ULAŞIM GEÇKİLERİ BOYUNCA MENFEZ VE DOLGU GÜVENLİĞİ ÜZERİNE BİR DEĞERLENDİRME

A DISCUSSION ABOUT CULVERT AND EMBANKMENT SAFETY ALONG TRANSPORTATION ROUTES

Jenny Guzmán Salazar[1], Tara Nyatichi Mongina Nyamwaro [2], Niyazi Özgür Bezgin[3]

ÖZET

Toprak dolgular ve menfezler, karayolu ve demiryolu altyapılarının önemli bileşenleridir. Tasarlanan bir geçki (güzergâh) boyunca karayolu ve demiryolu hat üst yapısına sağlanması gereken ve taşıyıcı doğal zemin seviyesi ile üst yapı seviyesi arasında yükseklik farkları doğabilir. Gereken yükseklik farklılıkları, değerlerine ve geçki boyunca devam ettikleri mesafelere bağlı olarak, toprak dolgular veya yolaktaranlar (viyadükler) ile sağlanırlar. Ancak ulaşım geçkileri ve geçkiler boyunca yer alan dolgular geçkinin her iki tarafında yer alan arazileri birbirinden ayırırlar. Bu araziler arasında, arazilerin kullanım amaçlarına bağlı olarak insan, canlı ve araç geçişleri ile arazilerin topografik ve hidrolojik özelliklerine bağlı olarak sürekli ve dönemsel olarak su geçişlerine olanak tanıyan yapılara ihtiyaç duyulur. Menfezler, bu geçişlere olanak tanıyan yapılardır. Hidroloji, yapı ve zemin mühendisliği ara kesitlerinde çalışılması gereken menfezlerin, içine gömülü oldukları zemin ile mekanik ilişkileri bozulduğunda ortaya çıkan durum, yüksek hızlarda taşıt trafiğinin gerçekleştiği ve menfezin taşıdığı ulaştırma üst yapısında ani çökme durumuna neden olmaktadır. Bu çalışma kapsamında, demiryolu hatları boyunca yer alan hidrolik menfezlerde meydana gelen arızalar; zemin mekaniği, hidroloji ve iklimsel değişimler çerçevesinde incelenmiş, yetersiz dolgu genişliği ve zemin-yapı etkileşimindeki bozulmaların hat stabilitesi üzerindeki kritik etkileri ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: *Demiryolu, menfez, iklim değişikliği, hidroloji.*

ABSTRACT

Earth embankments and culverts are vital components of highway and railway infrastructure. Along a planned alignment, elevation differences often arise between the natural load-bearing soil level and the required level of the highway or railway superstructure. Depending on the magnitude of these elevation differences and the distance over which they extend, the necessary vertical transitions are achieved through either earth embankments or viaducts. As part of earthworks, earth embankments serve as a viable solution when the soil excavated from cuttings along the alignment is suitable in type and quantity, or when the fill distance and required elevation gain fall within appropriate parameters. However, transportation alignments—and the embankments constructed along them—create a physical barrier between the lands situated on either side. Consequently, structures are required to facilitate the passage of people, wildlife, and vehicles—depending on land use—as well as the continuous or seasonal flow of water, dictated by topographic and hydrological characteristics. Culverts are the structures that provide these crossings. This study analyzes issues encountered with hydraulic culverts along railway lines, demonstrating how soil mechanics, hydrology and climatic shifts—

[1] İnşaat mühendisi, İstanbul Üniversitesi – Cerrahpaşa, jguzmansalazar@ogr.iuc.edu.tr
[2] İnşaat mühendisi, İstanbul Üniversitesi – Cerrahpaşa, tnyamwaro@ogr.iuc.edu.tr
[3] Prof. Dr., İstanbul Üniversitesi – Cerrahpaşa, ozgur.bezgin@iuc.edu.tr (Sorumlu yazar)

combined with inadequate embankment width and compromised soil-structure interaction—critically undermine track stability.

Keywords: *Railway, culvert, climate change, hydrology.*

1. GİRİŞ

Dünya yüzeyinin yaklaşık %29'unu kaplayan karasal alan üzerinde yer alan yerleşim ve üretim merkezleri arasında gerçekleşen karasal hareketlilik yaklaşık 65 milyon kilometre uzunlukta olan karayolu ağı ve yaklaşık 1.3 milyon kilometre uzunlukta olan demiryolu ağı ile sağlanmaktadır (Rodrigue, 2024). Taşınan insan ve canlı sayısı veya ürün miktarı ile varılan noktanın, harekete başlanan noktaya olan mesafesi ile bu mesafenin aşılması için gereken zaman, ulaştırma mühendisliğinin tasarıma dair üç ana değişkenidir. Ulaştırma mühendisi, miktar-mesafe-zaman birlikteliğini temsil eden bu temel üçlü kavrama, güvenlikli, güvenilir ve rahat ulaşım değişkenlerini de katmaktadır. Ulaştırmanın hedefi, kaynakları en iyi şekilde harcayarak, yüksek sayıda ve miktarda can ve malı, en uzak noktalara ve noktalar arasında, en kısa zamanda, güvenle, güvenilir ve rahat bir şekilde ulaştırmaktır. Ulaştırma mühendisliği, bu hedef kapsamında gereken tüm öngörüyü, planlama ve projelendirmeyi gerçekleştirmesi gereken mühendislik dalıdır (Bezgin, 2025).

Ulaştırma mühendisliği, inşaat mühendisliğinin bütün dalları ile birlikte, çevre, metalurji, elektrik ve elektronik, bilgisayar ve makine mühendisliğine de gereksinim duyan bir bütündür. Bir demiryolu hattı, birbiri ile etkileşim içerisinde bulunan birçok yapısal unsurun bir arada ve hat üzerinde hareket eden araç ile etkileşimi de içeren mekanik bir bütünlüktür. Bir demiryolu hattını taşıyan doğal zemin, dolgu zemin, zemin içerisinde ve üzerinde yer alan köprü, yolaktaran, tünel ve menfez gibi yapıları, hat geçkisini var eden daimî ve seçeneksiz unsurlardır. Bu nedenle, hattın hizmet ömrü boyunca değişen coğrafi ve iklim koşulları artan kullanım sıklığı altında da sürekli hizmet vermesi gereken yapılardır. Bu çalışma, demiryolu hat altyapısını oluşturan unsurlardan bir tanesi olan hidrolik menfezlerin yetersiz kaldıkları durumlarda doğabilecek sorunlara dair bir inceleme sunmaktadır. Menfezler, bir köprü, tünel veya yolaktaran gibi yapıların aksine toplumun çok fazla ilgisini çekmemektedirler. Açıklıkların sınırlı oluşu ve mimarilerinin de gösterişsiz oluşu, yapısal olarak menfezlerin bir demiryolu hattının güvenliği için son derece önemli olduğu gerçeğini değiştirmemektedir.

Sıradaki bölüm, menfezlerin türlerine dair kısa bir irdelemenin ardından, menfezlerin hat üst yapısı ile mekanik ilişkisine dair bir irdeleme sunacaktır. Ardından gelen iki bölüm içerisinde, türlü nedenler ile yetersiz kalan menfezlerin demiryolu hatlarında yarattıkları hasar ile oluşan kazalar incelenecektir ve ardından çalışma sonlandırılacaktır.

2. MENFEZ TÜRLERİ

Menfezler, malzemelerine ve geometrik düzenlerine göre farklı türlerde sınıflandırılabilir. Bu çeşitlilik, yapılacak geçiş açıklığı, tasarım debisi, zemin koşulları ve üst yapıdan aktarılan yükler gibi saha koşullarına bağlı olarak farklı yapısal ve hidrolik çözümler üretilmesine olanak tanır. Uygulamada yaygın olarak kullanılan menfez geometrileri dairesel (boru), kutu, kemer, boru-kemer ve eliptik kesitlerdir; daha yüksek hidrolik kapasite gerektiren geçişlerde ise çok gözlü menfezler kullanılabilir (Benn vd., 2019). Demiryolu hatlarında

menfez tipi ve malzemesinin seçimi yalnızca hidrolik yeterlilikle değil, aynı zamanda hat alt yapısı tarafından taşınması gereken dinamik trafik yükleri, zemin-yapı etkileşimi ve uzun dönemli bakım gereksinimleriyle de doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle menfez tipi ve malzemesinin seçimi, menfezin uzun dönemli hidrolik ve yapısal performansı açısından önemli bir tasarım unsurudur.

2.1. Boru Menfezler

Boru menfezler beton ve MDPE, HDPE ile bazı durumlarda UPVC gibi plastikler dahil olmak üzere farklı malzemelerden üretilebilir (Benn vd., 2019). Malzeme seçimi büyük ölçüde beklenen hizmet ömrüne, korozyon direncine, taşınacak yüke ve çevredeki dolgu malzemesinin özelliklerine bağlıdır (Benn vd., 2019). Oluklu metal borular ise hafiflikleri, dayanımları, dayanıklılıkları ve kolay montajları nedeniyle yaygın olarak kullanılmıştır (Hay, 1982).

Bir boru menfezin kapasitesi yalnızca çapına değil, aynı zamanda giriş ve çıkış koşullarına da bağlıdır. Giriş kontrolü altında kapasiteyi büyük ölçüde giriş geometrisi belirlerken, çıkış kontrolü altında mansap su seviyesi, boru sürtünmesi ile giriş ve çıkış kayıpları daha belirleyici hale gelir (Benn vd., 2019). Bu nedenle, özellikle yağış rejimlerindeki değişkenlik dikkate alındığında, boru çapının yalnızca geçmiş debi verilerine değil, güncellenmiş taşkın frekans analizlerine dayandırılması önemlidir (bkz. Bölüm 4).

2.2. Kutu Menfezler

Doğru tasarlanmış bir kutu menfez, üst yapıdan aktarılan ağır trafik yüklerini güvenle taşıyabilir ve genellikle betonarme olarak inşa edilir (Benn vd., 2019). Düz tabanlı yapısı dere yatağının doğal profiline yaklaşan bir geçişe imkân verse de, zaman içinde malzeme yorulması, korozyon veya birleşim noktalarında ayrılmalar, menfez gövdesinin alt yapıyla temas ettiği bölgelerde erozyona bağlı boşlukların oluşmasına katkıda bulunabilir. Bu tür bir bozulma, demiryolu hat alt yapısının yük taşıma kapasitesini kritik düzeyde azaltabilir; nitekim bu durum, sonraki bölümlerde ele alınan vaka çalışmalarında gösterilecektir.

2.3. Kemer Menfezler

Kemer menfezler, dere profilinin doğal bütünlüğünün korunmasının öncelikli olduğu ve zeminin uygun yapısal koşullar sunduğu durumlarda tercih edilir (Balkham vd., 2010). Bu geometri tabanın doğal zemin olarak kalmasına izin verdiği için, su yaşamının korunmasının ve balık geçişinin öncelikli olduğu alanlarda çevresel faydalar sağlayabilir. Kemer menfezler taş, kâgir veya betonarme malzemeden inşa edilebilir (Benn vd., 2019; Hay, 1982). Ancak tabanın kaplamasız bırakılması, menfezin hidrolik ve yapısal performansının doğal zeminin taşıma kapasitesine ve oyulmaya karşı direncine bağlı hale gelmesi anlamına gelir. Bu nedenle tasarım aşamasında zemin mekaniği verileri dikkatle değerlendirilmelidir.

2.4. Eliptik ve Boru-Kemer Menfezler

Düşey açıklığın sınırlı olduğu durumlarda eliptik ve boru-kemer menfezler, dairesel kesitlere alternatif olarak kullanılabilir; bu kesitler sınırlı yükseklik koşullarında daha geniş bir açıklık sağlayabilir (Benn vd., 2019).

2.5. Çoklu Gözlü Menfezler

Tek bir menfezin yeterli hidrolik kapasite sağlayamadığı durumlarda, birkaç menfez borusu veya kutu gözü yan yana yerleştirilerek çok gözlü menfezler oluşturulabilir. Bu çözüm özellikle geniş dere yataklarında veya mevcut dolgu yüksekliğinin tek bir büyük borunun

kullanılmasına izin vermediği durumlarda uygulanabilir (Hay, 1982). Bu tür menfezlerde düzenli denetim yapılması ve gözler arasındaki dolgunun izlenmesi büyük önem taşır.

2.6. Baş Duvarları ve Kanat Duvarları

Menfez tipinden bağımsız olarak, giriş ve çıkış uçlarında bulunan başlık ve kanat duvarları, menfezin genel performansında önemli rol oynar. Başlık duvarları yol dolgusunu destekler ve menfez girişinde kararlı bir geçiş sağlarken, kanat duvarları menfez ile çevredeki su yolu arasındaki geçişi oluşturur ve erozyondan korunmaya da katkıda bulunabilir (Balkham vd., 2010). Başlık duvarları ayrıca menfez girişine akışın verimliliğini artırabilir ve açıklığın çevresindeki dolguyu tutabilir (Hay, 1982). Bu yardımcı yapıların bulunmaması veya hasar görmesi durumunda, menfez tipinden bağımsız olarak alt yapıda erozyon ve boşluk oluşumu riski artabilir.

2.7. Menfez Türü ve Malzeme Tasarım Kriterleri

Menfez tipi ve malzemesinin nihai seçimi, çok değişkenli bir mühendislik kararıdır. Tasarım debisi genellikle 50 veya 100 yıllık taşkın gibi belirli bir taşkın dönüş periyoduna göre belirlenir. Bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak ele alınacağı üzere, böyle bir olayın belirli bir hizmet süresi boyunca en az bir kez yaşanma olasılığı, maruz kalma süresi arttıkça yükselir. Bu ilişki, menfez boyutlandırmasında uygun güvenlik payının belirlenmesi açısından önemlidir.

Menfez seçiminde ayrıca erozyon ve oyulma riski, enkaz birikmesi, sediman taşınımı ve yaban hayatı geçişi gibi çevresel ve bakım gereksinimleri de dikkate alınmalıdır. Bu hususların göz ardı edilmesi, sonraki bölümlerde ele alınan demiryolu kazalarında görüldüğü üzere, menfezin öngörülen tasarım ömrü sona ermeden yetersiz hale gelmesine neden olabilir.

Sonuç olarak, menfez türü ve malzemesinin seçimi; beklenen debiye, saha topografyasına, zemin koşullarına, hizmet ömrü beklentisine, çevresel önceliklere ve inşaat bütçesine bağlı olarak belirlenmelidir. Ancak bu seçim, yalnızca hidrolik yeterliliği değil, aynı zamanda demiryolu üst yapısının ilettiği statik ve dinamik yükler altında zaman içinde sürdürülebilecek yapısal bütünlüğü de garanti etmelidir. Şekil 1'de, Tanzanya'da yer alan ve bir Türk firması tarafından inşa edilmiş Darüsselam - Morogoro - Makutupora Demiryolu Projesi kapsamında inşa edilen betonarme bir menfez görülmektedir (Yapıray, 2018). Alın ve kenar duvarları ile taban tabliyesi ile birlikte inşa edilen menfez, bünyesinde yer aldığı dolgu ile uyumlu en fazla 20 cm kalınlıkta kohezyonsuz katmanlar halinde, en yüksek kuru yoğunluğun en az %95'i olacak şekilde sıkıştırılırlar.



Şekil 1. Betonarme kutu menfezin dolgu içerisine yerleşim süreci (Yapıray, 2018)

Günümüzde, demiryolu hatları boyunca farklı tarihlerde, farklı inşa yöntemleri ile imal edilmiş birçok menfez türü bulunmaktadır. Köprü, yolaktaran ve tünel gibi yapıların aksine menfezlerin yapısal standartları değişken olabilmektedir. Her menfezde, alın duvarları, kanat duvarları, taban betonu, eşikler ve tersip bentleri farklı standartları takip edebilmekte ya da bütün olarak eksik de kalabilmektedir. Hidrolik menfez bölgelerinde gözlenen hasarlar, çoğu zaman bu yetersizliklerden kaynaklanmaktadır. Sıradaki bölümde, menfezlerin demiryolu hat üst yapısı ile olan bu mekanik ilişkisi ayrıntılı olarak ele alınacak; ardından gelen vaka incelemelerinde ise, menfez türü ve malzemesindeki yetersizliklerin gerçek hat kazalarına nasıl yol açabildiği somut örnekler üzerinden tartışılacaktır.

3. MENFEZLERİN DEMİRYOLU İLE ETKİLEŞİMLERİ

Demiryolu araçlarının hareket kinematiği ile karayolu araçlarının hareket kinematiği arasında büyük farklılıklar bulunur. Hareket güvenliği ve yönetimi açısından en büyük farklılık, hızlanma ve yavaşlama mesafeleri olup, 30-120 km/saat seyir hız aralığında bir karayolu taşıtının ıslak asfalt yolda ve %85 temsil değeri ile 2,5 saniye süren bir algı-tepki durabilmesi için 40 m – 220 m yeterli olmaktadır (KGM, 2022). Ancak, tam yüklü ve yüksek hız durumunda yük ve yolcu trenleri için bu değer 1.000 m – 2.000 m aralığında olabilmektedir (Hay, 1982). Bir karayolu üst yapısı üzerinde sürücünün görüş mesafesi içerisinde algılanabilen menfez kaynaklı bir hasar meydana geldiğinde, durabilen trafiğin aksine, bir demiryolu menfezi kaynaklı üst yapı hasar durumu görüş mesafesi içerisinde algılanabilse bile, algılamanın gerçekleştiği görüş mesafesi, durabilmek için gereken mesafenin çok altında kalmaktadır. Bu durum sonucunda, 32 Ton olabilen yüklü bir kamyona veya yüklü halde 25 Ton olabilen şehirlerarası yolcu otobüsüne kıyasla, 10.000 Ton olabilen bir yük treni veya dolu halde 500 Ton olabilen bir hızlı yolcu treni raydan çıktığında oluşan hasar felaket derecesinde gerçekleşmektedir. Bu nedenle bu çalışma, hidrolik demiryolu menfezlerine odaklanmaktadır.

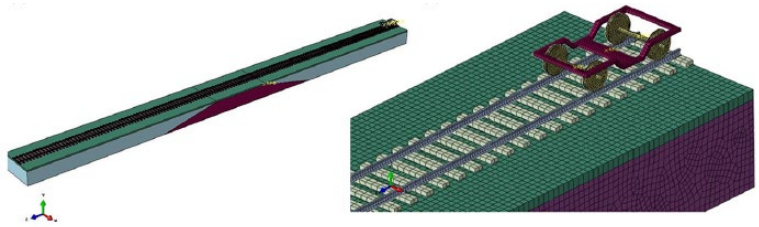
Demiryolu hattı ile gömülü bir menfez arasındaki etkileşim, temel olarak bir esneklik geçişi ve diferansiyel oturma sorunudur. Demiryolu hatlarının seyri boyunca yapısal ve geoteknik özelliklerindeki ani değişiklikler, normalde zemin esnekliği geçişleri, diferansiyel oturmalar ve nihayetinde demiryolu sisteminin performansını düşüren asılı traversler ile ilişkilidir (Bezgin ve Wehbi, 2019).

Bir tren menfez üzerinden geçerken, dinamik yükler hat yapısı, balast ve dolgu yoluyla alttaki menfeze iletilir. Menfez esneme direnci, çevredeki zeminden önemli ölçüde daha fazla olduğu için bu yükleri farklı şekilde dağıtarak şu etkilere neden olabilir:

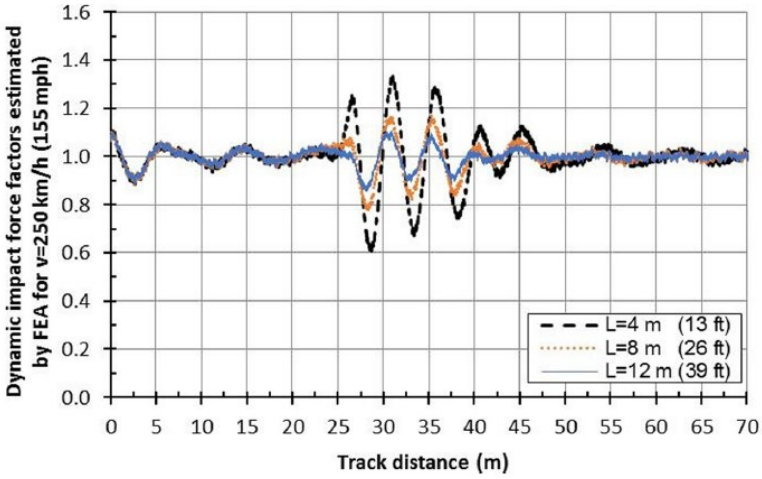
i. Menfez ile bitişik dolgu arasındaki geçişlerde yerel diferansiyel oturmalar;
ii. Menfeze bitişik dolgu malzemelerinde artan dinamik gerilmeler;
iii. Yükseltilmiş hat titreşimleri ve azalan sürüş konforu;
iv. Geçiş bölgelerinde hat geometrisinin hızlanmış bozulması.

Bu etkilerin şiddeti, menfez üzerindeki dolgu derinliğine kritik olarak bağlıdır. Araştırmalar, menfez üst yüzeyinin balast tabanının yaklaşık 1.5 m veya daha küçük mesafelerde yer alması durumunda özel geçiş bölgelerinin gerekebileceğini göstermektedir (Varandas vd., 2016). Menfezi çevreleyen toprağın sıkıştırılması, yerel diferansiyel oturmaları en aza indirmek için kilit unsurdur. Ayrıca, menfez prefabrik parçalarının doğru sızdırmazlığı esastır; zamanla yerel su sızıntıları hat boyunca kusurlara ve diferansiyel oturmalara neden

olabilir. Menfezin hemen öncesindeki ve sonrasındaki geçiş bölgeleri (tipik olarak her iki tarafta 10–30 m), hat performansı açısından en büyük endişe kaynağıdır. Şekil 2a'da, toprak dolgu zemin ile destekli balastlı bir demiryolunun, toprak dolgunun kademeli olarak azalarak beton bir yapıya geçişi ve bu yapıdan çıkışı sonlu elemanlar modeli ile tasvir edilmiştir (Bezgin ve Wehbi, 2019). 250 km/saat hızda ilerleyen tren üzerinde, hat boyunca esneme direncinin farklı mesafeler boyunca değişmesi ile doğan milimetre mertebesindeki oturma farklılıklarından kaynaklı dinamik darbe kuvvetleri Şekil 2b' de görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 2. Hat boyunca, esneme direnci değerlerinde meydana gelen değişim ile doğan dinamik darbe kuvvet katsayıları (250 km/saat tren hızı). (Bezgin ve Wehbi, 2019)

Dolayısıyla demiryolu menfezleri, hat boyunca yarattıkları kuvvet-oturma ilişkisindeki değişimler ile mekanik açılardan dikkatle incelenmesi gereken ve hat boyunca sağladıkları yapısal desteğin uygun ve sürekli olması için gerekli inceleme ve bakım süreçleri gerektiren önemli yapılardır.

4. TASARIMA ESAS OLAYLARIN OLUŞMA OLASILIKLARI

Bir zaman dilimi içerisinde, örneğin 1 yıl içerisinde gerçekleşme olasılığı bulunan bir olayın daha uzun süreçler içerisinde gerçekleşme olasılığı zamanla artar. Denklem 1, bir olayın birim zaman içerisinde (n_1) gerçekleşme olasılığına (p_1) göre, belirli bir süre (n_2) içerisinde gerçekleşme olasılığını (p_2) ifade eder (NASEM, 2021).

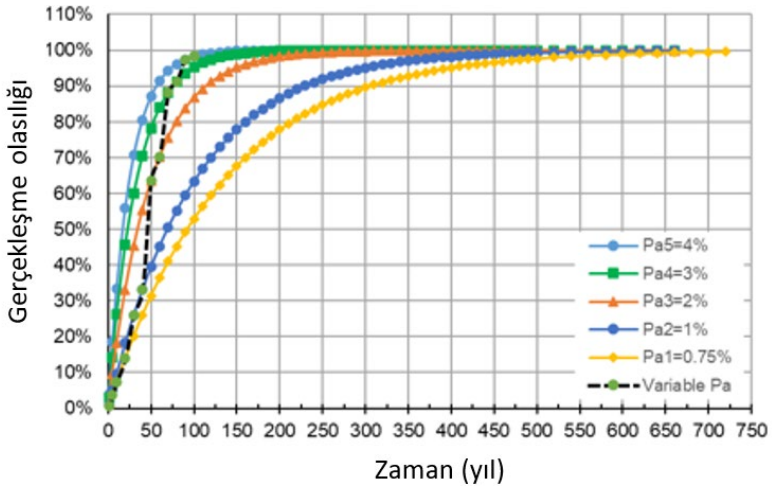
$$p_2 = 1 - (1 - p_1)^{\frac{n_2}{n_1}} \quad (1)$$

Bu durumda, Denklem 2, yıllık olarak gerçekleşebileceği düşünülen ve her yıl gerçekleşen sıradan yağışlardan daha şiddetli bir yağışın, yıllık (n_1=1) gerçekleşme olasılığı p_1=%1

öngörüsüne göre, n_2=50 yıl içerisinde gerçekleşme olasılığını p_2=%39,4 olarak belirtmektedir.

$$p_2 = 1 - (1 - 0.01)^{\frac{50}{1}} = 0.394 = \%39{,}4 \quad (2)$$

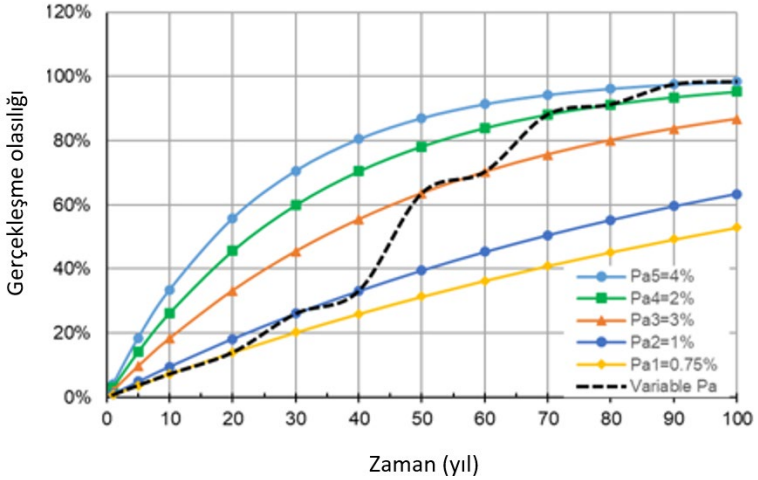
Şekil 3' de, tasarıma esas oluşturan ve bu durumda menfezlerin tasarımında dikkate alınacak yağışlardan doğacak akışların tespitinde kullanılan ve farklı yıllık olasılık değerlerine göre beklenen yağışların, zaman içerisinde birikimli olarak büyüyen gerçekleşme olasılıklarını göstermektedir. Şekil 3' de sunulan zaman aralığı elbette günümüz inşaat mühendisliği eserleri için oldukça uzundur. Bununla birlikte 100 yıldan daha uzun süreler içerisinde hizmet veren, örneğin menfez gibi bir yapının, geçirim haddini zorlayacak bir akışa maruz kalma olasılığı neredeyse kesindir. Şekil 3' de ayrıca, yıllık gerçekleşme olasılığı artan durum da tasvir edilmektedir.



Şekil 3. Bir olayın yıllık olarak gerçekleşme olasılığına bağlı olarak zaman içerisinde birikimli olarak gerçekleşme olasılığı.

Ulaştırma yapılarını oluşturan unsurların hizmet ömürleri farklılık göstermektedir. Bu farklılıklar, ulaştırma talebinin zaman içerisinde değişen değerleri, kamulaştırma maliyetleri, zaman içerisinde artabilen üst yapı gereklerini karşılayacak altyapı ihtiyaçları bağlamlarında değerlendirilirler. Yapıların aşınan yüzeyleri, örneğin karayolu kaplamalarının hizmet ömürleri 5-10 yıl arasındadır. Demiryolu hatlarının ray unsurları için, uygun bir bakım süreci ile 15 – 40 yıl hedeflenmektedir. Demiryolu hat üst yapısını oluşturan ve rayların tespit edildiği traverslerin 40 yıl hizmet verebilmeleri hedeflenmektedir. Bir köprü veya tünel için hizmet ömrü 100 yıl olabilmektedir. Bu süreler ötesinde tünel ve köprünün yer aldıkları geçkilerde hizmetin devam ettirilebilmesi için gabarilerin ve temellerin de gelecekte ihtiyaç duyulabilecek ek hatları içerek şekilde tasarlanmaları gerekir. Hattı oluşturan menfez gibi altyapı unsurlarının, bu unsurların tasarımında dikkate alınan meteorolojik değişimlere de bağlı konuların öngörülebilirlikleri kapsamında uzun hizmet ömürlü olmaları ama yıllık ve birkaç yıllık bakım aralıklarında denetlenmeleri gerekir. Sonsuz hizmet ömrüne sahip yapıların tasarlanmaları, kısıtlı kaynakların doğru kullanımı açısından mümkün ve anlamlı bir seçenek olmayıp, kısıtlı hizmet ömürleri de sürekli yenileme gerektireceği için kötü bir tercih olacaktır. Dolayısıyla hizmet ömrü, ezbere dayalı bir değer olmayıp, ilgili ulaştırma yapısının amacı ve maruz kaldığı ve kalacağı öngörülen etkiler bağlamında değerlendirilmesi gereken bir konudur. Özellikle iklimsel etkilere göre tasarlanan, arazi kullanımında meydana gelebilecek etkilere açık yapıların hizmet

ömürlerinin, öngörülebilirlik içerisinde değerlendirilmeleri önemlidir. Öngörülerin, güncel gerçekler ve değişimler bağlamlarında sorgulanmaları ve gerektiğinde güncellenmeleri gerekmektedir. Şekil 4, Şekil 3'ün, günümüzde inşaat mühendisliği eserlerinin hizmet ömürleri kapsamında ifadesidir.



Şekil 4. Şekil 3' de yer alan bilgilerin, inşaat mühendisliği yapılarının en fazla 100 yıl olarak değerlendirilen hizmet ömrü içerisinde gösterimi.

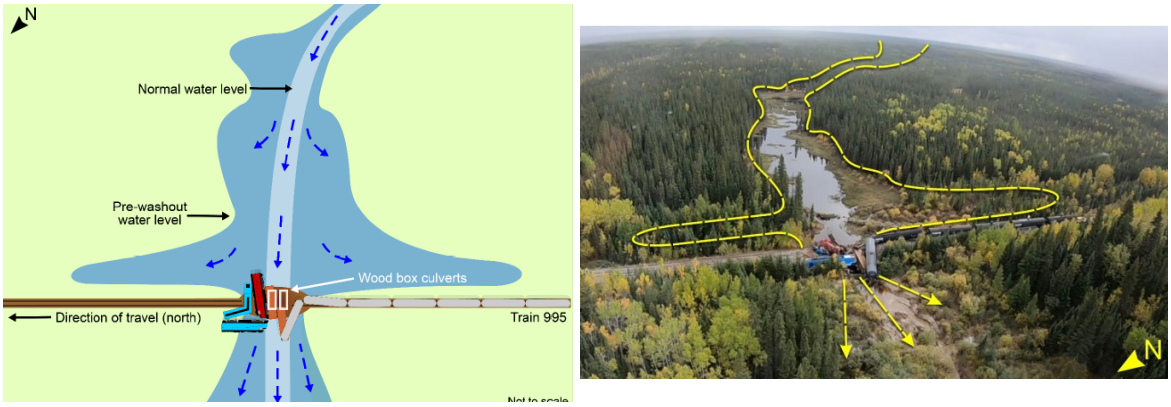
Şekil 4' de vurgulanmak istenen önemli bir konu, iklim değişikliği veya topografya ve kullanım amacı değişen arazi koşullar ile yıllık gerçekleşme olasılığı değişen bir olayın zaman içerisinde değişebilen gerçekleşme olasılığıdır. Yıllık %0.75 olasılık ile beklenen bir olayın, 20 yıllık sabit bir sürecin ardından 10 yıllık aralıklar ile artışı, sabit yıllık değere göre belirlenen hizmet ömründe de bir değişime neden olacaktır. Yıllık %0.75 olasılık ile 50 yılda gerçekleşme olasılığı %32 olarak değerlendirilen bir olayın gerçekleşme olasılığı aslında %63' e çıkmış durumdadır. Bir diğer anlamda, tasarım girdileri meteorolojik ve hidrolojik değerlendirmelere bağlı olan menfez gibi yapıların hizmet ömürleri sabit değerler olmayıp, güncellenmesi gereken değerlerdir.

Bir menfezin hizmet verdiği akış havzasının kullanım amacı, zaman içerisinde tarımsal araziden, sanayi arazisine değişerek yüzey geçirimliliği değiştirdi ise bu durum, bir yağış sonrasında akışa geçecek suyun miktarını da değiştirecektir. Öte yandan, iklim değişikliği ile beklenen yağış şiddetinde bir artış gerçekleşiyorsa, bu durum aynı havzanın daha çok akış üreteceği anlamına gelebilecektir. Zaman içerisinde düzenli tarım alanlarına dönüşen arazilerden süzülen sular, içerdikleri kil, silt gibi ince muhteva ile akışa geçen suyun içeriğini değiştirerek, suyolu üzerinde tıkanmalara yol açabilecektir. Bir menfezin hizmet verdiği havza içerisinde yapılan tarımın türü, tarım toprağının içeriğinde de değişikliğe yol açabilecektir (Negasa, Ketema vd., 2017). Bu ve sayısız birçok olasılık, menfezlerin hizmet yeterliliklerinin sınanmasını bir zorunluluk haline getirmektedir.

5. BİRİNCİ VAKA

15 Eylül 2018 tarihinde, Hudson Bay Railway (HBR) şirketine ait 995 numaralı yük treni, Wekusko Hattı üzerinde kuzey yönünde yaklaşık 40 km/s hızla ilerlerken, Manitoba'daki Ponton yakınlarında, 160. Kilometrede menfez üzerinde hat altyapısında meydana gelen bir oyulma sonrası asılı kalan hat çerçevesi üzerinden geçerken raydan çıktı. ile karşılaştı. Aşınma ile oluşan boşluk, yaklaşık 15 metre uzunluğunda ve 4,5 metre derinliğinde idi.

Bu oyulma ve zemin tabanı çökmesi, ray hattının hemen yanında yükselen su seviyelerinin, neme duyarlı kum dolguda suya doygunluğa ve gözenek suyu basıncı artışına yol açması sonucunda meydana geldi. Gerekli ray kontrolleri yapılmış ve menfezler temizlenmiş olsa da, Hudson Bay Demiryolu'nun hat denetçileri, demiryolu dolgusu boyunca suyun düzensiz bir şekilde birikmesinin oluşturduğu tehlikeyi tam olarak kavrayamamışlardı. Kazanın gerçekleştiği sene görülen ve tarihsel normların yaklaşık %60 üzerinde olan yoğun yağışlar, geçkinin 160. kilometresindeki yükseltilmiş demiryolu dolgusunun hemen doğusunda ve bitişiğinde su birikmesine neden oldu. Şekil 5a'da, aşırı yağış ile yatağından taşan ve dolgunun mansap tarafında biriken suyun etki alanı görülmektedir. Şekil 5b, tasvir edilen bölgenin havadan çekilmiş resmini göstermektedir (Transportation Safety Board of Canada, 2020).



Şekil 5. Aşırı yağış ile meydana gelen taşkın ile yetersiz kalan menfezin etrafından dolgunun kayması ile meydana gelen kazanın hava fotoğrafı (Transportation Safety Board of Canada, 2020).

Şekil 6'da, hattın altının oyulduğu menfez bölgesi görülmektedir.



Şekil 6. Menfez üstü dolgunun ve balastın kayarak oluşturduğu boşluğun kısmi görüntüsü (Transportation Safety Board of Canada, 2020).

Raydan çıkma olayının gerçekleştiği yerin doğusundaki arazi, yaklaşık 26 kilometrekarelik bir çam, ladin ve köknar ağaçlarından oluşan ormanlık alanı kapsamaktadır. Derenin doğal akışı esas olarak kuzeybatı yönünde olup, kaza mahallinin yakınında drenaj; demiryolu hattının 155,2, 160,3, 160,7 ve 160,9 kilometrelerde bulunan menfezler aracılığıyla sağlanmakta idi. Normal su akışı koşullarında bu menfezlerin her biri birbirinden bağımsız

olarak işlev görüyordu. 160,3. kilometrede su, ray seviyesinin 3,6 metre altına yerleştirilmiş olan ahşap kutu menfezlerden geçiyordu. Ancak, yüksek su hacmi nedeniyle su geriye doğru birikiyor ve demiryolu hattının doğusunda (mansabında) büyük bir su havuzu oluşturuyordu. Raydan çıkma olayının ardından havadan yapılan incelemeler, kıyı şeridindeki belirgin su izlerinden de anlaşıldığı üzere, demiryolu hattının doğusunda yakın zamanda yüksek su seviyeleri oluştuğunu ortaya koydu.

6. İKİNCİ VAKA

8 Temmuz 2018'de, Edirne ile İstanbul şehirleri arasındaki Uzunköprü-Halkalı Bölgesel hattında 362 yolcu taşıyan bir yolcu treni Tekirdağ'ın Çorlu İlçesinin Sarılar Köyü yakınında raydan çıktı; kazada 25 yolcu hayatını kaybetti, 42 yolcu ise ağır yaralandı.

Raydan çıkma olayının nedeni, kısmen tıkanan bir menfezin işlevini yitirmesi ve menfezi çevreleyen dolgunun aşınarak oyulmasıydı (Bezgin, 2024). Yaklaşık 150 yıllık olduğu tahmin edilen bu tuğla tonozlu taş kagir menfez, demiryolu hattının altından geçişini sağlayabileceği kapasitenin üzerinde bir debiyle gelen akışı tahliye edememiştir. Aşırı akış menfezi doldurmuş ve demiryolu hattının üzerinden taşmıştır. Ancak asıl hasar, sel sularının menfezin çevresindeki ve üzerindeki dolgu toprağını aşındırıp oymaya başlamasıyla meydana gelmiştir. Menfez üzerine birbirine yaklaşık olarak dik iki ayrı yönden gelen akımlar, menfezin mansabında türbülansa neden olmuştur.

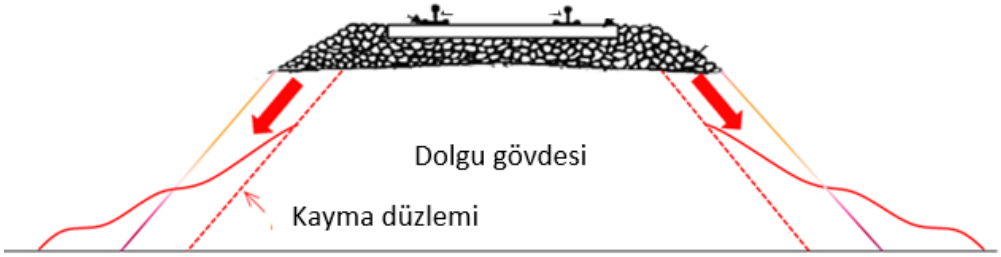
Menfezin üzerindeki dolgu eteklerinin, demiryolu hattının altını boşaltmış ve bu durum, menfez üzerindeki hat üst yapısının çökmesine yol açmıştır. Yaklaşık 12 metre uzunluğundaki bir hat paneli, menfezin yaklaşık 45 cm üzerinde havada asılı kalmıştır. Şekil 5a ve 5b, altı boşalan hattı ve çöken dolguyu göstermektedir. Menfezi çevreleyen dolgu, kontrolsüz bir şekilde büyüyen yabani bitkiler nedeniyle zayıflamıştı; bu bitkilerin büyük kökleri, dolgu şevleri içinde zayıflık düzlemleri oluşturmuştu. Erozyon önleyici özel çim türlerinin aksine, derin ve büyük köklere sahip yabani bitki örtüsü, dolgu toprağının stabilitesi açısından zararlıdır ve bu hat üzerinde de etkisi olumsuz olmuştur. Şekil 7'de, kazaya neden olan menfez üzerinde kayan dolgu ile asılı kalan hat çerçevesi görülmektedir. Şekil 8'de, çöken dolgu şevleri, Şekil 9' da ise çöken şevin eskizi ve yetersiz dolgu genişliği nedeniyle, kayan şevler nedeniyle kayan balast katmanı tasvir edilmektedir.



Şekil 7. Doğu (sol) ve batı (sağ) yönlerinde görülen hattın menfez üzerinde asılı kalan bölümü (Bezgin, 2024)



Şekil 8. Toprak dolgu gövde şevlerinde yabani bitki oluşumu ile zayıflayan katmanların kayması ile tetiklenen ray altı boşalması.



Şekil 9. Toprak dolgunun yetersiz genişliği ve dolgu gövdesi içerisinde yabani bitki oluşumları ile zayıflayan şevlerin kayması sonrasında balast katmanının çökmesinin tasviri.

7. SONUÇ

Ulaştırma yapıları, birbiriyle sürekli ve dinamik etkileşim içerisinde bulunan çok sayıda yapısal ve geoteknik bileşenin oluşturduğu bir bütündür. Bu bütünlük içerisinde hidrolik menfezler, demiryolu hat altyapısının sürekliliği ve güvenliği açısından kritik unsurlardır. Bu çalışma kapsamında sunulan kuramsal değerlendirmeler ve incelenen vaka analizleri, menfez güvenliğinin yalnızca hidrolik akış kapasitesi ya da menfez gövdesinin yapısal dayanımı üzerinden değerlendirilemeyeceğini ortaya koymaktadır.

Menfez; içine gömülü bulunduğu dolgu gövdesi, temel zemini ve üzerinden geçen demiryolu üstyapısı ile birlikte çalışan bir zemin-yapı sisteminin parçasıdır. İncelenen saha örneklerinde görüldüğü üzere, hidrolik kapasitenin aşılması sonucunda oluşabilecek hasar, suyun menfez çevresindeki dolgu malzemesini aşındırması, gözenek suyu basıncındaki artışın şev duraylılığını olumsuz etkilemesi ve buna bağlı olarak demiryolu hattının taşıma koşullarının bozulması şeklinde gelişebilmektedir. Dolayısıyla menfezin hidrolik performansındaki bir aksama, doğrudan geoteknik duraylılık ve hat güvenliği problemine dönüşebilmektedir. Dünyamızın iklimsel döngülerinde meydana gelen değişimler ve arazi kullanımındaki dönüşümler, bu yapıların tasarımına esas olan hidrolojik kabulleri zaman içerisinde değiştirebilmektedir. Uzun kuraklık dönemlerinin ardından kısa süre içerisinde meydana gelen şiddetli yağışlar, zemine yeterince nüfuz edemeden yüzey akışına dönüşebilirken; arazi kullanımındaki değişimler havza geçirimliliğini ve yüzey akış koşullarını etkileyebilmektedir. Bu durum, onlarca yıl hizmet vermesi beklenen menfezlerin

tasarım ve hizmet koşullarının zaman içerisinde yeniden değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Bu kapsamda, demiryolu menfezlerinin güvenliğinin sürdürülebilmesi; yapım aşamasında dolgu sıkışma kriterlerine uyulmasının ötesinde, işletme süresince düzenli bir denetim ve bakım sürecini gerektirmektedir. Giriş ve çıkış yapılarında oluşabilecek tıkanma, birikinti ve yerel oyulmaların yanı sıra menfez çevresindeki dolgu ve şevlerde meydana gelebilecek değişimler düzenli aralıklarla izlenmelidir. Özellikle hidrolojik koşulların ve arazi kullanımının değiştiği bölgelerde, mevcut menfezlerin yeterliliklerinin hizmet ömrü boyunca yeniden değerlendirilmesi, olası yetersizliklerin erken aşamada belirlenmesine katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak, demiryolu hatları boyunca menfez ve dolgu güvenliği; hidrolik, zemin mekaniği ve demiryolu hattının geometrik koşullarının birlikte ele alındığı, tasarım aşamasından hizmet ömrünün sonuna kadar sürdürülebilir bir altyapı yönetimi yaklaşımını gerektirmektedir.

KAYNAKLAR

Balkham, M., Fosbeary, C., Kitchen, A., & Rickard, C. (2010). *Culvert design and operation guide* (C689). CIRIA.

Benn, J., Kitchen, A., Kirby, A., Fosbeary, C., Faulkner, D., Latham, D., & Hemsworth, M. (2019). *Culvert, screen and outfall manual*. (C786) CIRIA.

Bezgin, N. Ö. (2024). An investigation of reasons and consequences of deteriorated hydraulic capacities of culverts concerning railway track stability. In *CETRA- 8th International Conference on Road and Rail Infrastructure*. Cavtat, Croatia.

Bezgin, N. Ö. (2025). *Cumhuriyetimizin kuruluşundan günümüze, demiryolu ağımızın gelişimine dair bir inceleme* [Conference presentation]. TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, İnşaat Mühendisleri Odası, Makina Mühendisleri Odası, 2. Raylı Sistemler Kongre ve Sergisi, Eskişehir, Turkey.

Bezgin, N. Ö., & Wehbi, M. (2019). Advancement and application of the Bezgin method to estimate effects of stiffness variations along railways on wheel forces. *Transportation Research Record*, Vol 2673, no.7, 248–264.

Hay, W. W. (1982). *Railroad engineering* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Karayolları Genel Müdürlüğü. (2022). *Karayolu tasarım el kitabı*. Karayolları Genel Müdürlüğü Yayınları.

NASEM_National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2021). *Investing in transportation resilience: A framework for informed choices*. The National Academies Press.

Negasa, T., Ketema, H., Legesse, A., Sisay, M., & Temesgen, H. (2017). Variation in soil properties under different land use types managed by smallholder farmers along the toposequence in southern Ethiopia. *Geoderma*, Vol 290, 40–50.

Rodrigue, J.-P. (2024). *The geography of transport systems* (6th ed.). Routledge.

Transportation Safety Board of Canada. (2020). *Rail transportation safety investigation report R18W0237*.

Varandas, J. N., Hölscher, P., & Silva, M. A. G. (2016). Three-dimensional track-ballast interaction model for the study of a culvert transition. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol 89, 116–127.

Yapıray. (2018). *Projects*. https://www.yapiray.com.tr/projects