanmalarının önüne geçebilir

Projelerin avantajlarının olması yanında dezavantajları da olabilmektedir. DPDHES'lerin dezavantaj sorunları;

- Bölgenin coğrafi ve hidrolojik özelliklerine, su derinliklerine, kıyı hatlarına ve diğere yerel koşullara bağılıdır.
- Deniz suyu tuzlu olduğu için, DPDHES sistemlerinde kullanılan mekanik aksamalarda korozyon sorunları ortaya çıkabilir. Bunun önüne geçebilmek için alaşımlı metaller kullanılması gerekebilir. Bu da maliyeti arttırıcı bir etkidir.
- Kıyı alanları genellikle biyoçeşitlilik açısından zengindir ve bu tür projelerin inşası bu alanlara zarar verebilir.
- Deniz organizmaları türbinlere (adhezyonu) zarar verebilir.
- Su alma yapısının yüksek dalgalara karşı korunaklı olması için dalga kıran yapmak gerekebilir.
- Su emiş ve boşaltım noktalarında, deniz canlılarına zarar verebilecek altyapılar oluşturulabilir. Su sirkülasyonu ve tuzluluk değışiklikleri, deniz yaşamını olumsuz etkileyebilir.

Deniz Suyu Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santrallerin Türkiye İçin Planlanması

Klasik hidroelektrik santrallerin asli görevi elektrik enerjisi üretmek iken PDHES'ler enerji depolama görevini üstlenmektedir. PDHES'ler puant güç açığı olduğu zamanlar enerji arz talep dengesinin sağlanması yönünde önemli bir rol oynamaktadır.

Türkiye'de su kaynakları stratejik bir öneme sahiptir. DPDHES'ler su kaynaklarını daha etkili bir şekilde yöneterek hem enerji üretimine katkıda bulunabilir hem de su yönetimini destekleyebilir. Türkiye, sürdürülebilir kalkınma ve çevre koruma amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik hedefler belirlemiştir. DPDHES bu hedeflere ulaşmada önemli bir rol oynayabilir ve karbon salınımını azaltabilir.

Üç tarafı denizlerle çevrili ülkemizin puant saatlerde artan enerji ihtiyacı DPDHES ile karşılanabilir. DPDHES yenilenebilir enerji kaynaklarımız arasında yer alarak enerji çeşitliliğimizi artırabilir ve Türkiye'nin enerji güvenliğini sağlayabilir. Deniz suyu depolamalı hidroelektrik santralleri genellikle dağlık bölgelerde uygulanır. Türkiye'nin coğrafi özellikleri dikkate alındığında, bazı bölgelerde bu tür santrallerin daha uygun olabileceği düşünülebilir. Örneğin;

- Türkiye'nin güneyinde yer alan Akdeniz Bölgesi, deniz suyu depolamalı hidroelektrik santralleri için uygun bir konum olabilir. Sahip olduğu geniş kıyı şeridi ve yüksek arazi yapısı, bu bölgenin bu tür projeler için potansiyel sunmasına yardımcı olabilir.
- Ege Bölgesi, zengin su kaynaklarına sahip olması ve coğrafi yapısı nedeniyle deniz suyu depolamalı hidroelektrik santralleri için potansiyel bir bölge olabilir.
- Karadeniz'in kuzey sahilleri, deniz suyu depolamalı hidroelektrik santralleri için uygun olabilir. Bu bölge, yağışlı iklimi ve yüksek yer şekilleri ile dikkat çeker.

Deniz suyu pompaj depolamalı hidroelektrik santraller, diğer enerji kaynakları ve santrallerle entegre edilerek enerji sisteminin etkinliğini artırabilir. Deniz suyu pompaj depolamalı hidroelektrik santrallerinin entegre çalışabileceği bazı enerji kaynakları ve santral türleri:

- ✓ Rüzgar Enerjisi Santralleri: Rüzgar enerjisi, rüzgarın kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştürür. Ancak

rüzgarın sürekli olmaması, enerji depolama ihtiyacını doğurur. Deniz suyu pompaj depolamalı hidroelektrik santralleri, rüzgar enerjisi üretildiği zamanlarda suyu depolayarak ve elektrik talebi yüksek olduğunda enerji sağlayarak rüzgar enerjisi ile entegre çalışabilir.

- ✓ Güneş Enerjisi Santralleri: Güneş enerjisi, güneş ışığını elektrik enerjisine çevirir. Güneş enerjisi üretimi genellikle gündüzleri yoğundur ve bu sırada depolama ihtiyacı ortaya çıkar. Deniz suyu pompaj depolamalı hidroelektrik santralleri, güneş enerjisi üretildiği zamanlarda suyu depolayarak ve güneş enerjisi üretimi azaldığında depolanan enerjiyi kullanarak güneş enerjisi ile entegre çalışabilir.
- ✓ Batarya Depolama Sistemleri: Batarya depolama sistemleri, elektrik enerjisini depolar ve ihtiyaç olduğunda serbest bırakır. Deniz suyu pompaj depolamalı hidroelektrik santralleri, bu batarya sistemleriyle birlikte kullanılarak enerji depolama kapasitesini artırabilir ve enerji sisteminin esnekliğini artırabilir.
- ✓ Jeotermal Enerji Santralleri: Jeotermal enerji, yer altındaki ısınmış suların veya buharın kullanılmasıyla elektrik üretimini sağlar. Deniz suyu pompaj depolamalı hidroelektrik santralleri, jeotermal enerji üretimi süresince suyu depolayarak ve jeotermal enerji üretimi azaldığında depolanan enerjiyi kullanarak jeotermal enerji ile entegre çalışabilir.
- ✓ Fosil Yakıt Tabanlı (Termik) Santralleri: Fosil yakıt tabanlı elektrik santralleri, düşük talep dönemlerinde elektrik üretebilir ve bu elektriği deniz suyu pompaj depolamalı hidroelektrik santrallerine pompalayarak enerji depolamasına katkıda bulunabilir. Yüksek talep dönemlerinde ise depolanan enerji serbest bırakılarak talebi karşılayabilir.

- ✓ Nükleer Enerji: Nükleer enerji tesisleri genellikle sabit bir üretim kapasitesine sahiptir. Deniz suyu pompaj depolamalı hidroelektrik santralleri, nükleer enerji tesislerinden gelen enerjiyi depolayarak, talep ve arz dengesizliklerini düzenlemede yardımcı olabilir.

Denizlere kıyası olan ülkemizin deniz suyu kullanımı açısından potansiyeli mevcuttur. Türkiye'nin enerji ihtiyacının sürekli arttığı ve bu artan talebi karşılamak için çeşitli enerji projelerine ihtiyacı olduğu bilinmektedir. DPDHES projeleri enerji talebini karşılamada ve enerji arz güvenliğini sağlamada önemli rol oynayabilir. Bu bakımdan ülkemizin, kısa periyotta pik enerji taleplerini karşılayabilmesi, uzun periyotta ise enerjide dışa bağımlılığını azaltabilmesi için, DPDHES proje çalışmalarına hız vererek mevcut deniz suyu potansiyelinden faydalanılması gerektiği düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

Akın, G. (2006). Küresel Isınma, Nedenleri ve Sonuçları, Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi, 46 (2), 2943.

Aras, E. (2017). Importance of pumped storage hydroelectric power plant in Turkey. *Advances in Energy Research*, 5 (3), 259-254. Doi:10.12989/eri.2017.5.3.239

Brandi, A. A. (2014). *Pumped storage hydropower: a technical review. A Master Report, B.S., University, Colorado*

Değer, K. (2013). *Pompajlı hidroelektrik santraller ve rüzgâr enerjisi santralleri melez sistemleri. Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara*

Emeksiz, C. & Kara, B. (2022). Enerji depolama teknolojilerinin incelenmesi ve karşılaştırmalı analizi. *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 6 (2), 34-142. Doi: 0.36287/ijmsit.6.2.134

Göktaş, H. (2018). *Türkiye için pompaj depolamalı hidroelektrik santrallerin önemi ve durum analizi. Yüksek Lisans Tezi, Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırklareli*

Karaçay, P. (2010). *Pompaj depolamalı hidroelektrik santraller ve Türkiye'deki durum. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*

Karataş, M. (2019). *Isparta ilinde pompaj depolama sisteminin uygulanabilirliğinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Isparta*

Kozak, M. & Kozak, Ş. (2012). Enerji depolama yöntemleri. *SDU International Technologic Science*, 4 (2), 17-29.

Mazman, M. & Yılmaz, H. B. (2019). Enerji depolama çözümleri ve genel eğilimler. *Elektrik Mühendisliği*, 466, 32-40

Özer, S. & Sönmez, F. (2013). Türkiye’de elektrik enerji depolanmasına alternatif çözüm önerileri. *Muş Alparslan University Journal of Science*, 1 (1), 39-48.

Peker, H. (2022). *Pompaj depolamalı santrallerin bilgisayar destekli ön tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Batman*

Pitre, C. M. S., (2015). *Análisis del comportamiento de centrales hidroeléctricas de bombeo en la operación de sistemas interconectados. Tesis Para Optar Al Grado De Magíster En Ciencias De La Ingeniería Mención Eléctrica, Santiago De Chile*

Türkiye Elektrik Sanayi Birliği (TESAB). (2022). Enerji Depolama Teknolojileri ve Pompaj Depolamalı HES Projeleri, EURELECTRIC Türkiye Hidro Çalışma Grubu. ISBN: 978-605-63465-7-6

Zhu, B. S. & Ma, Z. (2019). Development and prospect of the pumped hydro energy stations in China. *Journal of Physics: Conference Series*, 1369, 1-4. Doi: 10.1088/1742-6596/1369/1/012018

BÖLÜM X

Hidrolik İletkenlik ile Elektriksel İletkenlik Arasındaki Matematiksel İlişkinin Belirlenmesi

Erdoğan KESKİN¹
Sami ARSOY²

Giriş

Zeminin içerisinde yer alan su, bir dizi zemin probleminin temel nedenlerindedir ve bu nedenle zemin içindeki suyun miktarı, yer altı su seviyesi, akış miktarı gibi suyla ilgili çeşitli parametrelerin bilinmesi geoteknik mühendisliği açısından hayati önem taşır. Bu parametrelerin başında, zeminlerin en geniş aralıkta değişen özelliği olan permeabilite katsayısı gelir ve doğru bir şekilde belirlenmesi büyük bir öneme sahiptir.

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kırklareli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, erdinckeskin@klu.edu.tr

² Prof. Dr., Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, sarsoy@kocaeli.edu.tr

Permeabilite katsayısı genellikle laboratuvarda düşen ve sabit seviyeli permeabilite deneyleri ile belirlenir. Üç eksenli basınç ve konsolidasyon deneyleri vasıtasıyla da permeabilite katsayısı dolaylı olarak belirlenebilmektedir. Arazide ise permeabilite katsayısının belirlenebilmesi amacıyla kuyular açılarak bu kuyulara sızan suların hangi seviyeye ne kadar zamanda yükseldiği ölçülerek permeabilite katsayısı belirlenebilmektedir.

Permeabilite deneyleri laboratuvar ortamında özen gerektiren ve hata potansiyeli bulunan çalışmalardır. Deneyi gerçekleştirecek teknisyenin yeterli eğitim almış olması son derece önemlidir. Ne var ki, tüm koşulların uygun olmasına rağmen, arazideki durumu tam olarak örnekleme zorluğundan kaynaklanan hatalar, deneyin doğruluğunu olumsuz etkileyebilir. Arazi deneyleri, genellikle laboratuvar deneylerine göre daha kesin sonuçlar sağlama eğilimindedir. Ancak, emek ve maliyet gereksinimleri, küçük bütçeli projelerde arazi deneylerini tercih etmeme eğilimine neden olmaktadır.

Ayrıca, hem laboratuvar deneyleri hem de arazi deneyleri uzun süreler gerektiren deneyler arasında yer almaktadır. Bu nedenle, büyük ölçekli projelerde zamanın kritik olduğu durumlarda, deney süresinin uzunluğu ve tekrarlanmasının zorluğu, alternatif yöntemlerin geliştirilmesini kaçınılmaz hale getirmiştir. Elektriksel yöntemler, hem hızlı olmaları hem de tekrarlanabilirlik kolaylığı nedeniyle bu alternatif yöntemler arasında öne çıkar. Bu yöntemlerin temel prensibi, zeminlerin elektriksel iletkenliğine bağlı olan karakteristik özelliklerini belirlemektir. Elektriksel akım karakteristikleri, zeminlerin boşluk oranı, suya doygunluk, mineralojisi gibi birçok özelliğine bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Liu & ark., 2022; Choo & ark., 2022; Neyshabouri & ark., 2013).

Bu çalışma kapsamında, elektriksel iletkenlik ve hidrolik iletkenlik arasındaki matematiksel ilişki incelenerek, zemin permeabilite katsayısının elektriksel zemin özellikleri kullanılarak nasıl belirlenebileceği araştırılmıştır. Daha önce yapılmış olan

çalışmalar gözden geçirilmiş ve bu çalışmalar sonucunda elde edilen denklemler, elektriksel akım karakteristikleri ile olan ilişkiyi kurarak denklemler yeniden düzenlenmiştir.

Permeabilite ile Elektriksel İletkenlik Arasındaki İlişki

Bu bölümde öncelikle hidrolik akım karakteristikleri ve elektriksel akım karakteristikleri hakkında temel bilgiler sunulacaktır. Daha sonra, elektriksel ve hidrolik akım karakteristikleri arasındaki matematiksel ilişki açıklanarak, permeabilite katsayısının elektriksel akım karakteristikleri kullanılarak nasıl belirleneceği detaylı bir şekilde incelenmiştir (Keskin 2013, Wyllie & Gardner, (1958a), Wyllie & Gardner, (1958b)).

Hidrolik İletkenlik

Zeminlerin su geçirgenliği, Geoteknik Mühendisliği alanında büyük bir öneme sahiptir. Literatürde permeabilite katsayısının belirlenmesi için önerilen birçok bağıntı bulunmaktadır. Bu bölümde permeabilite katsayısının belirlenebilmesi amacıyla kullanılan permeabilite bağıntılarının matematiksel olarak nasıl ifade edildiği açıklanmıştır (Keskin, 2013; Wyllie & Gardner, (1958a); Wyllie & Gardner, (1958b)).

Zemin içerisindeki hidrolik akış, Darcy Yasası'na göre belirlenir ve bu akış, zeminin kesit alanı ile bu alandan geçen su miktarının akış hızına bağlıdır. Denklem 1'de akış hızı, Denklem 2'de ise akış miktarı ile ilgili bağıntılar sunulmuştur.

$$v_h = k_h i_h$$

Burada k_h , zeminin permeabilite katsayısını, i_h , hidrolik eğimi ve göstermektedir.

$$q_h = k_h i_h A$$

Denklem 2'de verilen q_h , A kesit alanına sahip bir zeminden geçen akım miktarını göstermektedir.

Bilindiği üzere zemin içinden geçen su akımı katmanlar halinde düzenli bir şekilde hareket eden bir akış şekli olan laminer akımdır. Zemin içindeki sıvı akışı, zeminin karakteristik özellikleri ve içinden geçen sıvının özelliklerine göre farklılık göstermektedir. Genellikle zemin içindeki akımla ilgili bağlantıların temelini oluşturan Poiseuille Yasası kullanılır. Poiseuille Yasası, boru içinden geçen suyun akım hızını Denklem 3'te verildiği şekilde tanımlamaktadır.

$$v_{ort} = \frac{\gamma_p R^2}{8\mu} i_h$$

Burada viskozite μ , akımın gerçekleştiği yöndeki tüpün yarıçapı R , akışkanın birim hacim ağırlığı γ_p olarak gösterilmiştir. Zemin içindeki akım kanalları farklı boyutlarda olabilir, bu nedenle belirli bir ölçüde olan karakteristik hidrolik akım yarıçapı tanımlanmalıdır. Karakteristik hidrolik akım yarıçapı, R_H olarak adlandırılır ve Denklem 4'te verildiği şekilde tanımlanır.

$$R_H = \frac{\text{Akım kanallarının alanı}}{\text{Akım kanallarının çevresi}}$$

Hidrolik akım yarıçapı, dairesel kesitli bir tüp için Denklem 5'de verilen eşitlik ile ifade edilebilir.

$$R_H = \frac{\pi R^2}{2\pi R} = \frac{R}{2} \Rightarrow R = 2R_H$$

Burada oluşacak akım miktarını hesaplamak amacıyla, Poiseuille denkleminde yer alan hidrolik akım yarıçapı yerine Denklem 5'deki ifade yazıldığında Denklem 6'da verilen eşitlik elde edilir.

$$q_{dairese} = \frac{1}{2} \frac{\gamma_p}{\mu} R_h^2 i_h a$$

Eşitlik, dairesel kesitli bir tüpün alanını a ile gösterildiğinde bu hâlini alır. Bu eşitlik, farklı kesit türlerinde de uygulanabilir; ancak, değişik kesitlerle karşılaştırıldığında bir şekil faktörü tanımlanmalıdır. Denklem 6'da verilen eşitlik, şekil faktörü C_s tanımlandığında, Denklem 7'deki hale dönüşür.

$$q = C_s \frac{\gamma_p R_h^2}{\mu} i_h a$$

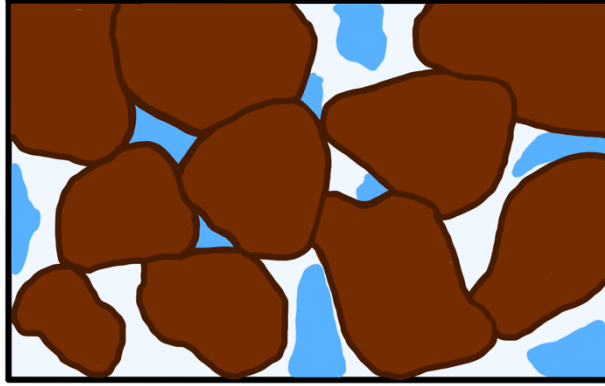
Paralel sabit kesitli tüp demetleri için geçerli olan bu denklem düzensiz kesitler için geçerli değildir. Bu nedenle Şekil 1'de gösterilen zemin içerisindeki su alanının tanımlanması gerekmektedir. Bu su alanı Denklem 8'de gösterildiği şekilde tanımlanmıştır.

$$A_f = Sna$$

Burada sırasıyla doygunluk derecesi ve porozite, S ve n olarak gösterilmiştir. Denklem 9'da bu şartlar oluşması halinde kullanılacak hidrolik akım yarıçapı ifadesi gösterilmiştir.

$$R_H = \frac{A_f}{P} = \frac{A_f L}{PL} = \frac{V_w}{V_s S_0}$$

Bu denklemde P ve L sırasıyla akım kanallarının çevresini ve uzunluğunu, S_0 ise danelerin birim hacimdeki ıslak yüzeyini göstermektedir. Ayrıca V_s , katıların hacmini V_w ise suyun hacmini temsil etmektedir.



- Hava
- Su
- Kati Dane

Toplam Kesit Alanı = A
 Doygunluk Derecesi = S
 Porozite = n
 Su Alanı = SnA

Şekil 1. Sızıntı doğrultusundaki kesit

Zemin içerisindeki suyun hacmi aşağıdaki şekilde tanımlanabilir. Burada suyun hacmi V_w , boşluk oranı, e , danelerin hacmi V_s ve doymuluk derecesi S ile gösterilmiştir.

$$V_w = eV_s S$$

Denklem 7 düzenlenerek Denklem 11’de verildiği gibi yazılabilir.

$$q = C_s \left(\frac{\gamma_p}{\mu} \right) R_H^2 S n i_h A = C_s \left(\frac{\gamma_p}{\mu} \right) R_H^2 S \left(\frac{e}{1+e} \right) i_h A$$

Bu denklemde R_H değeri yerine Denklem 9’da verilen ifade yazılırsa Denklem 12’de verilen ifade elde edilir.

$$q = C_s \left(\frac{1}{S_0^2} \right) \left(\frac{\gamma_p}{\mu} \right) S^3 \left(\frac{e^3}{1+e} \right) i_h A$$

Denklem 12 de verilen ifade Darcy Kanunu ile benzeşim yapılırsa Denklem 13’de verilen ifade elde edilir.

$$k_h = C_s \left(\frac{1}{S_0^2} \right) \left(\frac{\gamma_p}{\mu} \right) \left(\frac{e^3}{1+e} \right) S^3$$

Denklem 13’de verilen doygunluk derecesi, zeminin suya doygun olması durumunda 1 değerini almaktadır. Ayrıca şekil faktörü, boşluk şekil faktörü, (k_o) ve tortuosity faktörü (T) kullanılarak ifade edilirse Denklem 14’te verildiği şekilde gösterilebilir.

$$k_h = \left(\frac{\gamma_p}{\mu} \right) \left(\frac{1}{k_o T^2 S_0^2} \right) \left(\frac{e^3}{1+e} \right)$$

Denklem 15’te ise suya doygun olmayan zemin olması durumunda kullanılabilen eşitlik verilmiştir.

$$k_h = \left(\frac{\gamma_p}{\mu} \right) \left(\frac{S^3}{k_o T^2 S_0^2} \right) \left(\frac{e^3}{1+e} \right)$$

Kozeny-Carman denklemi olarak bilinen bu denklemde kullanılan boşluk şekil faktörü genel olarak 2.5 olarak kabul edilmektedir (Chapuis & Aubertin, 2004). Yine denklemde kullanılan ve tespit edilmesi oldukça zahmetli olan özgül yüzey alanı katsayısının belirlenmesi gerekmektedir. Chapuis ve Legare (1992) sırasıyla iri ve ince daneli zeminler için Denklem 16 ve Denklem 17’de verilen eşitlikleri önermiştir.

$$S_0 = \left(\frac{6}{Gs} \right) \Sigma \left[\frac{P_{NoD} - P_{Nod}}{d} \right]$$

Bu ifade de (P_{NoD} - P_{Nod}) elekler arasında kalan zeminin yüzdesini, d , ise elek çapını temsil etmektedir.

$$\frac{1}{S_0} = 6.152 \left(\frac{1}{LL} \right) - 0.052$$

Bu denklemde LL , likit limit değerini temsil etmektedir.

Chapuis (2004) çalışmasında, Kozeny-Carman ve Hazen tarafından türetilmiş permeabilite katsayısı eşitliklerini basitleştirerek Denklem 18'de sunulan formülü elde etmiştir.

$$k(cm/sn) = 2.4622 \left[\frac{e^3}{1+e} d_{10}^2 \right]^{0.7825}$$

Denklemde d_{10} danelerin %10'nunun geçtiği dane boyutunu temsil etmektedir.

Elektriksel İletkenlik

Ohm Yasası'na göre, σ_e elektrik iletkenliğini ifade eder ve bu prensip zemin-su sistemleri için de geçerlidir. Elektriksel iletkenlik, genel olarak direncin çarpmaya göre tersi olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca elektriksel iletkenlik Denklem 19'da belirtildiği gibi tanımlanabilmektedir.

$$\sigma_e = \frac{1}{R} \frac{L}{A} (\text{siemens} / m)$$

Denklem 19'da, sırasıyla σ_e , R , L ve A , elektrik iletkenliği, direnci, uzunluğu ve kesit alanını temsil etmektedir. Doygunluk derecesine bağlı olarak zeminin elektrik iletkenliği 0.01-1.0 (siemens/m) arasında değişmektedir. Ayrıca zeminin elektrik iletkenliği doyumluk derecesinin yanında, porozite, boşluk suyunun özellikleri, mineroloji, dane büyüklüğü, şekli vb özelliklerden de etkilenmektedir.

Denklem 20'de Archie 1942 tarafından tanımlanan zemini doygun hale getiren sıvının direnci (ρ_w) ve doygun zemin direncine (ρ_t) bağılı olan bir formasyon faktörü (F) tanımlamıştır.

$$F = \frac{\rho_t}{\rho_w} = \frac{\sigma_w}{\sigma_t}$$

Burada σ_w ve σ_t , boşluk suyu ve doygun zeminin elektriksel iletkenliğidir. Temiz kumun porozitesi ile formasyon faktörü arasındaki ilişki Denklem 21'de gösterilmiştir.

$$F = n^{-m}$$

Formasyon faktörünün gevşek kumlar için 1.3, çimentolaşmış kumtaşları için 2.0 olarak alınması önerilmektedir.

Formasyon faktörü ile suya doygunluk arasındaki ilişki ise Denklem 22'de tanımlanmıştır.

$$F_{atS_w=1} = (S_w)^p \frac{\sigma_w}{\sigma_t}$$

Archie (1942) p değeri için 2.0 değerini önerirken genel olarak 1,4 ile 4,6 arasında değişen değerleri de alabilmektedir.

L uzunluğunda A kesit alanına sahip doygun bir zemin örneği düşünüldüğünde boşlukların tümü birbirine bağlı ve bir demet tüp olarak temsil edilirse, tümünün yarıçapları, uzunlukları (L_e) ve alanları (A_e) aynı olduğu varsayılabilir. Burada $A_e = nA$, akış yolunun uzunluğu L_e , tortuosite $T = L_e/L$ 'dir. Bu durumda formasyon faktörünün eşitliği porozite ve tortuositeye bağlı olarak Denklem 23'de verilmiştir.

$$F = \frac{T^2}{n}$$

Doygunluk oranının 1'den küçük olduğu durumlarda, elektrik akımının geçtiği alan nSA ise, bu durumda $F = (T^2/nS)$

olacaktır. Bir zeminini porozitesi biliniyorsa F değeri ölçülerek tortusite hesaplanabilir.

$$T = \sqrt{nS \frac{\sigma_w}{\sigma_t}}$$

Burada tortusite T , porozite n , doygunluk S , boşluk suyunun elektriksel iletkenliği σ_w , zeminin elektriksel iletkenliği σ_t olarak ifade edilmiştir.

Hidrolik İletkenlik ile Elektriksel İletkenlik Arasındaki İlişki

Yukarıda detayları verildiği şekliyle, Kozeny-Carman ve Chapuis, permeabilite katsayısını belirlemek amacıyla sırasıyla Denklem 15 ve Denklem 18’de ifade edilen eşitlikleri önermişlerdir. Elektriksel iletkenlikle ilgili detaylar da yine yukarıda açıklanmıştır. Bu bölümde, hidrolik ve elektriksel iletkenlik arasındaki ilişki kullanılarak permeabilite katsayısının nasıl belirlenebileceği açıklanacaktır.

Denklem 15’de verilen Kozeny-Carman permeabilite katsayısı eşitliği Denklem 25’te tekrar yazılmıştır.

$$k_h = \left(\frac{\gamma_p}{\mu} \right) \left(\frac{S^3}{k_0 T^2 S_0^2} \right) \left(\frac{e^3}{1+e} \right)$$

Burada suyun birim hacim ağırlığı (γ_p), zemin içerisindeki akışkanın viskozitesi (μ) ile ifade edilmektedir. Zemin mekaniğinde permeabilite problemlerinde zemin içerisindeki sıvı büyük çoğunlukla su olmaktadır. Bu nedenle bu tarz problemlerde suyun birim hacim ağırlığı ve suyun viskozitesinin kullanılması uygun olacaktır. Eşitlikte boşluk oranı ve doygunluk sırasıyla e ve S ile ifade edilmiştir. Bu parametreler kütle diyagramı kullanılarak kolayca hesaplanabilen parametrelerdir. Yine denklemde bulunan özgül yüzey alanı katsayısı hesaplanması zor olan bir katsayı olsa da Chapuis & Legare (1992) tarafından önerilen denklemlerle hesaplanabilmektedir. Bu denklemde hesaplanması en karmaşık

değer ise Tortuiste katsayısıdır. Bu katsayının doğru bir şekilde belirlenmesi permeabilite katsayısının doğru bir şekilde belirlenmesi açısından oldukça önemlidir.

Elektriksel akım karakteristikleri kullanılarak Tortuiste katsayısı belirlenebilmektedir. Tortuosite katsayısının elektriksel akım karakteristikleri ile ilişkisi Denklem 26'da gösterilmiştir.

$$T = \sqrt{nS \frac{\sigma_w}{\sigma_t}}$$

Bu eşitlikte suyun elektriksel iletkenliği σ_w , zemin danelerinin elektriksel iletkenliği σ_t olarak gösterilmiştir. Denklem 26'da verilen ifade Denklem 25'de yerine koyulursa aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$k_h = \left(\frac{\gamma_p}{\mu} \right) \left(\frac{S^2}{k_0 n \frac{\sigma_w}{\sigma_t} S_0^2} \right) \left(\frac{e^3}{1+e} \right)$$

Denklem 27 incelendiğinde permeabilite katsayısının zemine ait bazı fiziksel özellikler ve zemine ait elektriksel akım karakteristikleri kullanılarak belirlenebileceği gösterilmiştir.

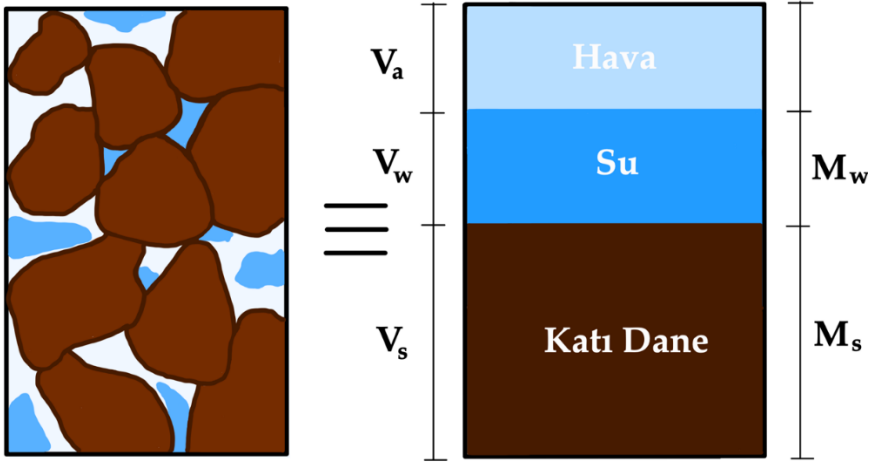
Ayrıca zemin içerisinde bulunan boşlukların permeabilite katsayısını etkileyen en önemli faktörlerden biri olduğu bilinen bir gerçektir. Chapuis (2004) bu ilişkiyi kullanarak boşluk oranı ve permeabilite katsayısı arasında Denklem 28'de verilen eşitliği önermiştir.

$$k(cm/sn) = 2.4622 \left[\frac{e^3}{1+e} d_{10}^2 \right]^{0.7825}$$

Denklem 28'den de görüleceği üzere boşluk oranının bilinmesi durumunda permeabilite katsayısı rahatlıkla hesaplanabilecektir.

Bilindiği üzere zemin katı daneler, su ve havadan oluşan 3 fazlı bir malzeme olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2'de bir zemin numunesinde bulunan malzemeler ve hesaplamalarda kullanılması için denk bir model olarak kütle diyagramı verilmiştir.

Bilindiği üzere zemin katı daneler, su ve havadan oluşan 3 fazlı bir malzeme olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2'de zeminin bir kesit alanı gösterilmiştir ve buna denk olarak zemin için kütle diyagramı da sağlanmıştır. Zemin numunesinde bulunan malzemeler, daneler, su ve hava, bu diyagramda temsil edilmektedir. Bu model, zeminin farklı bileşenlerinin hacim ve ağırlıklarını temsil etmek için kullanılmaktadır.



Şekil 2. Üç fazlı bir zemin için denk kütle diyagramı

Şekil 2'de verilen kütle diyagramının sol tarafı hacim özelliklerini sağ tarafı ise ağırlık özelliklerini temsil etmektedir. Boşluk oranı, boşlukların hacminin, katıların hacmine oranı olarak tanımlanmaktadır ve Denklem 29'da verilen şekilde ifade edilebilir.

$$e = \frac{V_w + V_a}{V_s}$$

Porozite ise Denklem 30'da verilmiştir. Boşluk oranından farklı olarak boşluklarının hacminin zeminin toplam hacmine oranı olarak tariflenmektedir.

$$n = \frac{V_w + V_a}{V}$$

Boşluk oranı ve porozite birbirleri cinsinden ifade edilebilmektedir. Bu şekilde boşluk oranı Denklem 31'de, porozite ise Denklem 32'de birbirleri cinsinden gösterilmiştir.

$$e = \frac{n}{1-n}$$

$$n = \frac{e}{1+e}$$

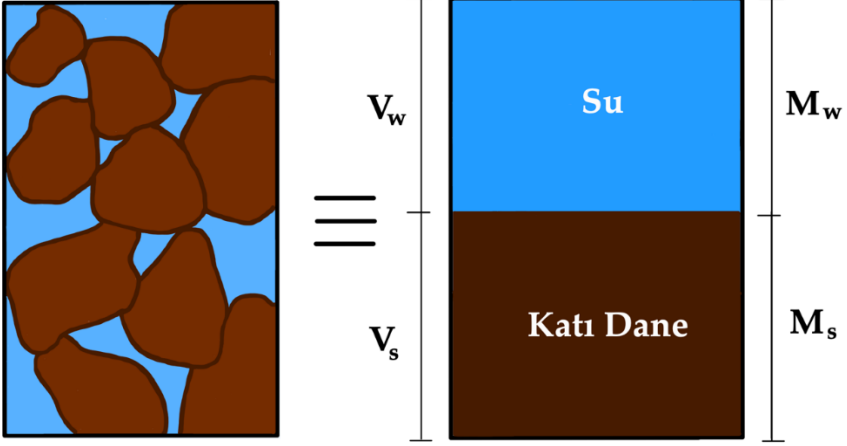
Zemin içerisindeki havanın yerine su gelmesi ile birlikte zemin suya doymuş hale geçmektedir. Bu durumda zemin hava, su ve katı danelerden oluşan 3 fazlı zemin yerine su ve katı danelerden oluşan 2 fazlı zemin haline gelmektedir. Bu durumu temsil eden kütle diyagramı Şekil 3'te gösterilmiştir.

Bu durumda boşlukların hacmi sıfır olduğu için boşluk oranını aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$e = \frac{V_w}{V_s}$$

Porozite ise Denklem 34'te gösterildiği şekilde tanımlanabilir.

$$n = \frac{V_w}{V}$$



Şekil 3. İki fazlı bir zemin için denk kütle diyagramı

Hacimsel su muhtevası zemin içerisindeki suyun hacminin toplam hacime oranı olarak tanımlanmaktadır. Buna göre zeminin suya doymuş olması durumunda porozite ile hacimsel su muhtevası birbirine eşit olmaktadır. Denklem 35’de hacimsel su muhtevası ve porozite arasındaki ilişki, Denklem 36 ve Denklem 37’de ise hacimsel su muhtevası cinsinden porozite ve boşluk oranı eşitlikleri tekrar yazılmıştır.

$$\theta = n$$

$$\theta = \frac{e}{1+e}$$

$$e = \frac{\theta}{1-\theta}$$

Denklem 37’de tanımlanan boşluk oranı değeri Denklem 28’de verilen eşitlikte yerine koyulursa Denklem 38’de verilen ifade elde edilir.

$$k(cm/sn) = 2.4622 \left[\frac{\left(\frac{\theta}{1-\theta} \right)^3}{\frac{1}{1-\theta}} d_{10}^2 \right]^{0.7825}$$

Denklem 38’de gösterilen hacim su muhtevası değeri ile zeminin dielektrik katsayısı arasında ilişki vardır. Topp & ark. (1980) tarafından tanımlanan hacimsel su muhtevası – dielektrik katsayısı ilişkisi Denklem 39’da gösterilmiştir.

$$\theta = aK_a^3 - bK_a^2 + cK_a - d$$

Denklem 39’da verilen ifade Denklem 38’de yerine koyulursa Denklem 40’da verilen ifade elde edilir.

$$k(cm/sn) = 2.4622 \left[\frac{\left(\frac{aK_a^3 - bK_a^2 + cK_a - d}{1 - (aK_a^3 - bK_a^2 + cK_a - d)} \right)^3}{\frac{1}{1 - (aK_a^3 - bK_a^2 + cK_a - d)}} d_{10}^2 \right]^{0.7825}$$

Denklem 40’da görüldüğü gibi dielektrik katsayısının doğru olarak belirlenmesi ile birlikte permeabilite katsayısı rahatlıkla hesaplanabilecektir. Bu denklemin kısıtı permeabilite katsayısının doğru olarak belirebilmesi için zeminin suya doymun olması gerekmektedir. Zeminin suya doymun olmaması durumunda eşitliğin geçerliliği bulunmamaktadır.

Zeminin suya doymun olmaması durumunda permeabilite katsayısının hesaplanması için bazı tanımlamaları baştan yapabiliriz.

Boşluk oranı bilindiği üzere Denklem 41'de verildiği şekilde tanımlanabilir.

$$e = \frac{V_b}{V_s}$$

Denklem 42'de zeminin kuru yoğunluğu tanımlanmıştır.

$$\rho_k = \frac{M_s}{V}$$

Denklem 43'de ise zemin danelerinin yoğunluğu verilmiştir.

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s}$$

Denklem 41, 42 ve 43 birbirleri cinsinden yeniden düzenlenerek boşluk oranı Denklem 44'de verilen şekli ile ifade edilebilmektedir.

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_k} - 1$$

Suyun yoğunluğu 1 olarak kabul edildiği takdirde yukarıda verilen eşitlik aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$e = \frac{GS}{\rho_k} - 1$$

Denklem 18 ve Denklem 45 bir arada düzenlenirse, permeabilite katsayısı Denklem 46'da verildiği şekilde gösterilebilir.

$$k(cm/sn) = 2.4622 \left[\left(\frac{GS}{\rho_k} - 1 \right)^3 \frac{\rho_k}{GS} d_{10}^2 \right]^{0.7825}$$

Kuru yoğunluk ile elektriksel akım karakteristikleri arasındaki ilişki literatürde Denklem 47’de verildiği şekilde tanımlanmıştır (Zegelin & ark., 1989; Nadler & ark., 1991; Malicki & Walczak, 1999).

$$\rho_k = \frac{V_1}{V_f(c_1 + d_1(K_a - 1) - c_1 \cdot \exp[-f_1(K_a - 1)])}$$

Denklem 47’de verilen ifadenin sadeleştirilmesi amacıyla aşağıda tanımlanan bir E katsayısı tanımlanmıştır. Bu katsayı Denklem 48’de gösterilmiştir.

$$E = c_1 + d_1(K_a - 1) - c_1 \cdot \exp[-f_1(K_a - 1)]$$

O halde Denklem 46, 47 ve 48 bir arada düzenlendiği takdirde Denklem 49’da verilen ifade elde edilebilir.

$$k(cm/sn) = 2.4622 \left[\left(\frac{EV_f GS}{V_1} - 1 \right)^3 \frac{V_1}{EV_f GS} d_{10}^2 \right]^{0.7825}$$

Denklem 49’da verilen ifade permeabilite katsayısının zeminin suya doygunluğundan bağımsız bir şekilde hesaplanabileceğini göstermektedir. Bu denklemin kısıtı ise elektriksel akım karakteristiklerinin yanında zeminin özgül ağırlığı ve % 10’nun geçtiği dane çapının bilinmesinin gerekmesidir.

Yukarıda açıklandığı üzere elektriksel iletkenlik ile su iletkenliği arasında bir ilişki olduğu matematiksel olarak ortaya koyulmuştur. Son yıllarda zeminin elektriksel direnci ve dielektrik katsayısının belirlenebilmesi amacıyla birçok elektriksel yöntem kullanılmaktadır. bu yöntemlerden bazılarında bahsetmemiz gerekirse TDR (time domain reflectometry), ADR (amplitude domain reflectometry), FDR (frequency domain reflectometry) vb. yöntemler ön plana çıkmaktadır. Bu yöntemler kullanılarak zeminlerin permeabilitesinin kısa bir sürede belirlenebileceği

düşünülmektedir (Arsoy & ark., 2013; Ochiai & ark., 2020; Roth & ark., 1992; Sinha & ark., 2017; Yu & Drnevich, 2004).

Yukarıda açıklandığı üzere elektriksel iletkenlik ile su iletkenliği arasında bir ilişki olduğu matematiksel olarak ortaya koyulmuştur. Bu kapsamda, zeminin elektriksel direnci ve dielektrik katsayısının belirlenmesi amacıyla gelişmiş bir dizi elektriksel yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler arasında öne çıkanlar TDR (time domain reflectometry), ADR (amplitude domain reflectometry), FDR (frequency domain reflectometry) gibi yöntemlerdir (Li & ark., 2022; Moret-Fernández & ark., 2022; Pérez & ark., 2023).

Bu yöntemler, zeminlerin elektriksel özelliklerini hızlı ve hassas bir şekilde ölçebilme yeteneği sunmaktadır. Özellikle TDR yöntemi zeminin yansıma katsayısını ölçerek dolaylı yünden su muhtevası, porozite ve permeabilite gibi önemli parametreleri belirlemek için kullanılabilir. Bu, inşaat mühendisleri ve araştırmacılar için zeminin hidrolik davranışını anlamak ve mühendislik projelerinde daha iyi kararlar almak açısından büyük bir avantaj sağlar.

Sonuç ve Öneriler

Permeabilite katsayısının belirlenmesi, geleneksel zemin mekaniği yöntemleriyle hem laboratuvarında hem de arazide mümkündür. Ancak, günümüzdeki teknolojik gelişmelerle birlikte, bu değerin daha hızlı ve daha doğru bir şekilde tespiti büyük önem kazanmaktadır. Bu bağlamda, zeminin elektriksel özelliklerini belirleyen yöntemler kullanılarak permeabilite katsayısının belirlenebileceği üzerine matematiksel bir çalışma yürütülmüştür.

Elektriksel yöntemler, inşaat mühendisliği problemlerinin çözümünde zaman ve maliyet açısından etkili bir çözüm sunmaktadır. Bu yenilikçi yöntemler, hem arazide hem de laboratuvarında kullanılarak permeabilite katsayısının hızlı bir şekilde hesaplanmasını sağlaması olasıdır. İnşaat mühendisliği problemlerine hızlı çözümler getirebilmesi, maliyet tasarrufu

sağlaması ve zamanın daha etkili kullanılmasına olanak tanması nedeniyle önemli bir avantaj sunmaktadır.

Matematiksel olarak ortaya konan bu yöntemin deneysel olarak ispatlanması ve arazide başarılı bir şekilde kullanılması, hem bilime hem de inşaat sektörüne önemli katkılar sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

Archie, G. E. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Transactions of the Society of Petroleum Engineers of the American Institute of Mining, *Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc*, 146(01), 54–62. doi:10.2118/942054-g

Arsoy, S., Ozgur, M., Keskin, E., & Yilmaz, C. (2013). Enhancing TDR based water content measurements by ANN in sandy soils. *Geoderma*, 195, 133-144. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.11.019>

Chapuis, R. P. (2004). Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(5), 787–795. doi:10.1139/t04-022

Chapuis, R. P., & Légaré, P.-P. (2009). A simple method for determining the surface area of fine aggregates and fillers in bituminous mixtures. In *Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance* (pp. 177-177–10). 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International.

Chapuis, Robert P., & Aubertin, M. (2004). Reply to the discussion by D. Hansen on “On the use of the Kozeny-Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils.” *Canadian Geotechnical Journal*, 41(5), 994–996. doi:10.1139/t04-029

Keskin, E. (2013). Zemin permeabilitesinin elektriksel analoji ile belirlenmesi. Doktora Tezi. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği ABD. Kocaeli, Türkiye.

Li, B., Wang, C., Gu, X., Zhou, X., Ma, M., Li, L., & Zheng, X. (2022). Accuracy calibration and evaluation of capacitance-based soil moisture sensors for a variety of soil properties. *Agricultural Water Management*, 273, 107913. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107913>

Malicki, M. A., & Walczak, R. T. (1999). Evaluating soil salinity status from bulk electrical conductivity and permittivity: Evaluating soil salinity. *European Journal of Soil Science*, 50(3), 505–514. doi:10.1046/j.1365-2389.1999.00245.x

Moret-Fernández, D., Lera, F., Latorre, B., Tormo, J., & Revilla, J. (2022). Testing of a commercial vector network analyzer as low-cost TDR device to measure soil moisture and electrical conductivity. *Catena*, 218, 106540. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106540>

Nadler, A., Dasberg, S., & Lapid, I. (1991). Time domain reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soil columns. *Soil Science Society of America Journal*. *Soil Science Society of America*, 55(4), 938–943. doi:10.2136/sssaj1991.03615995005500040007x

Ochiai, H., Aoki, S., Hiromatsu, M., Matsumoto, R., & Noborio, K. (2020). Real time measurements of volumetric water content in seafloor sediments by the Time Domain Reflectometry (TDR) with gravity coring in the surface methane hydrate survey. *Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology*, 85(4), 226–229. doi:10.3720/japt.85.226

Pérez, M., Mendez, D., Avellaneda, D., Fajardo, A., & Páez-Rueda, C. I. (2023). Time-domain transmission sensor system for on-site dielectric permittivity measurements in soil: A compact, low-cost and stand-alone solution. *HardwareX*, 13, e00398. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2023.e00398>

Roth, C. H., Malicki, M. A., & Plagge, R. (1992). Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR. *Journal of Soil Science*, 43(1), 1–13. doi:10.1111/j.1365-2389.1992.tb00115.x

Sinha, S., Norouzi, A., Pradhan, A., Yu, X., Seo, D.-J., & Zhang, N. (2017). A field soil moisture study using time domain reflectometry (TDR) and time domain transmissivity (TDT)

sensors. *DEStech Transactions on Materials Science and Engineering*. doi:10.12783/dtmse/ictim2017/10109

Topp, G. C., Davis, J. L., & Annan, A. P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16(3), 574–582. doi:10.1029/wr016i003p00574

Wyllie, M., & Gardner, G. (1958a). The generalized Kozeny-Carman equation: part I. *World Oil*, 146(4), 121–126.

Wyllie, M., & Gardner, G. (1958b). The generalized Kozeny-Carman equation: part II. *World Oil*, 146(5), 210–228.

Yu, X., & Drnevich, V. P. (2004). Soil water content and dry density by time domain reflectometry. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(9), 922–934. doi:10.1061/(asce)1090-0241(2004)130:9(922)

Zegelin, S. J., White, I., & Jenkins, D. R. (1989). Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry. *Water Resources Research*, 25(11), 2367–2376. doi:10.1029/wr025i011p02367.

Liu, L., Lu, Y., Fu, Y., Horton, R., & Ren, T. (2022). Estimating soil water suction from texture, bulk density and electrical resistivity. *Geoderma*, 409, 115630.

Choo, H., Park, J., Do, T. T., & Lee, C. (2022). Estimating the electrical conductivity of clayey soils with varying mineralogy using the index properties of soils. *Applied Clay Science*, 217, 106388.

Neyshabouri, M. R., Rahmati, M., Doussan, C., & Behroozinezhad, B. (2013). Simplified estimation of unsaturated soil hydraulic conductivity using bulk electrical conductivity and particle size distribution. *Soil Research*, 51(1), 23-33.