

GÖMÜLÜ BORU TASARIMINDA KULLANILAN YÖNTEMLER

Niyazi U. Terzi¹

Arş. Gör.

Yıldız Teknik Üni. İnş. Müh. Böl. Geoteknik Anabilim Dalı

E mail: nuterzi@yildiz.edu.tr Tel: 0212 259 70 70 /2840 Fax: 0212 259 67 62

Havvanur KILIÇ²

Yrd. Doç. Dr.

Yıldız Teknik Üni. İnş. Müh. Böl. Geoteknik Anabilim Dalı

E mail: kilic@yildiz.edu.tr Tel: 0212 259 70 70 /2568 Fax: 0212 259 67 62

Sönmez YILDIRIM³

Prof. Dr.

Yıldız Teknik Üni. İnş. Müh. Böl. Geoteknik Anabilim Dalı

E mail: ysonmez@yildiz.edu.tr Tel: 0212 259 70 70 /2375 Fax: 0212 259 67 62

ÖZET

Geniş kullanım alanı ve yaşamsal değeri nedeni ile gömülü boruların farklı zemin koşullarında ve yükleme durumlarındaki davranışlarının bilinmesi ve tasarım öncesi değerlendirilmesi gereklidir. Gömülü boruların trafik ve ölü yükler etkisindeki performanslarının belirlenmesi ve boru-zemin etkileşimin aydınlatılmasına yönelik bilinen ve kullanılan en eski ve yaygın yöntemler rijit borular için Marston yük teorisi ve esnek borular için Spangler deformasyon eşitliğidir. Bu yöntemler yanında farklı kabullere dayanan elastik yaklaşımlar ve viskoelastik teoremler bulunmaktadır. Bütün mühendislik problemlerinde olduğu gibi, gömülü boruların davranışlarını belirlemek için sonlu elemanlar analiz yöntemleri de kullanılmaktadır. Bu çalışmada gömülü boruların davranışı tarihsel gelişim içerisinde özetlenerek, geliştirilen tasarım yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları değerlendirilecek

ve gömülü boruların laboratuvarında modellenmesine yönelik olarak yapılacak olan deneysel çalışma tanıtılacaktır.

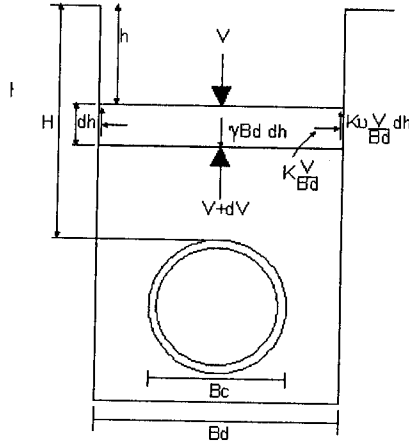
GİRİŞ

Günümüzde gömülü borular petrol, doğal gaz ve hidroelektrik tribünlerindeki enerji maddelerinin taşınmasında, drenaj ve kanalizasyon boruları ile atık suların uzaklaştırılmasında, şehir içi temiz suyun ve zirai amaçlı sulama sularının iletilmesi ve dağıtımında, elektrik ve telefon kablolarının yeraltında güvenle yerleştirilmesi ve korunmasında ve buna benzer bir çok alanda yaygın, güvenli ve ekonomik olarak kullanılmaktadır. Gömülü borular eşit mesafe ve eşit nakliye ücreti için açık kanallı sistemlerle karşılaştırıldığında deniz, demiryolu ve karayolu taşımacılığında en ekonomik ve güvenilir seçenek olarak değerlendirilmektedir (R.Watkins). Özellikle yanıcı ve parlayıcı enerji kaynaklarının gömülü borularla yer altında taşınması çevre güvenliği açısından vazgeçilmez bir seçenektir. Bu geniş kullanım alanı ve yaşamsal değeri nedeni ile gömülü boruların farklı zemin koşullarında ve yükleme durumlarındaki davranışlarının bilinmesi ve tasarım öncesi değerlendirilmesi gerekmektedir.

Gömülü borular konusunda ilk çalışmalar 1930'lu yıllarda Marston tarafından rijit borular dikkate alınarak yapılmıştır. Marston'un ortaya koyduğu teoriler Spangler (1941) ve Watkins (1958) tarafından esnek boruların davranışları da incelenerek genişletilmiştir. Bu yöntemler yanında farklı kabullere dayanan elastik yaklaşımlar ve viskoelastik teoremler bulunmaktadır. Bu çalışmada, gömülü boruların davranışları ve etkileyen faktörler tarihsel gelişim içinde incelenerek bu yöntemlerden kısaca bahsedilecektir.

1) Marston (1930)

Marston (1930)'da hendek ortamında gömülü rijit bir borunun yük altındaki davranışını incelemiştir. Hendek ortamında gömülü rijit bir borunun yük altındaki dayanımı Marston teorisine göre aşağıdaki şekilde incelemiştir (Şekil1).



Şekil 1. Hendek ortamında gömülü rijit bir borunun yük altındaki dayanımı

Marston, Tezghi'nin göçme hipotezinden türeterek geliştirdiği yük teoreminde, hendek içerisinde (dh) kalınlığındaki ince bir kesiti göz önüne almış ve bu kesitin üst ve alt sınırında düşey yüklerin $[Bd(V+dV)+2Fs]$ ve hendeğin yan duvarlarındaki sürtünme kuvvetlerinin toplamını sıfıra eşitlemiştir.

$$Bd(V + dV) + 2Fs = BdV \quad (1)$$

Eşitlikte yer alan;

$$Fs = P_L \cdot \mu \cdot dh$$

$$P_L = K_p \cdot V$$

K_p = Rankine Pasif İtkisi

$$K_p = \tan^2(45 - \frac{\phi}{2})$$

ϕ ; Geri dolgu malzemesinin içsel

sürtünme açısı

$$\mu = \tan \phi''$$

ϕ'' = Geri dolgu malzemesi ile boru duvarları arasındaki sürtünme açısı

Hendek kesitinde,

V = dh kalınlığındaki tabakanın üst sınırındaki düşey basınç

$V+dV$ = dh kalınlığındaki tabakanın alt sınırındaki düşey basınç

$\gamma Bd dh$ = dh kalınlığındaki tabakanın ağırlığı

$K\mu (V/Bd)dh$ = dh kalınlığındaki tabakanın hendek duvarlarındaki sürtünme kuvveti (F_s)

Bd = Hendek genişliği

Bc = Gömülü Borunun Çapı

(1) eşitliğinde var olan ifadeler yerine yazılırsa,

$$(V + dV)\left(\frac{2 \cdot K \cdot \mu \cdot V}{Bd}\right) \cdot dh = V + \gamma \cdot Bd \cdot dh \quad (2)$$

$$0 = (V + dV)\left(\frac{2 \cdot K \cdot \mu \cdot V}{Bd}\right) \cdot \frac{dh}{dV} \quad (3)$$

Diferansiyel denklemin çözümünden,

$$V = \frac{\gamma Bd^2 \left[1 - e^{-2K\mu(h/Bd)}\right]}{2K\mu} \quad (4)$$

elde edilir. Hendek ortamında yerleştirilmiş bir boruya etkiyebilecek maksimum yük $h=H$ yazılırsa, (6) eşitliği elde edilir. Birim uzunluk için boru üzerindeki yük Wd (kN/m),

$$Wd = Cd \cdot \gamma \cdot Bd \cdot 2 \quad (5)$$

Cd , yük katsayısı, $Cd = \frac{\left[1 - e^{-2K\mu(H/Bd)}\right]}{2K\mu}$ eşitliğinden bulunur.

Cd eşitliğindeki $K.\mu$ ifadesi hendeğe yerleştirilen geri dolgu malzemesinin bir fonksiyonudur. $K.\mu$ değerleri bazı geri dolgu malzemeleri için Marston tarafından yapılan deneyler ile saptanmıştır, bu değerler Çizelge 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Zemin Özellikleri-Sürtünme Katsayıları

Zemin Cinsi	Birim Hacim Ağırlığı (kN/m^3)	Rankine Katsayısı K	Sürtünme Katsayısı μ
Kısmen sıkıştırılmış nemli bitkisel toprak	15	0.33	0.50
Suya doymuş bitkisel toprak	18	0.37	0.40
Kısmen sıkıştırılmış nemli toprak	17	0.33	0.40
Suya doymuş kil	20	0.37	0.30
Kuru kum	17	0.33	0.50
Islak kum	20	0.33	0.50

Bu yöntem özellikle döküm metodu ile üretilen rijit boruların yük taşıma kapasitelerini saptamak için geliştirilen ve boru deformasyonundan çok boruların kırılma anındaki sınır taşıma gücü değerlerini belirlemek amacı ile kullanılan bir tasarım yöntemidir. Bu bakımdan esnek davranış gösteren ve ince et kalınlığına sahip çelik borular ile polietilen türü malzemelerden üretilen plastik kökenli boruların yük altındaki davranışlarını belirlemek için Marston yük teoremi yetersiz kalmaktadır.

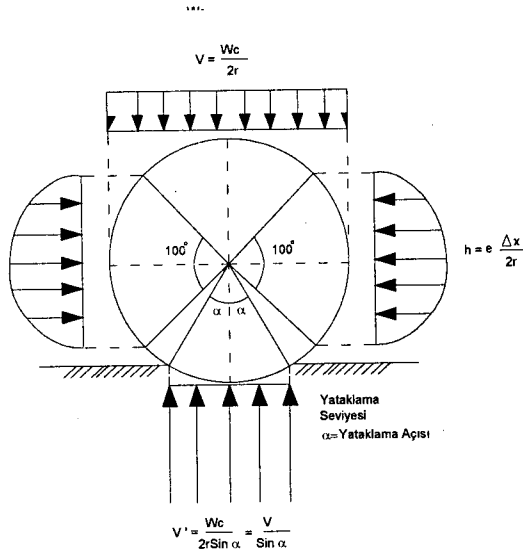
2) Spangler (1941)

Hendek ortamında özellikleri bilinen geri dolgu malzemesi içerisine yerleştirilen esnek boruların şekil değişimlerini saptamaya yönelik yapılan ilk çalışma Spangler tarafından gerçekleştirilmiştir. Spangler (1941)'de yük altında şekil değiştiren bir borunun deformasyon oranının, yük (P), geri dolgu malzemesinin boru yan duvarlarına olan pasif itkisi ve borunun Elastisite modülüne (E_{boru}) bağlı olarak belirlenebileceğini belirtmiş ve elde

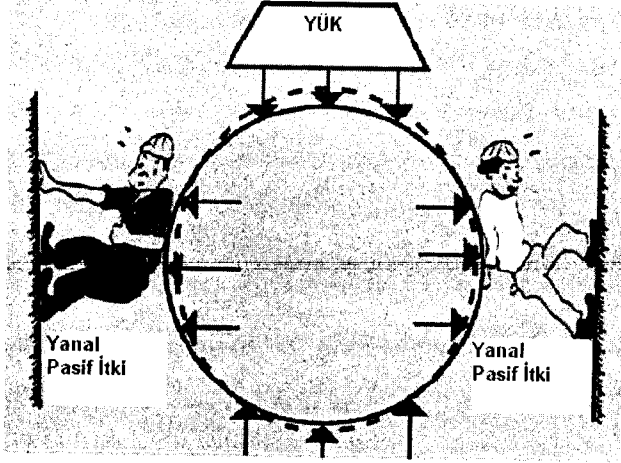
edilen formüle Iowa eşitliği denmiştir. Spangler eşitliğinde boru deformasyonunu etkileyen bu üç temel değişken dikkate alınmıştır. Şekil 2'de Spangler Teoreminde boru çevresinde varsayılan yük dağılımı gösterilmiştir.

$$\Delta x = \frac{W_c r^3 K}{EI + 0.061 e r^4} \quad (8)$$

Eşitlikteki değişkenlerden belirlenmesi en zor parametre hendek sınırları ile boru yan duvarları arasına yerleştirilen geri dolgu malzemesinin göstereceği pasif itki kuvveti 'e' dir. Basitleştirilmiş olarak Şekil 3'de karakterize edilen boru duvarlarına etkileyen pasif itki kuvveti "e" özellikle borunun yatay yönde şekil değişimlerine başlamasından sonra önemli bir performans belirleyici etken haline gelmektedir.



Şekil 2.1 Spangler Teoreminde boru çevresinde varsayılan yük dağılımı



Şekil 2.2 Gömülü Boru Kenarlarındaki Yanal İtkinin Basitleştirilmiş Gösterimi

Ancak pasif itki terimi “e” nin arazi ortamında yerleştirilen bir boru için arazi koşullarında öngörülmesi ve hat boyunca çok değişken zemin ortamları için yeniden elde edilmesi oldukça güçtür. Bu nedenle formülün kullanılması zorlaşmaktadır.

3) Watkins (1958)

Watkins (1958) zemin pasif itkisi “e” yi daha pratik olarak belirlemek için bir dizi deney yapmıştır. Deneysel çalışmaları sonucunda geri dolgu tarafından boru yan duvarlarına uygulanan pasif itki “e” nin, zeminin elastisite modülü olarak kullanılabilceğini belirtmiştir. Bununla beraber Watkins (1958)’de esnek boruların ve geri dolgu malzemesinin uzun süreli yüklemeler altında şekil değiştirmesinin dikkate alınması önerilmiş, zamana bağlı olarak boru-zemin etkileşimi ile dolgu malzemesinin konsolidasyonunun deformasyonlarda belirleyici olduğu belirtilmiştir. Özellikle kullanımı hızla yaygınlaşan polietilen türü malzemelerle üretilen termoplastik boruların ani yüklemeler altındaki deformasyonlarının uzun süreli deformasyonlar türünden tanımlanması gerektiği vurgulanmıştır. Bu nedenlerle Iowa Formülüne “D_L” gecikme faktörü katsayısını ilave

edilmiştir. Watkins (1958)'de D_L gecikme faktörü katsayısını belirlemek için yaptığı çalışmalarda kısa süreli yüklemeler ve Marston (1930)'un önerdiği prizma türü yüklemeler için gecikme faktörünün $DL=1.0$, uzun süreli yüklemeler ve konsolidasyonu beklenen dolgu malzemeleri için ise $DL=1.5$ olarak alınması tavsiye edilmiştir.

Watkins (1958)'de "Iowa Formülü" üzerinde yapılan bu iki temel değişiklikle yöntemin kullanım kolaylığı artırılmıştır. Formül üzerinde yapılan değişiklikler sonucunda Iowa Formülü "Modifiye Iowa Formülü" olarak tanımlanmıştır. Günümüzde güncelliğini korumakta olan bu tasarım yöntemi, gömülü boruların performans kriterlerini belirlerken oldukça sık kullanılmaktadır. Hendek koşullarında P (psi) basıncı altında PS boru rijitliğine sahip bir borunun şekil değişimlerini $(\Delta x/d)$ % cinsinden değerlendirebilmek için Modifiye Iowa Formülü (8) kullanılır.

$$\frac{\Delta x}{d} \% = \frac{100 D_L P K}{0.0149(PS) + 0.061E} \quad (8)$$

Burada,

$$P = \text{basınç (psi)}, PS = \text{Boru rijitliği}, PS = \frac{6.71EI}{r^3}$$

D_L =gecikme katsayısı

K =Yanal itki katsayısı

E =Boru elastisite modülü

Modifiye Iowa formülü 50 yılı aşan bir zamandır farklı, boru çap ve özelliklerinde ve yükleme koşullarında kullanılmaktadır. Tasarım ve uygulamada edinilen tecrübeler ışığında Modifiye Iowa yönteminin performans kriterlerinin belirlenmesindeki olumlu ve olumsuz yönleri şu başlıklarda değerlendirilebilir.,

3.1 Modifiye Iowa Formülünün Olumlu yönleri;

- Boruların yük altındaki deformasyonlarını tahmin etmek için kullanılan ilk ve en yaygın analitik çözümleme metodudur.
- Kullanımı basit ve hızlıdır
- Yataklama koşullarına göre borunun deformasyonu değerlendirilebilir.
- Boru duraylılığı zamana bağlı olarak kesitirilebilir.
- Deformasyonlar sonucunda boru rijitliğinde ve zeminin elastisite modülünde meydana gelen değişimler aşamalı olarak hesaplanarak zemin-boru ilişkisinin non-liner davranışı modellenebilir.
- Drenaj amaçlı kullanılan Korege Metal Borular içinde yöntem kullanılabilir

Modifiye Iowa Formülünün olumsuz yönleri

- Denklemden elde edilen sonuçlar yalnızca borunun çember kesitinin deformasyonunu hesaplar. Borunun dairesel ve eksenel yöndeki deplasmanlarını hesaplayamaz.
- Formülde yer alan parametreleri laboratuvar ortamında belirlemek oldukça güçtür ve elde edilen değerlerin arazi ortamını temsil etme yetersizlikleri söz konusudur.
- Boru-zemin ilişkisinin davranış biçimi tam anlamı ile değerlendirilememektedir.
- Borunun %5'den daha az şekil değiştirmeler altında düşey ve yatay yönde deplasmanlarının eşit olduğu varsayılır. Bu kabul ile özellikle boru çemberindeki küçük yer değiştirmeler (%1-2) de boru çember kesitinin elips şekline döndüğü kabul edilir. Ancak arazi gözlemlerine göre borunun çember kesiti deformasyonları elipsten daha farklı geometrik şekillerde deforme olduğunu göstermektedir.

- Modifiye Iowa Formülünde kullanılan zeminin elastik modülü zeminin üniform özellikte olduğu kabul edilerek belirlenir. Üniform olmayan zemin koşullarında tek bir elastik modül kullanmak deformasyonların belirlenmesinde yetersiz kalmaktadır.
- Boruların yüzeye yakın yerleştirmelerinde Modifiye Iowa Formülünün kullanılması eksik sonuçlar vermektedir.

4. DİĞER YÖNTEMLER

Spangler (1941) Iowa formülü elastisite teorisinden faydalanılarak geliştirilse de, Iowa denklemini yaptığı laboratuvar ve arazi deneylerinden elde ettiği gözlem ve tecrübelerle oluşturmuştur. Bu bakımdan Richard-Burns (1964) yaklaşımı, Spangler yönteminden farklı olarak elastisite kabuk teorisi kullanarak geliştirilen ve bütünüyle kuramsal temele dayanan bir tasarım yöntemidir. Teorik çalışmalarında Richard-Burns dairesel kesitli bir boruyu sonsuz elastik ortam içerisine kabul ederek düşey ve yatay yüklere karşı dayanımı ve şekil değişimlerini incelemiştir. Düşey yükler elastik zemin ortamında zeminin Poisson Oranı kullanılarak yanal yüke çevrilmiştir. Deneysel çalışmalar ve tecrübeler göstermiştir ki, Richard-Burns (1964) yönteminin özellikle büyük çaplı ve ince duvarlı borularda kullanılması uygun sonuçlar vermektedir.

Hoeg (1968), Richard ve Burns (1964)'ün elastik kabuk teorisinden türettiği hesaplama yöntemi üzerinde bazı değişiklikler yaparak kendi yöntemini geliştirmiştir. Richard ve Burns (1964) yöntemi zemini tam elastik kabul ederek 'K' yanal itki katsayısını Poisson Oranı'nı kullanarak elde etmiştir. Hoeg (1968)'de 'K' katsayısı Poisson Oranı'ndan bağımsız olarak tanımlamıştır. Bunun yanında, zemin-boru ara yüzey etkileşimi Richard-Burns yaklaşımının aksine iki farklı uç sınır koşulunda değil üniform oranda tanımladığı bir kestirim ile değerlendirmiştir. Hoeg (1968),

geliştirdiği tasarım yönteminin Richard-Burns (1964) yönteminde olduğu gibi büyük çaplı ve korege olmayan borularda kullanılmasını tavsiye etmektedir. Bunun yanında yöntemin özellikle sığ derinliklere (boru çapı derinliğinden daha az) yerleştirilen borularda anlamsız sonuçlar vereceğini de vurgulamıştır.

Termoplastik gömülü bir borunun performansını etkileyen en önemli parametre zamana bağlı davranıştır. Bu bakımdan boruların uzun dönemli duraylılıklarının belirlenmesi, onların zamana bağlı davranışlarının ve krip değerlerinin bilinmesi ile olanaklıdır. Her ne kadar Spangler Iowa formülünde bu etkiyi göz önünde tutabilmek için D_L gecikme faktörünü kullansa da uzun dönemli şekil değiştirmelerde D_L faktörünün yetersiz olduğu görülmüştür. Bu amaçla Chuo ve Lytton (1989)'da Hoeg (1968)'in elastik çözümüne Laplas dönüşümü uygulayarak viskoelastik yöntemini geliştirmiştir.

Sonlu elemanlar analiz yöntemleri analitik yaklaşımlarla çözümü çok güç olan problemleri çözebilmek için geliştirilmiş bir matematiksel analiz yöntemidir. Hemen hemen bütün mühendislik uygulamalarında kullanılan sonlu elemanlar analiz yöntemi, gömülü boruların performans sınırlarını belirlemek içinde uzun zamandır kullanılmaktadır. Bu çalışmada da laboratuarda yapılan model deneyler PLAXIS sonlu elemanlar analiz programı ile modellenerek nümerik olarak analiz edilecektir. Analiz sonuçları ile model deney sonuçları karşılaştırılacaktır.

2. AMPRİK YAKLAŞIMLARIN GENEL DEĞERLENDİRMESİ

Marston Yük Teorisi basit hesaplama aşamaları ve gerçeğe yakın sonuçları nedeni ile halen geçerliliğini korumaktadır. Marston Yük teorisinde, boru üzeri ve çevresindeki geri dolgu malzemesi ile hendek duvarları arasındaki oluşan kesme kuvvetlerini dikkate alınmış, boru çemberine etkiyecek yükün

hendek duvarları ara yüzeylerinde oluşan kesme kuvvetleri etkisinde belirlenebileceği belirtilmiştir. Bununla beraber Marston geliştirdiği yük teorisinde tartışmalı iki kabul yapmıştır. Bunlardan ilki yük etkisi ile geri dolguda oluşabilecek kayma düzlemlerinin düşey yönde oluştuğunu kabul etmiş, diğeri ise boru yan duvarlarına etkiyen yanal gerilmeleri K_a Rankine yanal itki katsayısı ile hesaplanacağını varsaymıştır. Marston'un bu iki kabul ile geliştirdiği kuramsal yaklaşım halen tartışılmaktadır. Yapılan deneysel gözlemler sonucu kayma düzlemlerinin yalnızca düşey yönde oluşmadığı görülmüş, yanal itkinin ise Rankine yaklaşımından daha farklı değerlerde ortaya çıktığı saptanmıştır. Ancak her iki kabule rağmen amprik çözümler için tasarıma daha uygun farklı yaklaşımlar ortaya konmamıştır. Spangler (1941)'de esnek boruların deformasyonunu belirlemek için Marston Yük Teorisinden türetilerek belirlenen amprik yaklaşımda, gömülü borunun yük altında eliptik olarak şekil değiştirdiğini varsaymıştır. Ancak yapılan deneysel çalışmalarda bu varsayımın yalnızca boru rijitliğinin geri dolgu malzemesi rijitliğinden daha büyük olduğu durumlarda geçerli olduğu, aksi koşullarda borunun düzensiz şekillerde deformasyonlar ortaya çıkarttığı belirlenmiştir. Watkins (1958) tarafından yapılan çalışmalarda ise Spangler (1941) 'de zemin rijitliğinin yanal itki sabiti olarak kabul edilmesi ve bu değerinin sabit alınması eleştirilmiş, derinlikle veya sıkıştırma yüzdesi ile artan zemin rijitliklerinin kullanılmasının daha doğru bir yaklaşım olduğu savunulmuştur.

Richard-Burns (1964) ve Hoeg (1968)'in yaklaşımlarında ise temel varsayım zeminin tam elastik bir malzeme olarak değerlendirilmiş olmasıdır. Oysa zemin yük altında doğrusal olmayan bir davranış sergilemektedir. Bu nedenle Hoeg (1968)' in tam elastik malzeme kabulüne dayanan kuramsal yaklaşımı tasarımcıların kullanımını zorlaştırmıştır.

Bu tasarım yöntemleri irdelendiğinde, sonlu elemanlar analiz yöntemlerinin en kabul edilebilir çözüm yöntemi olduğu, diğer yöntemlerin aksine zemin