

Tip 4 Kurulum ile Betonarme Boru Tasarımı

Havvanur KILIÇ¹
Onur DEMİRCİ²

ÖZ

Gömülü betonarme boru tasarımında yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birisi ACPA tarafından 1970'li yıllarda geliştirilmeye başlanılan doğrudan tasarım yöntemidir. Bu yöntemde (SIDD) Tip 4 boru kurulumunda tabanda kayaç malzeme olmadığında boru tabanında özel bir yatak malzemesine ihtiyaç yoktur ve gömülme için herhangi bir kontrol gerektirmemektedir. Bu çalışmada, doğrudan tasarım yöntemine göre Tip 4 kurulum ile gömülen bir betonarme borunun davranışı incelenmiştir. Bu kapsamda zemin-yapı etkileşimi dikkate alınarak beton bir borunun tasarımı için parametrik sayısal analizler yapılmıştır. Analizlerde gömme derinliği ve boru çapı değişimi dikkate alınarak hesaplanan kesit tesirlerine göre gerekli donatı alanları belirlenerek Tip 4 kurulum koşulları için bir abak oluşturulmuştur. Ayrıca belirlenen bu donatı alanları, ülkemizde gömülü boruların tasarımında yaygın olarak kullanılan İller Bankası A.Ş.'nin kullandığı donatı alanları ile karşılaştırılmıştır. Böylece Tip 4 kurulum koşulları için bu abaktan yararlanılarak pratik olarak tasarım yapılabilmesi amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Gömülü betonarme borular, sonlu elemanlar analizi, doğrudan tasarım.

ABSTRACT

Design of Buried Reinforced Concrete Pipes with SIDD Type IV Installation

One of the most common and widely used methods of buried reinforced concrete pipe design is the direct design method (SIDD) which was started being developed in 1970's. In SIDD Type IV pipe installation, there is no need to use a special bedding material under the pipe invert because a rock material is used in foundation soil. In this study, the behavior of the buried reinforced concrete pipe with SIDD Type IV installation is investigated. In this scope, a parametric investigation was conducted with numerical analysis to design a concrete pipe considering soil-structure interaction concept. In numerical analysis, the

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 28 Kasım 2020 günü ulaşmıştır. 8 Mayıs 2021 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Temmuz 2022 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.832738>

1 Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - kilic@yildiz.edu.tr-
<https://orcid.org/0000-0001-9455-1687>

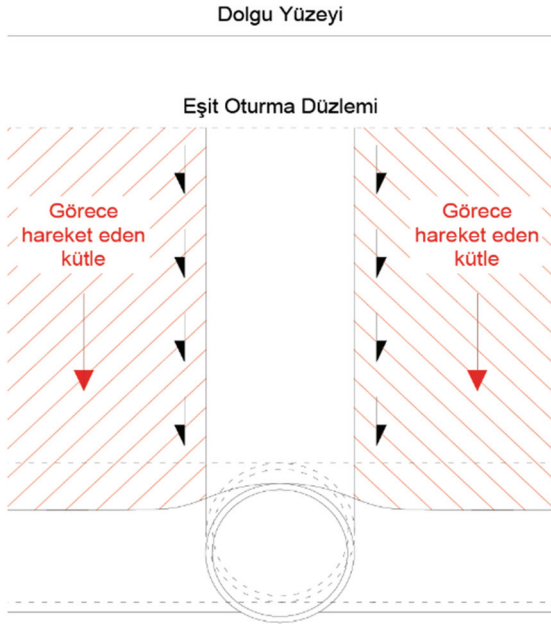
2 Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - onurdemirci1094@gmail.com -
<https://orcid.org/0000-0002-3385-3056>

effects of varying design parameters are investigated such as properties like burial depths and diameter of pipes. Therefore, a reinforcement area chart has been created according to the SIDD Type IV design calculation results which includes internal forces obtained from pipe cross section. Furthermore, these obtained reinforcement areas are compared with reinforcement areas used by İller Bankası A.Ş which are widely used in our country for buried pipe design. Hence, the main scope is to design concrete pipes practically by using this chart for SIDD Type IV conditions.

Keywords: Buried reinforced concrete pipes, finite element analysis, direct design.

1. GİRİŞ

Gömülü boruların üzerine etkiyen yüklerin hesabı ve boru hatlarının güvenli tasarımı için 1900'lerden günümüze kadar çalışmalar halen sürdürülmektedir. Düşey yükler altında şekil değişimine uğramayan veya çok küçük şekil değişimlerine uğrayan borular rijit boru olarak adlandırılmakta ve üzerine etkiyen düşey yükleri boru tacından boru tabanında yatak düzeyine aktararak taşımaktadırlar. Deneysel çalışmalar gömülü rijit borular üzerine etkiyen prizma yükünün mevcut zemin yükünden daha fazla olduğunu göstermektedir.



Şekil 1 - Gömülü beton boru-zemin etkileşimi [7]

Marston ve Anderson (1913) hendek ortamına yerleştirilmiş rijit bir borunun taç düzeyine etkiyen düşey gerilme hesabında, Janssen (1895)'in Silo Teorisi'ni temel almıştır [1, 2]. Bu hesaplarda, boru üzerindeki zemin prizması ağırlığı ve ilave hareketli yük ile hendek yan duvarları ile geri dolgu arasındaki sürtünme de dikkate alınmaktadır [3, 4]. Genellikle boru

rijitliği ile gömülü bulunduğu zemin ortamının rijitliği birbirinden farklı olduğundan, borunun üzerinde yer alan zemin prizması ile komşu zemin prizmaları arasında bir görece hareket söz konusudur. Bu hareketin yönü ve büyüklüğü boru üzerine etkiyen zemin gerilmelerinin büyüklüğünü etkilemektedir. Rijit (betonarme) borularda boru çevresinde yer alan geri dolgu boruya göre daha fazla sıkışacağından, boru üzerindeki zemin prizması ile yan zemin prizmaları ara yüzeylerinde aşağı yönlü kayma kuvvetleri gelişir (Şekil 1). Görece hareketin büyüklüğüne bağlı olarak yan zemin prizması nedeniyle oluşan gerilmeler rijit boru üzerine aktarılır [5]. Bu nedenle rijit boruların tasarımında gömülme koşullarına bağlı olarak boruya aktarılacak gerilmelerin gerçekçi olarak tahmini önemlidir [6].

Boruların tasarımında genellikle yarı-ampirik yaklaşımlara dayanan yöntemlerden, arazi ve laboratuvar deneyleri ve sayısal analizlerden yararlanılabilir. Gömülü boru ve boruyu çevreleyen zeminin davranışı zemin-yapı etkileşimi problemi olarak ele alındığından boruların davranışı yükleme miktarı, boru rijitliği, yataklama, geri dolgu özellikleri ve yerel zemin koşullarından etkilenmektedir [7].

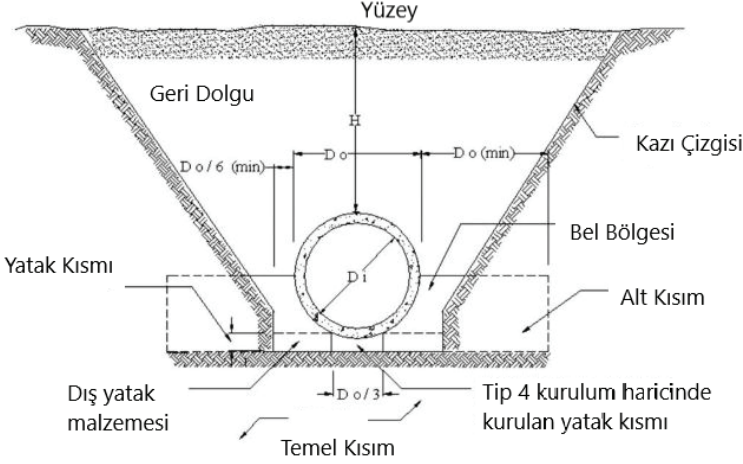
Gömülü boru hatlarında amaçlanan yapısal performansın elde edilebilmesi için yönetmeliklere uygun bir yataklama ve geri dolgu uygulaması gereklidir. Yatak ve dolgu malzeme özellikleri temel zemini koşullarına, boru cinsine, kullanım amacına ve boru üzerine etkiyen statik ve dinamik yüklere vb. birçok faktöre göre değişebilir. Genellikle su, atık su ve drenaj borusu uygulamalarında Amerikan Su İşleri Birliği (AWWA) tasarım kılavuzlarına ve standartlarına, ASTM ve AASHTO'nun yürürlükteki standartlarına uyulmaktadır. Ayrıca beton borular için doğrudan tasarım yöntemi (ASCE 15-98) veya bazı üretici firmaların geliştirdiği özel tasarım kılavuzları dikkate alınmaktadır [8]. Bu tasarım kılavuzlarında yataklama ve dolgu malzemeleri için açıklamalar ve sınıflandırmalar yer almakta, böylece tasarımın öngörülen servis süresi boyunca sorunsuz işlev görebilmesi için yeterli dayanıma ve/veya rijitliğe ve duraylılığa sahip olması sağlanabilmektedir. Gömülü beton boruların tasarımında genellikle doğrudan ve dolaylı tasarım yöntemi olarak bilinen yöntemler kullanılır. Bu yöntemlerin detayları ve avantaj-dezavantajları Erdoğan vd. (2009)'da ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur [9]. Allard ve Naggar (2016)'da doğrudan tasarım yönteminde kullanılan Heger basınç dağılımının zemin-yapı etkileşimi kapsamında doğruluğu ve uygulanabilirliğini parametrik sayısal analizler ile araştırılmıştır [10].

Beton boruların kurulumu AASHTO LRFD (2014) Köprü Tasarım Şartnamesi, Bölüm 27 veya ASCE 15-98'e uygun olarak gerçekleştirilir. Şekil 2'de hendek veya dolgu durumunda boru gömülmesi ve boru gömülme terminolojisi gösterilmiştir. Burada D_o boru dış çapı, D_i boru iç çapı, H boru tacından zemin yüzüne olan dolgu yüksekliğini göstermektedir. Boru tabanında boru çapının $1/3D_o$ kadarlık bölümü (orta yatak) olarak ifade edilerek genellikle gevşek bırakılmaktadır.

ASTM C76'da dolaylı tasarım yöntemi ve ASCE 15-98 standardına göre ise doğrudan tasarım için standart kurulumlar (SIDD) kullanılarak tasarlanan gömülü beton boru hatlarının kurulum uygulamaları belirtilmiştir. Bu standart dolgu malzemeleri için I, II ve III, IV kategorilerinde farklı zeminler tanımlanmıştır (Tablo 1). Bunlardan I ve II kategorileri iri daneli zeminleri ve III ve IV kategorileri ince daneli zeminleri temsil etmektedir. Standartta borunun oturduğu yatak, boru yan bölgesi ve üst dolgu olarak üç farklı dolgu bölgesi tanımlanmıştır. Tablo 1'de doğrudan tasarım yönteminde dolgu malzemesi olarak kullanılacak zeminlerin USCS ve AASHTO zemin sınıflandırma sistemlerine göre karşılıkları belirtilmiştir. Doğrudan tasarım (SIDD) Tip 4 kurulum

Tip 4 Kurulum ile Betonarme Boru Tasarımı

uygulamasında, boru tabanında kaya olmadığı durumda yatak tabakası düzenlenmeden kötü derecelenmiş temel zemini üzerine beton boru yerleştirilebilmektedir.



Şekil 2 - Standart hendek/dolgu kurulumu [11]

Tablo 1 - Standart boru gömülme durumları için kullanılan zemin türleri ve SIDD'de eşdeğer USCS ve AASHTO zemin sınıflandırma tanımları [12]

Doğrudan Tasarım Yöntemi Zemin	Zemin Sınıflandırma Sistemi		Kompaksiyon Derecesi (%)	
	USCS	Standart AASHTO	Standart Proktor	Modifiye Proktor
Kategori I Çakıllı kum	SW, SP, GW, GP	A-1, A-3	100	95
			95	90
			90	85
			85	80
			80	75
			61	59
Kategori II Kumlu silt	GM, SM, ML %20'sinden daha azı No.200'den geçen GC, SC	A-2, A-4	100	95
			95	90
			90	85
			85	80
			80	75
			49	46

Tablo 1 - Standart boru gömülme durumları için kullanılan zemin türleri ve SIDD’de eşdeğer USCS ve AASHTO zemin sınıflandırma tanımları [12] (devam)

Doğrudan Tasarım Yöntemi Zemin	Zemin Sınıflandırma Sistemi		Kompaksiyon Derecesi (%)	
	USCS	Standart AASHTO	Standart Proktor	Modifiye Proktor
Kategori III Siltli kil	CL, MH, GC, SC	A-5, A-6	100	90
			95	85
			90	80
			85	75
			80	70
			40	40
Kategori IV Yüksek Plastisiteli Kil	CH	A7	100	90
			95	85
			90	80
			45	40

ASCE 15-98 Şartnamesi, dolgu veya hendek koşullarında beton borunun yerleşimi ile ilgili dört adet kurulum yöntemi tanımlanmıştır (Tablo 2). Bu dört kurulum yöntemi; Tip 1, 2, 3 ve 4 hem dolgu hem de hendek tipi kurulumlar için standart olarak kullanılabilir. Bu kurulum tiplerinin her biri, üç sıkıştırma bölgesi için izin verilen malzeme kategorilerini ve bu bölge için uygun sıkıştırma derecesini tanımlar. Tip 1, en çok dikkat ve kontrol gerektiren en kaliteli kurulum iken Tip 4 ise en düşük kalitedeki kurulumu göstermektedir. Doğrudan tasarım (SIDD) Tip 4 kurulum uygulamasında, boru tabanında kaya olmadığı durumda yatak tabakası düzenlenmeden kötü derecelenmiş temel zemini üzerine beton boru yerleştirilebilmektedir. Bu tür uygulamalarda aktarılan dolgu ve trafik yüklerini boru kesiti taşıyacağı için, borunun yeterli dayanıma ve/veya rijitliğe ve duraylılığa sahip olması gerekmektedir. Dolayısıyla Tip 4 kurulum daha rijit bir boru gerektirmektedir. Çünkü dolgu malzemesi türü ve sıkıştırma kontrolü bakımından çok az veya hiç kontrol olmayan koşulları kapsamaktadır [13].

Nitelikli dolgu malzeme kaynaklarına uzak bölgelerde inşa edilecek boru hatlarının tasarımında, taşıma maliyetleri ekonomik olmayan imalatlara neden olmaktadır. Bu tür problemler araştırmacıları alternatif çözüm arayışlarına yöneltmiş ve doğrudan tasarım yönteminde (Standard Installation Direct Design-SIDD) gömülü boruların Tip 4 kurulum tipi ile kurulduğunda yerel zeminin ince daneli zemin ve geri dolguda da ince daneli zeminlerin kullanılmasında boru davranışı araştırılmıştır. Wong vd. (2006)’da SIDD yöntemi ile Tip 4 kurulum standartları ile gömülmüş olan dört adet beton boruya ait arazi deneyinde, boruların kısa ve uzun süreli olarak davranışı incelenmiştir [14]. Bu kapsamda boruların etrafına gerilme ölçerler yerleştirilerek gerilmelerin zamana bağlı değişimi izlenmiş ve değerlendirilmiştir.

Tablo 2 - Standart kurulum türleri ve minimum kompaksiyon oranları [12]

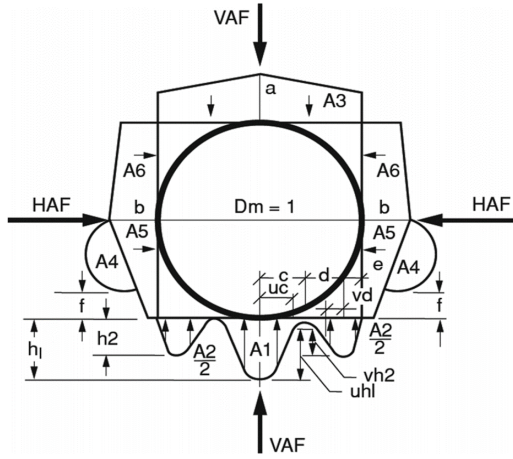
Kurulum Tipi	Yatak	Boru Alt Yan Kısımındaki Malzeme	Hendek Duvarı Alt Kısımındaki Malzeme
Tip 1	75 mm.'den küçük olmamak şartıyla Do/24 Tabanda kaya varsa 150 mm.'den küçük olmamak şartıyla Do/12	%95 Kategori I	%90 Kategori I %95 Kategori II %100 Kategori III
Tip 2	75 mm.'den küçük olmamak şartıyla Do/24 Tabanda kaya varsa 150 mm.'den küçük olmamak şartıyla Do/12	%90 Kategori I veya %95 Kategori II	%85 Kategori I %90 Kategori II %95 Kategori III
Tip 3	75 mm.'den küçük olmamak şartıyla Do/24 Tabanda kaya varsa 150 mm.'den küçük olmamak şartıyla Do/12	%85 Kategori I %90 Kategori II %95 Kategori III	%85 Kategori I %90 Kategori II %95 Kategori III
Tip 4	Yatak gerekmez (tabanda kaya yoksa) Tabanda kaya varsa 150 mm.'den küçük olmamak şartıyla Do/12	Kompaksiyon gerekmez (Kategori III kullanılması hariç) %85 Kategori III	Kompaksiyon gerekmez (Kategori III kullanılması hariç) %85 Kategori III

Bu makalede, doğrudan tasarım yöntemi kapsamında Tip 4 kurulum koşullarında gömülen beton boruların tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla önce Wong vd. (2006) kapsamında yapılan Barrie sahası arazi deneyi, Plaxis 2D (2019) programı ile modellenmiş ve araziden alınan gerilme ölçümleri ile analiz hesap sonuçları karşılaştırılarak sayısal modelin doğrulaması yapılmıştır. Ayrıca sayısal analiz hesap sonuçları SIDD yöntemi ile Tip 4 kurulum için belirlenen kesit tesirleri ile de karşılaştırılmıştır. Barrie sahası sayısal modeli ve zemin koşulları dikkate alınarak farklı boru çapı ve gömülme derinlikleri için sayısal analizler tekrarlanmıştır. Analizlerden hesaplanan kesit tesirlerinden yararlanılarak farklı boru çapları ve gömülme derinlikleri için boru imalatında gerekli olan donatı miktarlarını gösteren bir abak elde edilmiştir. Ayrıca ülkemizde İller Bankası A.Ş.'nin gömülü beton boru tasarımında yaygın olarak kullandığı gerekli donatı miktarlarının yeterli olup olmadığı incelenmiştir.

2. DOĞRUDAN TASARIM YÖNTEMİ

1970'li yıllarda ACPA (American Concrete Pipe Association – Amerikan Beton Boru Birliği) tarafından beton boru-zemin yerleşim performanslarını incelemek için uzun vadeli araştırma programları başlatılarak, beton boruların yapısal davranışı ve boru-zemin etkileşimleri incelenmiştir. Bu araştırmaların bir sonucu olarak standart yerleşim tipleri için Heger zemin basıncı dağılımı geliştirilmiştir (Şekil 3). Bu kapsamda, Tablo 1'de belirtilen zemin kategorileri ve Tablo 2'de verilen kurulum tipleri için Şekil 3'te gösterilen Heger toprak basıncı dağılımı kullanılabilir.

Kurulum tipleri için boru etrafındaki gerilme dağılımlarının hesaplanmasında kullanılacak katsayılar Tablo 3'te sunulmuştur. A1-A6 katsayıları toprak basıncının boyutsuz düşey ve yatay bileşenleri, a - v ise boyutsuz düşey ve yatay gerilmeleri tanımlamak için kullanılan katsayılardır. Diğer katsayılar (d, h1 ve h2) ise (1), (2) ve (3) eşitliklerinden hesaplanabilir.



Şekil 3 - Doğrudan tasarım için Heger zemin basıncı dağılımı [12]

Tablo 3 - Kurulum tiplerine göre Heger toprak basıncı dağılımı katsayıları [12]

Katsayılar	Kurulum Tipleri			
	Tip 1	Tip 2	Tip 3	Tip 4
VAF	1.35	1.40	1.40	1.45
HAF	0.45	0.40	0.37	0.30
A1	0.62	0.85	1.05	1.45
A2	0.73	0.55	0.35	0.00
A3	1.35	1.40	1.40	1.45
A4	0.19	0.15	0.10	0.00
A5	0.08	0.08	0.10	0.11

Tablo 3 - Kurulum tiplerine göre Heger toprak basıncı dağılımı katsayıları [12] (devam)

Katsayılar	Kurulum Tipleri			
	Tip 1	Tip 2	Tip 3	Tip 4
A6	0.18	0.17	0.17	0.19
a	1.40	1.45	1.45	1.45
b	0.40	0.40	0.36	0.30
c	0.18	0.19	0.20	0.25
e	0.08	0.10	0.12	0.00
f	0.05	0.05	0.05	-
u	0.80	0.82	0.85	0.90
v	0.80	0.70	0.60	-

$$d = 0.5 - c - e \quad (1)$$

$$h_1 = \frac{(1.5A1)}{[c(1+u)]} \quad (2)$$

$$h_2 = \frac{(1.5A2)}{[d(1+u)+2e]} \quad (3)$$

Doğrudan tasarım yönteminde gerekli boru donatı alanı, boruya etkileyen gerilmelere bağlı olarak hesaplanan moment (M), aksel kuvvet (N) ve kesme kuvveti (V) dikkate alınarak belirlenir. Bu kesit tesirleri Tablo 4'te Tip 4 kurulum için verilen katsayılardan yararlanılarak veya boru-zemin etkileşimini dikkate alan sayısal analizlerden hesaplanabilir. M, N ve V değerlerini hesaplamak için sırasıyla (4), (5) ve (6) eşitlikleri verilmiştir [6]. Diğer kurulum tipleri için de ASCE 15-98'den yararlanılarak belirlenecek boru analiz katsayıları kullanılarak kesit tesirleri hesaplanabilir. Tablo 4'te Tip 4 kurulum için farklı dış yük uygulamalarındaki katsayılar sunulmuştur [12].

$$M = \frac{C_{mi} \times W_i \times D_m}{2} \quad (4)$$

$$N = C_{ni} \times W_i \quad (5)$$

$$V = C_{vi} \times W_i \quad (6)$$

Burada; C_{mi} = Moment hesabı için boru analiz katsayısı, C_{ni} = Aksel kuvvet hesabı için boru analiz katsayısı, C_{vi} = Kesme kuvveti hesabı için boru analiz katsayısı, W_i = Boru üzerine etkileyen yüklerin toplamı, D_m = Boru ortalama çapını temsil etmektedir.

Tablo 4 - Tip 4 kurulum için boru analiz katsayıları (ASCE 15-98) [12]

Lokasyon	Yük Tipi	Cmi	Cni	Cvi
Boru alt	Wp	0.235	0.077	
	We	0.131	0.128	
	Wf	0.160	-0.403	-
	WL1	0.185	0.152	
	WL2	0.237	-0.004	
Boru üst	Wp	0.079	-0.077	
	We	0.118	0.079	
	Wf	0.076	-0.232	
	WL1	0.110	0.114	-
	WL2	0.255	0.004	
Boru yan duvar	Wp	-0.101	-0.287	
	We	-0.127	0.504	
	Wf	-0.095	-0.057	
	WL1	-0.121	0.495	-
	WL2	-0.168	0.492	
Kritik kesme	Wp		0.188	0.431
	We		0.211	0.309
	Wf	-	-0.323	0.284
	WL1		0.229	0.305

Doğrudan tasarım yönteminde donatı gereksinimi, ilgili zemin parametreleri ve standart kurulum tiplerine bağlı olarak verilen analiz katsayıları ile zemin yüklerinin belirlenmesi ve tesir kuvvetlerinin hesaplanmasıyla elde edilir. Tablo 4'teki W_e boru üzerindeki zemin yükünü, W_p borunun kendi ağırlığından dolayı oluşacak yükü, W_f varsa akışkan yükünü ve varsa hareketli yükler WL1 ve WL2'yi ifade etmektedir.

Heger basınç dağılımları kapsamında Tablo 3'te verilen düşey kemerlenme faktörü (VAF) ve yatay kemerlenme faktörü (HAF) doğrudan tasarım yönteminde toprak basınçlarının hesaplanmasında kullanılır. Tasarımda dikkate alınacak gerçek düşey ve yatay yükler bu kemerlenme faktörleri ile çarpılarak belirlenir. Prizma yükü (PL) borunun üzerindeki zemin örtüsünün ağırlığıdır ve uluslararası birim sistemine göre Eşitlik (7) ile hesaplanır. Boru üzerine etkileyen toplam zemin yükü (W), prizma yükünün (PL), VAF ile çarpımı sonucu Eşitlik (8) ile belirlenir.

$$PL = \left(\frac{w \cdot D_o}{1000}\right) \cdot \left(H + \left(\frac{0.107 \cdot D_o}{1000}\right)\right) \quad (7)$$

$$W = PL \times VAF \quad (8)$$

Tip 4 Kurulum ile Betonarme Boru Tasarımı

Burada; PL= Prizma yükü (kN/m), w= zemin birim hacim ağırlığı (kN/m³), D_o= borunun dış çapı (mm), H=borunun üst kısmındaki dolgu yüksekliği (m)'ni göstermektedir.

Boru üzerine etkiyen trafik yükü boru çapına ve dolgu yüksekliğine (H) bağlı olarak Tablo 5 yardımıyla hesaplanabilir. Doğrudan tasarım yönteminde 2.734m dolgu kalınlığından daha derine gömülen borulara trafik yükünün etkisi olmadığı belirtilmiştir [15].

Tablo 5 - Boru üzerindeki dolgu yüksekliğine bağlı trafik yükü [15]

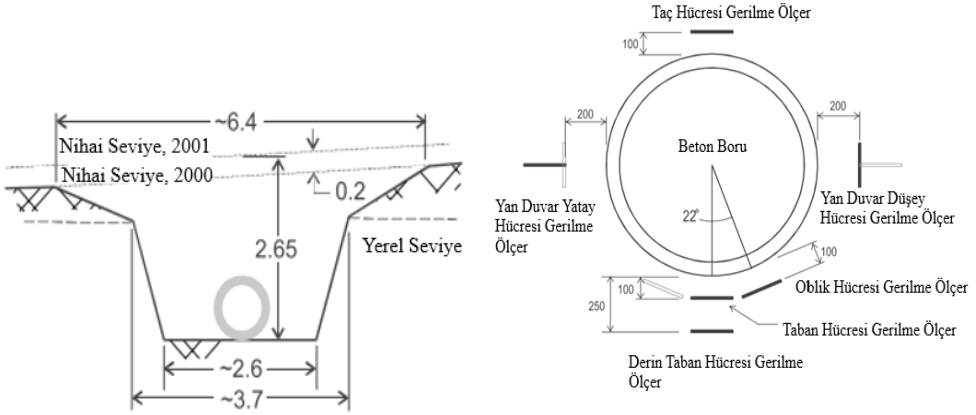
Boru Çapı (m)	Boru üzerindeki dolgu yüksekliği H (m)								
	0.305	0.610	0.914	1.219	1.524	1.829	2.134	2.438	2.743
0.38	34.44	18.68	9.63	6.57	5.11	4.09	3.36	2.77	2.34
0.46	38.09	21.31	10.95	7.59	5.84	4.67	3.79	3.21	2.77
0.53	41.15	23.64	12.26	8.46	6.57	5.25	4.38	3.65	3.06
0.61	43.93	25.98	13.57	9.34	7.30	5.84	4.82	4.09	3.50
0.69	42.91	28.17	14.74	10.22	8.17	6.42	5.25	4.38	3.79
0.76	41.30	30.21	15.76	10.95	8.61	7.01	5.69	4.82	4.09
0.84	42.76	32.11	16.93	11.82	9.19	7.44	6.13	5.25	4.38
0.91	41.01	34.00	17.95	12.55	9.78	8.03	6.57	5.55	4.82
0.99	38.97	35.61	18.83	13.28	10.36	8.46	7.01	5.98	5.11
1.07	37.21	37.36	19.85	13.86	10.95	8.90	7.44	6.28	5.40
1.22	34.00	36.19	21.45	15.18	11.97	9.78	8.17	6.86	5.98
1.37	31.38	34.44	23.06	16.35	12.99	10.65	8.90	7.59	6.42
1.52	29.04	32.84	24.52	17.37	13.86	11.38	9.49	8.17	7.01
1.68	27.00	31.52	23.93	18.39	14.74	12.11	10.22	8.61	7.44
1.83	25.25	31.96	22.91	19.41	15.47	12.84	10.80	9.19	7.88
1.98	23.79	32.69	22.18	20.29	16.20	13.43	11.38	9.63	8.32
2.13	22.47	33.42	21.31	19.85	16.93	14.01	11.82	10.07	8.76

Bilgi ve Notlar: Ham zemin üzerine uygulandığı varsayılmıştır. AASHTO HS20 kamyon yüküne göre hesaplanmıştır. 3.05 metre ve üzerindeki dolgu yüksekliklerinde araç yükü ihmal edilmiştir. Yük birimi kN/m'dir.

3. BARRIE SAHASI ARAZİ DENEYİ

Bu çalışma kapsamında, Wong vd. (2006)'da Ontario'da yer alan Barrie sahasında yapılan bir arazi deneyinden alınan gerilme ölçümleri dikkate alınarak sayısal modelin doğrulaması yapılmıştır. Şekil 4'te gösterilen hendek kesitinde ortalama hendek derinliği 2.5m'dir. Arazi deney alanında, temel zemini kötü derecelenmiş siltli kum ve geri dolgu zemini

düşük miktarda ince dane içeren iyi derecelenmiş çakıllı kum olarak belirtilmiştir. Yerel zeminin doğal su muhtevası kazı derinliği boyunca %2 ve %5 arasında değişim göstermektedir [16]. Yerel zemin için maksimum standart proktor yoğunluğu 1725 kg/m^3 , optimum su muhtevası ise %10'dur [17]. Boru iç çapı 600mm, dış çapı 800mm olup boru uzunluğu 2.44m'dir. Arazi deneyi verileri Tablo 6'da sunulmuştur.



Şekil 4 - Barrie deney sahası (a) kazı kesiti (ölçüler m) (b) gerilme ölçerlerin yerleşimi [14]

Tablo 6 - Barrie sahası arazi deney verileri [14]

Geri dolgu	İnce dane barındıran iyi derecelenmiş çakıllı kum
Yatak	Kötü derecelenmiş siltli kum
Toplam kazı derinliği (m)	2.5
Boru iç çapı (Di) (mm)	600
Boru dış çapı (Do) (mm)	800
Zemin birim hacim ağırlığı (kN/m^3)	16.91
YASS (m)	-
Boru uzunluğu (m)	2.44

Arazi deneyinde boru, Şekil 4'te gösterilen kazı kesitinde Tip 4 kurulum koşullarında gömülmüştür. Bu kapsamda, 2.65m derinlikte ve 6.4m genişlikte şevli bir kazı yapılmıştır (Şekil 4a). Hendek tabanında kaya zemin olmadığı için özel bir yatak tabakası yapılmamış, boru arazide kötü derecelenmiş siltli kum zemin üzerine oturtulmuştur (Tip 4 kurulumunda yatak gerekmemektedir). Ardından gerilme ölçerler borunun çevresine gömülme sırasında Şekil 4b'de gösterildiği gibi konumlandırılmıştır. Geri dolgu sırasında gerilme ölçerlerin zarar görmesini engellemek için kum yastıklar kullanılmıştır. Gerilme ölçerler, borunun yatay simetri ekseninde sağ ve sol tarafına biri düşey biri yatay gerilmeyi ölçmek üzere 0.2m mesafede, oblik hücre 0.1m mesafede, boru taç ve taban bölgesinde 0.1m mesafede

Tip 4 Kurulum ile Betonarme Boru Tasarımı

konumlandırılmıştır. Boru tabanına önce gerilme ölçer yerleştirilmiş, daha sonra üzerine beton boru konulmuştur. Hendek içine yerleştirilen borunun etrafı düşük miktarda ince dane içeren iyi derecelenmiş çakıllı kum dolgu ile adım adım kapatılırken gerilme ölçerlerden okumalar alınmıştır. Boru tamamen geri dolgu ile kapatıldıktan sonra da adım adım dolgu yerleşimine devam edilerek istenilen seviyeye kadar dolgu gerçekleştirilmiştir.

3.1. SIDD Tip 4 Yerleşime Göre Boru Kesit Tesirleri Hesabı

Bölüm 2’de detayları belirtilen SIDD yöntemine göre boru üzerine etkiyen yükler ve kesit tesirleri hesaplanmıştır. Doğrudan tasarım yöntemine göre öncelikle boru üzerindeki Prizma Yükü (PL) eşitlik (7) ve Tip 4 kurulum için VAF=1.45 dikkate alınarak eşitlik (8)’den dolgu zemin yükü (W) 37.97 kN/m olarak hesaplanmıştır. Doğrudan tasarım yöntemine göre boru taç, yan duvar ve taban kısmında, zemin ve trafik yükünden dolayı oluşacak moment ve normal kuvvet değerleri hesaplanarak Tablo 7’de sunulmuştur.

Tablo 7 - SIDD yöntemine göre boru üzerine etkiyen kesit tesirleri

	Boru taçı		Boru yan duvarı		Boru tabanı	
	Moment (kNm/m)	Eksenel kuvvet (kN/m)	Moment (kNm/m)	Eksenel kuvvet (kN/m)	Moment (kNm/m)	Eksenel kuvvet (kN/m)
Zemin yükünden (We)	1.79	2.99	-1.92	19.13	1.98	4.86
Taşıt yükünden (WL)	0.31	0.81	-0.34	3.52	0.53	1.08
Toplam	2.10	3.80	-2.26	22.65	2.52	5.94

3.2. Sayısal Modelin Doğrulaması

Şekil 4’te gösterilen arazi deneyi hendek kesitinin, boru özellikleri ve yükleme koşulları dikkate alınarak sayısal analizi Plaxis 2D (2019) programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerde zemin davranışı Hardening – Soil (HS) bünye bağıntısı dikkate alınarak, betonarme boru ise eğilme rijitliği (EI) ve eksenel rijitlik (EA) parametreleri ile elastik olarak modellenmiştir. Sayısal analizler iki boyutlu olarak düzlem şekil değiştirme koşulları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Sahada yeraltı suyu bulunmamaktadır. Trafik yükü olarak ACPA Design Data 5, 2011’teki HS20 trafik yükü, boru dış çapı 0.8m ve dolgu yüksekliği yaklaşık 2m dikkate alınarak tasarım çizgisel yükü 7.11 kN/m olarak Tablo 5’ten belirlenmiştir [15]. Analizlerde boru tabanında yer alan temel zemini, yerel zemin ve geri dolgu zeminlere ait malzeme parametreleri Tablo 8’de sunulmuştur. Şekil 5’te Barrie sahası arazi kesiti için sayısal analizlerde kullanılan sonlu elemanlar modeli gösterilmiştir. Analizlerde 4, 5, 8, 9, 10 ve 11. yükleme adımlarında sıkıştırma etkisini dikkate almak için

15 kN/m’lik bir yük ve 13. yükleme adımında ise 7 kN/m’lik bir yük uygulanmıştır. Sayısal analizlerde yükleme adımlarında etkililen yükler Tablo 9’da gösterilmiştir. Sayısal analizden elde edilen hesap sonuçları ile arazi deneyinde alınan ölçümler farklı sonlu elemanlar ağı sıklıkları da göz önünde bulundurularak karşılaştırılarak sayısal modelin doğrulaması yapılmıştır. Analizlerde boru ve zemin arasında ara-yüzey eleman kullanılarak ara-yüzey eleman katsayısı $R_{int}=0.80$ olarak dikkate alınmıştır.

Tablo 8 - Hardening - Soil zemin parametreleri

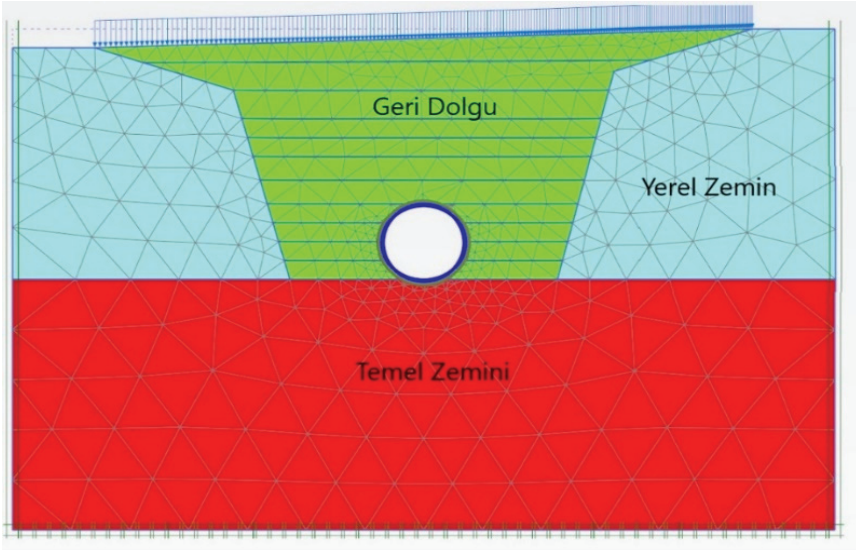
Parametre	Sembol	Birim	Yerel zemin	Temel zemini	Geri Dolgu
Birim hacim ağırlık	γ	kN/m ³	17	18	17
Referans Elastisite Modülü	E_{50}^{ref}	MPa	40	10	30
Referans Ödometre Modülü	E_{oed}^{ref}	MPa	40	10	30
Referans Yükleme-boşaltma Elastisite Modülü	E_{ur}^{ref}	MPa	120	30	90
Üstel malzeme sabiti	m	-	0.5	0.5	0.5
Kohezyon	c^{ref}	kN/m ²	16	10	2
İçsel sürtünme açısı	ϕ	(°)	37	30	30
Poisson oranı	ν_{ur}	-	0.2	0.2	0.2
Referans gerilme	p^{ref}	kN/m ²	100	100	100
Göçme oranı	R_f	-	0.90	0.90	0.9

Tablo 9 - Sayısal analizlerde yükleme adımlarında etkililen yükler

Yükleme Adımları	Sıkıştırma Yüğü (kN/m)	Tasarım Çizgisel Yüğü (kN/m)
Adım 4	15	-
Adım 5	15	-
Adım 8	15	-
Adım 9	15	-
Adım 10	15	-
Adım 11	15	-
Adım 13	-	7

Tip 4 Kurulum ile Betonarme Boru Tasarımı

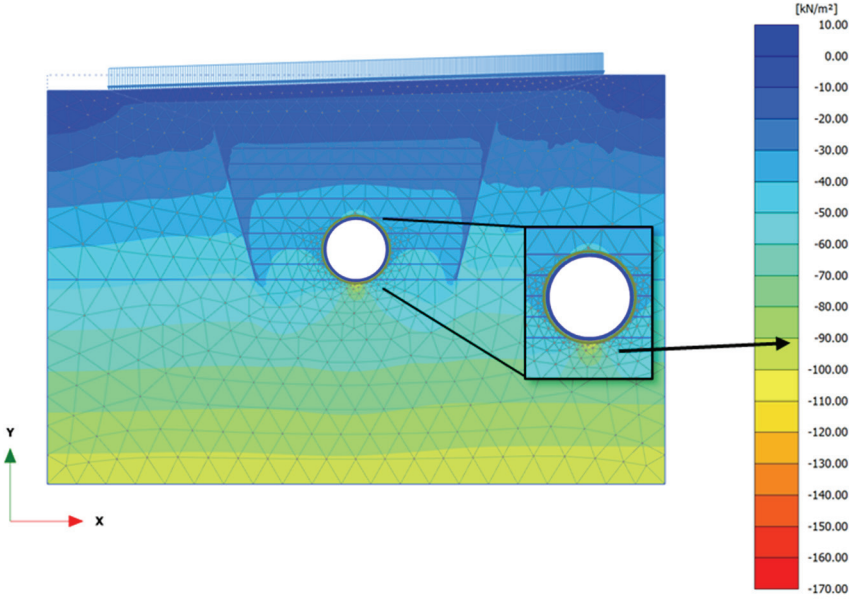
Sayısal analiz sonuçlarına ağ sıklığının etkisini belirlemek için orta ve ince sıklıkta oluşturulan sonlu eleman ağları için analizler tekrarlanmış ve hesap sonuçları Tablo 10'da sunulurken arazi ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi hesap sonuçları arazide ölçülen gerilmelere oldukça yakındır. Şekil 6'da sayısal analiz sonucunda elde edilen düşey gerilme dağılımı gösterilmiştir. Boru çevresinde en yüksek gerilmenin taban bölgesinde olduğu görülmektedir. Bu sonuç, Şekil 3'te gösterilen Heger zemin basıncı dağılımı ile de uyumludur. Borunun taban bölgesinde gerilme konsantrasyonu meydana gelmiştir. Sayısal analizden ve SIDD yöntemine göre Tablo 3 ve Tablo 4 kullanılarak Eşitlik (4) ve (5)'ten kesit tesirleri hesaplanmış ve Tablo 11'de sunulmuştur. Görüldüğü gibi doğrudan tasarım (SIDD) ve sayısal analizlerden elde edilen kesit tesirleri arasında eğilme momentlerinde ve aksel kuvvetlerde boru taç bölgesinde yaklaşık 2 kat, taban bölgesinde ise yaklaşık 1.5 kat fark bulunmuştur.



Şekil 5 - Barrie sahası arazi deneyi kesiti sayısal modeli (orta sıkı ağ)

Tablo 10 - Ölçülen ve hesaplanan gerilmelerin karşılaştırılması

Gerilmeler (kPa)	Barrie arazi deneyinde ölçülen gerilme [8]	Plaxis 2B Sayısal Analiz	
Ağ Sıklığı	-	Orta	İnce
Taç	38	40	40.2
Taban	110	93	94
Oblik	39	36	38.8
Yan duvar (yatay)	22	17	19.3
Yan duvar (düşey)	54	39	39.7



Şekil 6 - Sayısal modelde elde edilen düşey gerilme dağılımı

Tablo 11 - SIDD yöntemi ve sayısal analizden hesaplanan kesit tesirlerinin karşılaştırılması

Kesit Tesirleri	Doğrudan Yöntem (SIDD) Tip 4 kurulum			Plaxis 2B Sayısal Analiz		
	Taç	Taban	Yan duvar	Taç	Taban	Yan duvar
Eğilme momenti (kNm/m)	2.10	2.52	-2.26	1.2	1.60	-1.52
Eksenel kuvvet (kN/m)	3.80	5.94	22.65	8.08	9.69	-21.1

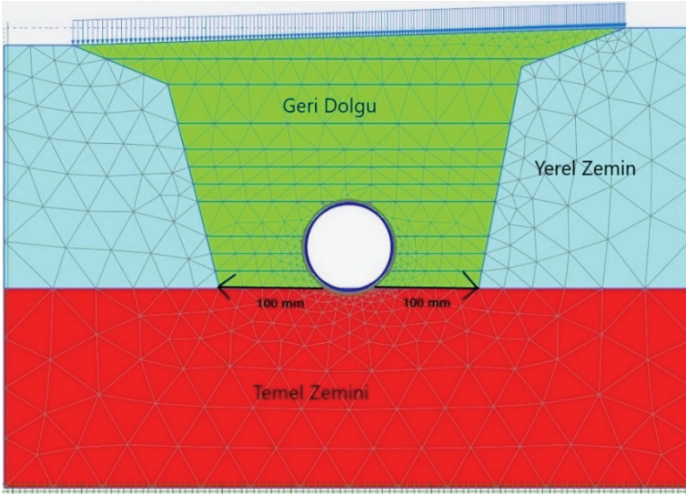
4. PARAMETRİK SAYISAL ANALİZLER ve KESİT TESİRLERİ

Bu makale kapsamında, özellikle nitelikli dolgu malzemesine ulaşılamadığı durumlar için Tip 4 kurulum koşullarında beton boru davranışı zemin-yapı etkileşimi dikkate alınarak Plaxis 2D (2019) sonlu elemanlar programı ile analiz edilmiştir. Sayısal analizler orta (medium) ve ince (fine) sonlu elemanlar ağı ile ayrı ayrı yapılarak ağ sıklığının analiz sonuçlarına etkisi de araştırılmıştır.

Şekil 5'te gösterilen sonlu eleman modelinde boru çapı ve dolgu yüksekliği değişiminin boru tasarımına etkileri sayısal analizler ile incelenmiştir. Bu kapsamda boru çapı 600 mm ile 2000 mm arasında ve dolgu yüksekliği ise 2m, 4m, 6m ve 8m dikkate alınarak sayısal analizler tekrarlanmıştır. Şekil 7'de gösterilen sayısal model ile yapılan parametrik

Tip 4 Kurulum ile Betonarme Boru Tasarımı

analizlerde, boru dış çapı 200 mm olarak artırılırken model geometrisinde hendek taban genişliği modelde daralma yaratmamak ve bu genişliğin etkisinin analiz sonuçlarını etkilememesi için x ekseninde 100'er mm kaydırılarak sabit tutulmuştur. Analizlerde boru çapı ve dolgu yüksekliği değişimlerine karşılık olarak elde edilen en yüksek momentler Tablo 12'de, en yüksek aksel kuvvetler ise Tablo 13'te sunulmuştur. Şekil 8'de görüldüğü üzere, parametrik analizlerde sonlu elemanlar ağı sıklığının ortadan inceye doğru iyileştirilmesi sonucunda elde edilen iç kuvvetlerin (eğilme momenti ve aksel kuvvet) de karşılaştırılması yapılarak sunulmuştur. Büyük çaplı boruda kesit tesirlerini daha az etkilerken, küçük çaplı boruda kesit tesirlerine daha fazla etkisi olduğu ve moment değerlerini yaklaşık olarak %40, aksel kuvvet değerlerini ise %15 oranında arttırdığı görülmüştür.



Şekil 7 - Sayısal analizlerde model geometrisi değişimi

Tablo 12 - Parametrik sayısal analizlerdeki en yüksek moment değerleri

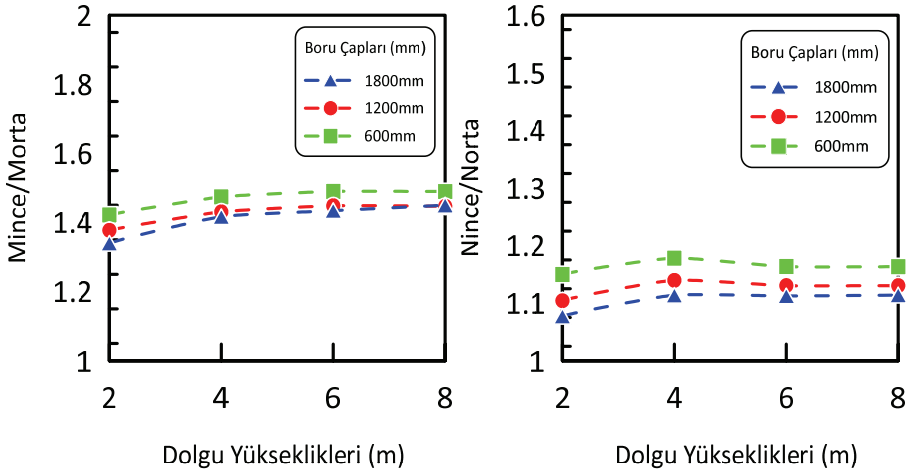
Boru Çapı (mm)	Sayısal analizlerden belirlenen en yüksek moment (kNm/m)							
	Dolgu Yüksekliği H(m)							
	2m		4m		6m		8m	
Ağ Sıklığı	Orta	İnce	Orta	İnce	Orta	İnce	Orta	İnce
Ø600	0.8	1.2	1.2	1.8	1.6	2.5	1.9	2.8
Ø800	1.6	2.3	2.4	3.5	3.3	4.8	3.8	5.5
Ø1000	2.7	3.8	4.1	5.8	5.4	7.9	6.1	9.2
Ø1200	4.2	5.8	6.1	8.7	8.1	11.8	9.5	13.7
Ø1400	7.5	9.8	8.4	12.1	11.4	16.4	13.2	19.2
Ø1600	8.2	11.1	11.3	16.1	15.2	21.8	17.7	25.7
Ø1800	10.7	14.4	14.5	20.7	19.4	27.9	22.6	32.9
Ø2000	13.5	18	18.2	25.9	24.2	34.7	29.8	41

Tablo 13 - Parametrik sayısal analizlerdeki en yüksek eksenel kuvvet değerleri

Boru Çapı (mm)	Sayısal analizlerden belirlenen en yüksek eksenel kuvvet (kN/m)							
	Dolgu yüksekliği H(m)							
	2m		4m		6m		8m	
Ağ Sıklığı	Orta	İnce	Orta	İnce	Orta	İnce	Orta	İnce
Ø600	16.8	16.9	27.3	32.2	38.3	44.6	44.5	51.8
Ø800	22.8	26.1	37.5	43.7	52.4	60.4	61.2	70.4
Ø1000	29.4	32.9	47.9	55.2	66.9	76.4	73.9	89.1
Ø1200	36.1	39.8	58.7	66.9	81.6	92.3	95.3	107.8
Ø1400	43.5	47.05	69.6	78.7	95.9	108.1	112.5	126.6
Ø1600	49.8	53.9	80.7	90.6	110.9	124.2	129.9	145.4
Ø1800	56.6	61	91.9	102.4	126	140.2	147.3	164.1
Ø2000	63.5	67.9	103.1	114.3	141	156.2	166.8	182.8

Tablo 12 ve Tablo 13'te sayısal analizlerden hesaplanan kesit tesirleri kullanılarak boru tasarımı için gerekli donatı alanı ASCE 15-98'de belirtildiği gibi Eşitlik 9'dan hesaplanmıştır.

$$A_s \geq \frac{g\phi d - Nu \sqrt{g[g(\phi d)^2 - Nu(2\phi d - h) - 2Mu]}}{f_y} \quad (9)$$



Şekil 8 - Sonlu elemanlar ağı sıklığının değişiminin kesit tesirlerine olan etkisi

Burada; A_s birim uzunluk için gerekli donatı alanı; f_y donatı akma dayanımı; d paspayı; h boru et kalınlığı; M_u Tasarım momenti, N_u eksenel kuvvet; (basınç durumunda pozitif alımlar); ϕ direnç faktörü; g $0.85 \times b \times f_c$, b hesap genişliği; f_c beton tasarım mukavemetini

Tip 4 Kurulum ile Betonarme Boru Tasarımı

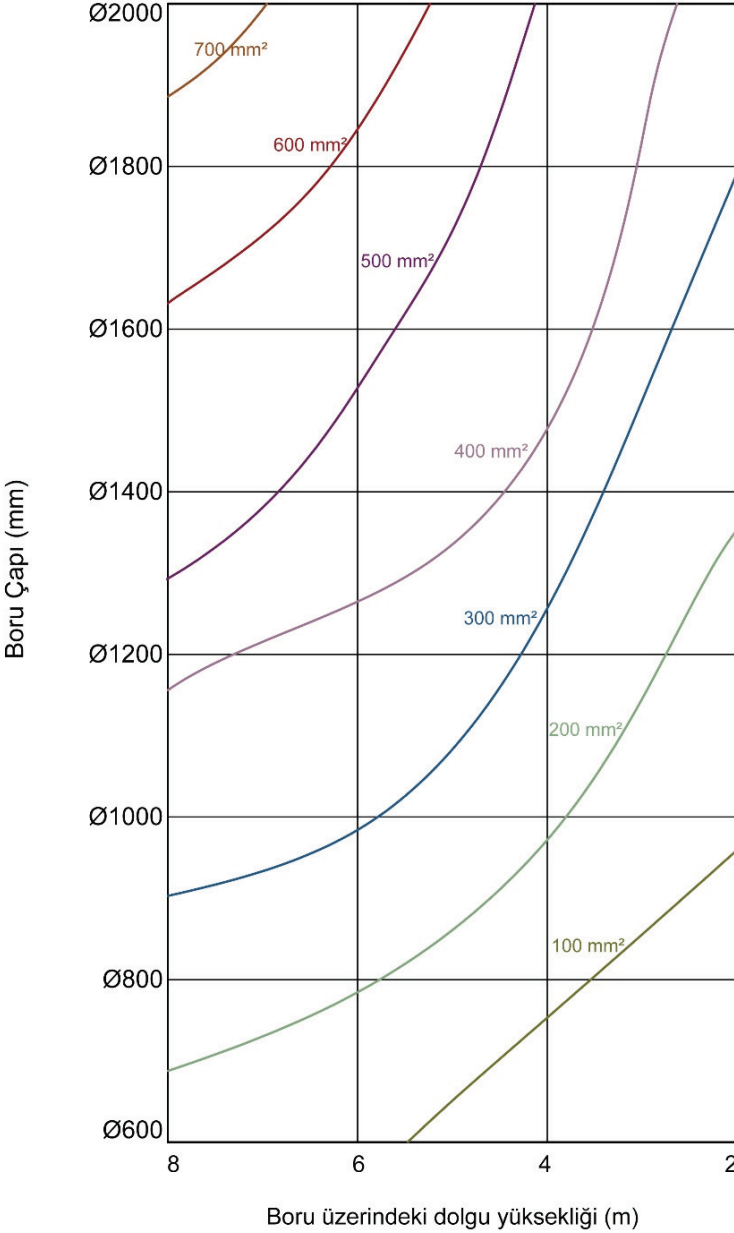
temsil etmektedir. Hesaplamalarda donatı akma dayanımı f_y 485 MPa, beton tasarım mukavemeti f_c ise 45 MPa alınmıştır. Donatı alanı hesabı için boru çaplarına göre Eşitlik 9'da kullanılan parametreler Tablo 14'te verilmiştir. Eşitlik 9'dan hesaplanan donatı alanlarının boru çapı ve dolgu yüksekliğine göre değişimi Tablo 15'te sunulmuştur. İnce sonlu elemanlar ağı dikkate alınarak hesaplanan bu sarmal donatı alanlarının boru çapı ile dolgu yüksekliğine bağlı değişimi Şekil 9'da bir abak halinde gösterilmiştir. Beklendiği gibi boru çapı ve dolgu yüksekliği arttıkça gerekli donatı alanı da artış göstermektedir. Böylece, Şekil 9'da gösterilen abaktan faydalanılarak, Tip 4 kurulum koşulları için beton boruların imalatında dikkate alınması gereken donatı alanları pratik olarak belirlenebilmektedir.

Tablo 14 - Donatı hesabında boru çaplarına göre kullanılan parametreler

Boru Çapı (mm)	h (Boru duvar kalınlığı) (mm)	d (Paspayı) (mm)
Ø600	100	70
Ø800	120	90
Ø1000	120	90
Ø1200	140	110
Ø1400	140	110
Ø1600	170	140
Ø1800	200	170
Ø2000	200	170

Tablo 15 - Tip 4 Kurulum için hesaplanan sarmal donatı alanı

Boru Çapı (mm)	Sayısal analizlerden belirlenen kesit tesirlerine göre sarmal donatı alanı (mm²)							
	Dolgu yüksekliği H(m)							
	2m		4m		6m		8m	
Ağ Sıklığı	Orta	İnce	Orta	İnce	Orta	İnce	Orta	İnce
Ø600	53.4	65.1	80.7	106.5	111.1	146.2	128.1	168.5
Ø800	72.4	93.5	112.9	148.7	155.4	204.7	180.2	236.3
Ø1000	109.5	141.4	167.7	221.3	228.6	303.7	253.4	352.6
Ø1200	133.8	170.9	201.1	264.7	273.8	361.8	320.1	422.6
Ø1400	173.9	260.2	223.4	350.2	303.7	476.8	354.8	560.1
Ø1600	193.8	295.9	282.4	447.7	382.7	505.1	447.4	593.2
Ø1800	209.5	304.8	304.1	458.3	410.3	538.1	478.9	632.9
Ø2000	253.7	317.5	365.5	478.5	491.7	647.2	596.8	762.9



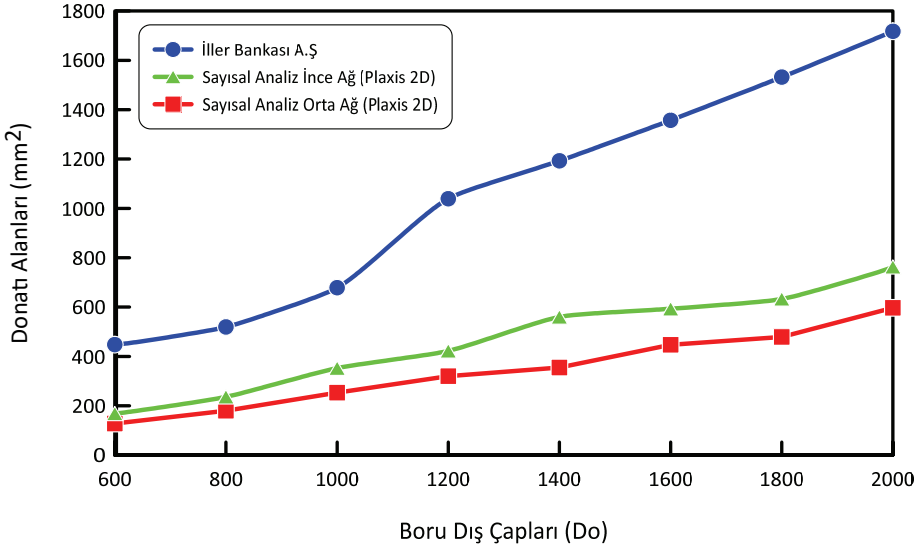
Şekil 9 - Boru çapı ve gömülme derinliğine bağlı olarak gerekli minimum sarmal donatı alanı abağı (ince sonlu elemanlar ağı ile hesaplanan değerlerden)

4.1. Sayısal Analizlerden Belirlenen Donatı Alanlarının İller Bankası Donatı Alanları ile Karşılaştırılması

Ülkemizde yaygın olarak gömülü beton boruların tasarımında İller Bankası A.Ş kriterleri dikkate alınmaktadır. Tablo 16'da İller Bankası A.Ş'nin güncel olarak kullandığı boru çaplarına karşılık gerekli donatı alanları gösterilmiştir. Bu donatı alanları 1m ile 8m arasında değişen dolgular altında kalan boruların en elverişsiz gömülme durumuna göre tüm geri dolgu malzemeleri için verilmiştir.

Tablo 16 - İller Bankası tarafından kullanılan sarmal donatı alanları [18]

Boru Çapı (mm)	Donatı Alanı (mm ²)
Ø600	447.958
Ø800	519.526
Ø1000	678.564
Ø1200	1039.05
Ø1400	1192.79
Ø1600	1357.13
Ø1800	1532.07
Ø2000	1717.62



Şekil 10 - İller Bankası A.Ş tarafından uygulanan ve sayısal analizlerden hesaplanan donatı alanlarının karşılaştırılması

Şekil 10'da İller Bankası A.Ş ve yapılan sayısal analizlerden en elverişsiz tesir kuvvetleri dikkate alınarak hesaplanan donatı alanlarının karşılaştırılması gösterilmiştir. Görüldüğü gibi İller Bankası tarafından kullanılan sarmal donatı alanları sayısal analiz sonuçlarına göre yaklaşık olarak 2.5-3 kat daha güvenli tarafta kalmaktadır. İller Bankası tarafından kullanılan donatı alanları Tablo 2'de belirtilen tüm gömülme koşulları için uygulanmaktadır. Tip 4 gömülme koşulları, beton borular için en olumsuz koşulları içermektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan sayısal analizler ve karşılaştırmalar dikkate alındığında, ülkemizde oldukça güvenli yönde kalınarak betonarme boru tasarımı yapıldığı görülmektedir. Boru hatları kilometrelerce devam eden uzun alt yapı sistemleri olarak değişik zemin koşullarından geçmekte ve her zaman şartnamelerde belirtilen nitelikli dolgu malzemelerine ulaşmak mümkün olamamaktadır. Bu bakımdan, gömülü boru tasarımları yapılırken geçtiği güzergâhın zemin koşulları, boru özellikleri ve yükleme durumu dikkate alınarak zemin-boru etkileşimi ile davranışı incelenerek, şartnameler ile karşılaştırılmaları yapılmalıdır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Doğrudan tasarım yöntemi (SIDD) Tip 4 boru kurulumunda, tabanda kayaç malzeme olmadığı koşullarda boru tabanında özel bir yatak tabakasına ihtiyaç yoktur. Bu çalışmada referans alınan Barrie sahasında yapılan arazi deneyinde, geri dolgu malzemesi olarak az miktarda ince dane içeren iyi derecelenmiş çakıllı kum kullanılmış ve temel zemininde kötü derecelenmiş siltli kum yer almaktadır. Beton boru tabandaki kötü derecelenmiş siltli kum üzerine oturtularak SIDD Tip 4 koşullarında kurulum gerçekleştirilmiştir. Bu makale kapsamında Barrie arazi deneyinin sayısal modeli Plaxis 2D (2019) kullanılarak oluşturulmuş ve arazide alınan gerilme ölçümleri ile hesap sonuçları karşılaştırılarak model doğrulandıktan sonra parametrik çalışma yapılmıştır. Parametrik çalışma kapsamında gömülme derinliğine karşılık artan dolgu yükü ile boru çapı değişimi dikkate alınarak tesir kuvvetlerindeki ve donatı alanındaki değişimler belirlenmiştir. Ülkemizde gömülü boru tasarımında güncel olarak kullanılan İller Bankası A.Ş kriterlerine göre belirtilen donatı alanları için karşılaştırması yapılmıştır. Yapılan bu çalışmaların sonuçlarına göre;

1. SIDD yönteminde Tip 4 kurulumu göre boru bölgelerindeki toplam iç kuvvetlerin hesaplanmasında Tablo 7'de görüldüğü gibi zemin yükü (W_e) etkisi, taşıt yüklerinden dolayı oluşan hareketli yüklere (W_L) göre daha baskındır.
2. Zemin-boru etkileşimi dikkate alınarak sonlu eleman analiz yöntemi ile yapılan parametrik sayısal analizlerden elde edilen kesit tesirleri (Tablo 12 ve Tablo 13) sunulmuştur. Boru çapı ve dolgu yüksekliği artırıldığında boru kesitindeki eğilme momentleri ve eksenel kuvvetlerde beklenildiği gibi artış meydana gelmiştir. Sonlu elemanlar ağı sıklığının ortadan inceye doğru artırılması boruda meydana gelen kesit tesirlerini etkilemiş ve ağı sıklığının artmasına bağlı olarak moment değerlerinde Şekil 8'de görüldüğü gibi yaklaşık %40, eksenel kuvvet değerlerinde ise yaklaşık %15 oranında artış meydana gelmiştir.
3. Zemin-boru etkileşiminin dikkate alındığı sayısal analizler ve doğrudan tasarım yöntemine göre belirlenen eğilme momentleri karşılaştırıldığında, SIDD ile hesaplanan eğilme momentlerinin sayısal analizlere göre belirlenen eğilme momenti değerlerinden

Tip 4 Kurulum ile Betonarme Boru Tasarımı

daha büyük olduğu görülmüştür. Böylece SIDD yöntemine göre yapılan tasarımın zemin-yapı etkileşimi dikkate alınan tasarımlara göre daha güvenli tarafta kaldığı söylenebilir.

4. Çalışma kapsamında SIDD yönteminde Tip 4 gömülme koşullarına göre zemin-yapı etkileşimi dikkate alınarak yapılan parametrik sayısal analizlerden Şekil 9'daki abak elde edilmiştir. Bu abak beton borunun üzerindeki dolgu yüksekliği ile boru çapına bağlı olarak gerekli donatı alanını vermektedir. Tasarımcıların pratik kullanımı için oluşturulmuştur.

5. Yapılan sayısal analizlerden elde edilen düşey gerilme dağılımları incelendiğinde, borunun taban bölgesinde gerilme konsantrasyonu meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu durumun, SIDD yönteminde kullanılan Heger zemin basıncı dağılımları ile paralellik taşıdığı görülmüştür.

6. Parametrik sayısal analizlerde orta ve ince ağ kullanılarak hesaplanan donatı alanları ile İller Bankası A.Ş'nin gömülü betonarme boru tasarımı için kullandığı donatı alanları karşılaştırılmıştır. Şekil 10'dan da görüldüğü gibi boru çaplarına karşılık gelen gerekli donatı alanlarında orta ağ kullanıldığında 3, ince ağ kullanıldığında 2-2.5 kat fark vardır. Eşitlik 9 'da görüldüğü gibi bu donatı alanlarının hesaplanmasında iç kuvvetlerin büyük etkisi olduğu gibi kullanılan donatı ve beton malzeme dayanımlarının da etkisi olduğu unutulmamalıdır. Bu durum, İller Bankası A.Ş'nin gömülü betonarme borular için gerekli donatı alanlarında oldukça güvenli tarafta kaldığını göstermektedir. Böylece, ülkemizde yapılan betonarme boru tasarımlarının ekonomik olmadığı söylenebilir.

Semboller

W	: Toplam yük
D_i	: Boru iç çapı
D_o	: Boru dış çapı
VAF	: Düşey kemerlenme faktörü
HAF	: Yatay kemerlenme faktörü
W_e	: Boru üzerindeki zemin yükü
W_p	: Borunun kendi ağırlığından dolayı oluşan yük
W_f	: Akışkan yükü
W_L	: Hareketli yük
d	: Paspayı
PL	: Prizma yükü
H	: Dolgu yüksekliği
w	: Zemin birim hacim ağırlığı
As	: Birim uzunluk için gerekli eğilme donatısı alanı
g	: $0.85bf_c$
b	: Birim genişlik
h	: Duvar kalınlığı

- f_c : Beton malzeme dayanımı
 f_y : Donatı malzeme dayanımı
 Φ : Direnç faktörü
 M_u : Birim genişliğe etkiyen tasarım momenti
 N_u : Birim genişliğe etkiyen tasarım aksel kuvveti
 EI : Eğilme Rijitliği
 EA : Aksel Rijitlik
 γ : Birim hacim ağırlık
 HS : Pekleşen zemin modeli
 E_c : Elastisite modülü
 γ_c : Beton malzeme yoğunluğu
 E_{50}^{ref} : Referans elastisite modülü
 E_{oed}^{ref} : Referans ödometre modülü
 E_{ur}^{ref} : Referans yükleme boşaltma modülü
 m : Üstel malzeme sabiti
 c^{ref} : Kohezyon
 C_{mi} : Moment hesabı için boru analiz katsayısı
 C_{ni} : Aksel kuvvet hesabı için boru analiz katsayısı
 C_{vi} : Kesme kuvveti hesabı için boru analiz katsayısı
 W_i : Boru üzerine gelecek yüklerin toplamı
 D_m : Boru ortalama çapı
 ϕ_u : İçsel sürtünme açısı
 ν_{ur} : Poisson oranı
 p^{ref} : Referans gerilme
 R_f : Göçme oranı
A1-A6 : Toprak basıncının boyutsuz düşey ve yatay bileşenleri
a – v : Düşey ve yatay gerilmeleri elde etmek için boyutsuz katsayılar

Kaynakça

- [1] Marston, A., Anderson, A. C, “*The Theory of Loads on Pipes in Ditches and Tests on Cement and Clay Drain Tile and Sewer Pipe*”, Bulletin 31, Iowa Engineering Experimental Station, Ames, Iowa, 1913.
- [2] Janssen, H.A, “*Versuche über Getreidedruck in Silozellen. Zeitschrift des Vereinesdeutscher Ingenieurs*”, 1895.

- [3] Sargand, S.M, Hazen, G.A., Vaithianathan, E, and Hurd, J.O, “*Performance verification of a concrete pipe*”, Concrete International, July, pp. 23-27, 1995.
- [4] Spangler, M.G, “*The Supporting Strength of Rigid Pipe Culverts*”, Bulletin 112, Iowa State College, 1933.
- [5] Marston, A.”*The Theory of External Loads on Closed Conduits in the Light of the Latest Experiments*”, Paper presented at the Proceedings of the Highway Research Board 30, Washington, D.C, 1930.
- [6] Canadian Standards Association (CSA), “*Design of concrete structures*”, CSA A23.3–04. CSA, Rexdale, Ontario, 2004.
- [7] Kılıç, H., Akinay E., “*Gömülü HDPE Borularda Esneme Davranışının İncelenmesi*”, Teknik Dergi, 2019 9373-9398, Yazı 548, 2019.
- [8] Rajah, S., McCabe, M., Plattsmier, J. “*Classification and Specification of Bedding and Backfill for Buried Pipelines*”, Pipelines Conference, Miami Beach, Florida, 2012.
- [9] Erdogmus, E., Tadros, M, “*Behavior and Design of Buried Concrete Pipes Phase II*”, Nebraska Department of Roads Research Reports, 75, 2009.
- [10] Allard, E., Nagggar, E., “*Pressure Distribution around Rigid Culverts Considering Soil-Structure Interaction Effects*”, Int. J. Geomech., ASCE, 2016.
- [11] ACPA, “*Concrete Pipe Technology Handbook*”, American Concrete Pipe Association, 1993.
- [12] ASCE 15-98, “*Standard practice for direct design of buried precast concrete pipe using standard installation (SIDD)*”, 2000.
- [13] ACPA, “*Concrete Pipe Design Manual*”, American Concrete Pipe Association, 2011.
- [14] Wong, L., Allouche, E., Dhar, A., Baumert, M., ve Moore, I., “*Long Term Monitoring of SIDD Type IV Installations*” Can. Geotech. J., 43(4), 392-408, 2006.
- [15] ACPA, “*Design Data 5. Multiple Pipe Installations: Trench Condition.*”, American Concrete Pipe Association, 2011.
- [16] ASTM, “*Standard test method for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass (D-2216–98).*”, Annual book of ASTM standards, American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, Pa., 1998.
- [17] ASTM, “*Standard test methods for laboratory compactions of characteristics of soil using standard effort (D-698–00).*”, Annual book of ASTM standards, American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, Pa., 2000.
- [18] İller Bankası A.Ş., “*Beton boru çaplarına göre sarmal donatı alanları*”, İller Bankası A.Ş, Ankara, Temmuz 2015.