

## Çelik Doğal Gaz Boruların Eğrilik Kapasitesi Üzerine Örnek Bir Çalışma: İstanbul Boğaz Geçişi

Adil YİĞİT\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0003-1045-6127

<sup>1</sup>*İstanbul Gaz Dağıtım A.Ş., Kavacık, Beykoz-İstanbul*

Geliş tarihi: 17.01.2023 Kabul tarihi: 28.03.2023

Atıf şekli/ How to cite: YİĞİT, A., (2023). Çelik Doğal Gaz Boruların Eğrilik Kapasitesi Üzerine Örnek Bir Çalışma: İstanbul Boğaz Geçişi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(1), 25-33.

### Öz

Doğal gaz boru hatları iletim ve dağıtım hattı olarak genellikle iki ana gruba ayrılmaktadır. Ancak doğal gazı bir bölgeden diğerine taşıyabilmek için ise çelik boru hatları (iletim hatları) kullanılmaktadır. Doğal gaz çelik şebeke inşasında bazen düşey veya yatay kurpların dönülmesi gerekebilmektedir. Böyle durumlarda çelik boruların eğrilik kapasiteleri belirleyici olmaktadır. Bunun yanında bu kapasiteyi sınırlayan önemli bir faktör de lokal burkulma durumudur. İstanbul'daki doğal gaz şebekesinin arz güvenliğini güçlendirmek için İstanbul Boğazı'nın her iki yakasında bulunan doğal gaz çelik iletim hatlarının birbirine entegrasyonu planlanmaktadır. Boğaz'ın en kesiti dikkate alındığında bir düşey karp örnek çalışması olarak değerlendirilebilecek tasarımda sadece boruların eğrilik kapasiteleri, et kalınlıkları ve lokal burkulma sınırları göz önüne alınmıştır. İstanbul doğal gaz şebekesinde kullanılmakta olan çelik borular dikkate alınarak hangi çaptaki boruların hangi eğrilik kapasitelerine ve hangi lokal burkulma sınır değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre X-52 çelik malzemeden üretilmiş 12" çelik borunun en optimum çözümü verdiği tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Boğaz boru hattı geçişi, Çelik boru, Eğrilik, Yerel burkulma

### A Sample Study on Curvature Capacity of Steel Natural Gas Pipes: Bosphorus Crossing

#### Abstract

Natural gas pipelines are usually divided into two main branches as transmission and distribution pipelines. Natural gas is usually distributed with polyethylene pipelines for domestic use. However, steel pipelines (transmission pipelines) are used to transport natural gas from one region to another. In the construction of natural gas steel network, it is sometimes necessary to build vertical or horizontal curves. In such cases, the curvature capacities of steel pipes are decisive. Besides, an important factor limiting this capacity is local buckling. To strengthen the supply security of the natural gas network in Istanbul, it has been planned to integrate each other the natural gas steel transmission pipelines on both sides of the Bosphorus. Considering the cross-section of the Bosphorus, only the curvature capacities and thicknesses of the pipes and the local buckling limits have been taken into consideration in the plan, which can be

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Adil YİĞİT, [adilyigit75@hotmail.com](mailto:adilyigit75@hotmail.com)

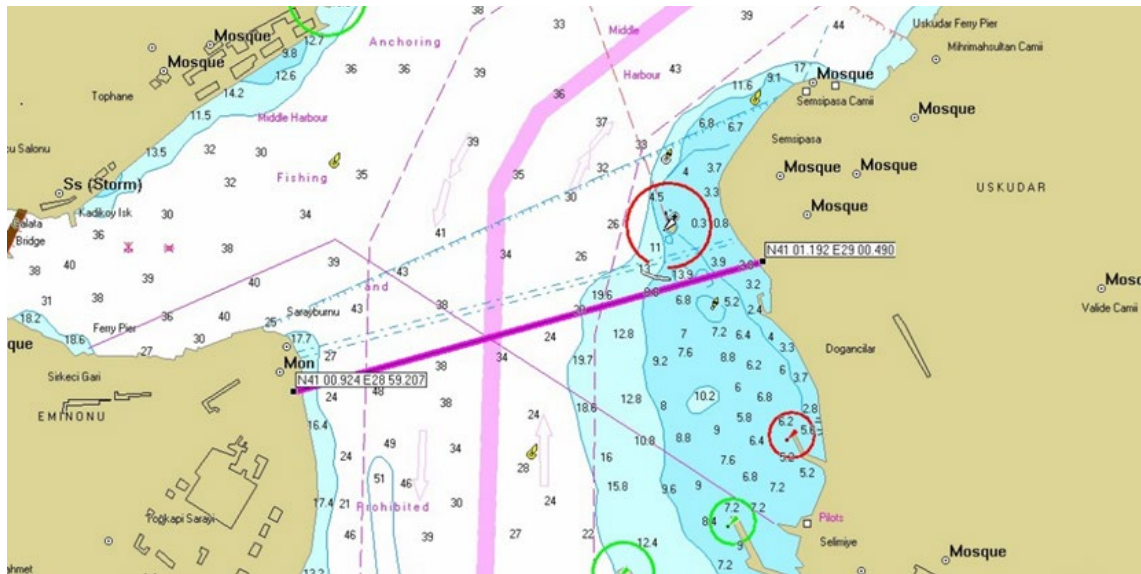
considered as a vertical curve case study. Considering the steel pipes used in the Istanbul natural gas network, it has been determined which diameter pipes have which curvature capacities and local buckling limit values. Depending on the obtained results, it has been concluded that 12" steel pipe made of X-52 steel material gives the most optimum solution.

**Keywords:** Bosphorus pipeline crossing, Steel pipe, Curvature, Local buckling

## 1. GİRİŞ

Doğal gaz arzının sürekliliğinin temini güvenli gaz arzının temelini oluşturmaktadır. Bu amaç doğrultusunda güçlü şebeke ağları tasarlamak veya var olan bu ağları güçlendirmek son derece ehemmiyet göstermektedir. İstanbul gibi hem Avrupa hem de Asya Kıtası'nda toprakları olan, ortasından uluslararası su yolu geçen bir şehrin her iki kıtadaki doğal gaz şebekeleri kendi içinde güçlü olsa da bu iki ağı birbirini desteklemesi planları her daim gündemde kalmaktadır. Bu bağlamda, bu makale kapsamında yapılan çalışmada her iki yakadaki şebekenin birbirini desteklemesi için gerekli analizler yapılmıştır.

Doğal gaz şebekeleri genel olarak iletim ve dağıtım hatları şeklinde sınıflandırılmaktadır. İletim hatları doğal gazı bir noktadan diğerine taşıyan genel olarak nispeten yüksek basınçta çalışan (İstanbul için 20 bar) çelik boru hatlarıdır. Dağıtım hatları ise şehir içinde evsel kullanım amacıyla doğal gaz arzını sağlayan nispeten düşük basınçta çalışan (İstanbul için 4 bar) polietilen boru hatlarıdır. Bu çalışma kapsamında Boğaz'ın çelik boru hattıyla (iletim hattıyla) geçilerek her iki yakadaki şebekenin birbirini desteklemesi planlanmıştır. Bu geçiş dizaynı çalışması için Sarayburnu ile Salacak arasındaki güzergah ele alınmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Boğaz geçişi güzergâhı [1]

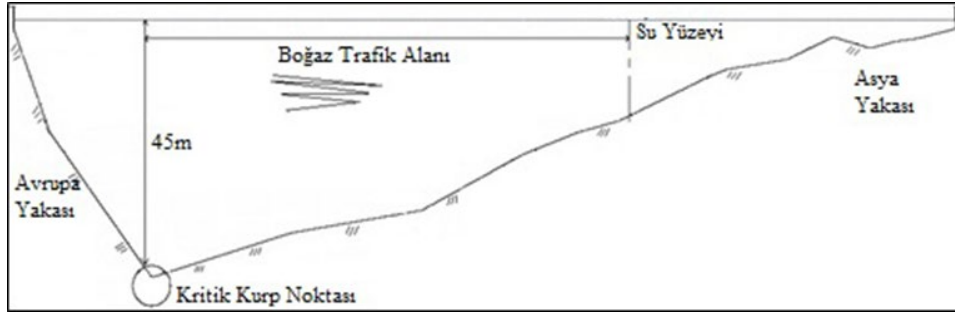
Yukarıda gösterilen (Şekil 1) güzergahtan inşa edilecek olan çelik boru hattı üzerine statik ve dinamik bazı yüklerin etki edeceği, ayrıca beklenen İstanbul Depremi ( $M=7,5$ ) nedeniyle boru hattının sismik dizaynının gerekeceği gibi

hususlar birer mühendislik yaklaşımı gerçeğidir [1-3]. Ancak bu çalışma kapsamında tasarımın sadece düşey kurp geçişine odaklanılmış olup dinamik ve sismik yüklere karşı analizler bu kapsam dışında tutulmuştur.

### 1.1. Güzergah Topoğrafyası

Çelik doğal gaz boru hattının geçilmesi planlanan Salacak-Sarayburnu hattı uluslararası su yolu olan İstanbul Boğazı içinde kalmakta olup Boğaz yüzeyinde Karadeniz'den Marmara Denizine (Kuzey-Güney) doğru ve tabanda ise Marmara Denizinden Karadeniz'e doğru (Güney-Kuzey) bir akıntı mevcuttur. Yüzey akıntısı bazen 4-5 m/s gibi bir hıza ulaşabilmektedir. Dip akıntıları yüzey akıntılarına göre daha yavaş olup Özellikle deniz tabanında akıntının deniz tabanı ile teması sebebi ile iyice azalmaktadır. Tüm bunların yanı sıra dip akıntıları için 100 yıllık yinleme dönemi akıntı hızı 1,4 m/s olarak bilinmektedir [4].

Güzergah en kesiti (batimetrik verileri) dikkate alındığında, yaklaşık 1800 metre olan hat üzerinde Asya Kıtası tarafında deniz derinliğinin yatık bir eğimle 45 metrelere ulaştığı, Avrupa Kıtası kısmının ise oldukça sert ve dik bir eğimle 45 metre derinliklerden kıyı hattına çıktığı tespit edilmiştir (Şekil 2). Burada (Avrupa Yakası kıyısında) oluşan bu çukur düşey karp tespitinde belirleyici olmaktadır. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında, kritik çap tespitinde bu kurba odaklanılmıştır. Bu noktada iki tane ana belirleyici unsur gündeme gelmektedir. Birincisi çelik boruların bu kurbu dönebilme kapasitesi, ikincisi de boru yüzeylerinde lokal burkulmaya sebebiyet verilmemesi hususudur.



Şekil 2. Güzergah en kesit krokisi

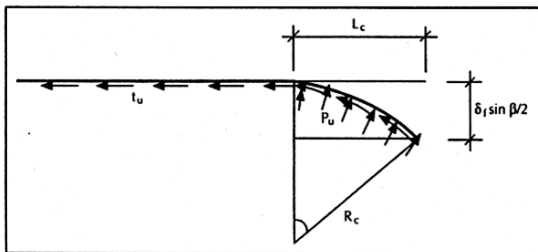
### 1.2. Çelik Boruların Eğrilik Yarıçapı

Boruların eğrilik kapasiteleri ile ilgili bazı çalışmalar yapılmakla beraber karp dönüşüne bağlı eğilme şekil değiştirmesi durumu için Kennedy vd. (1977) tarafından toprak-boru etkileşim kuvveti de dikkate alınarak aksenal çekme halindeki karp durumunda meydana gelebilecek eğilme şekil değiştirmesi aşağıdaki gibi modellenmiştir (Şekil 3) [5-7].

Bu modellemeye göre eğilme şekil değiştirmesi ( $\epsilon_b$ ) ve eğrilik yarıçapı ( $R_c$ ), sırasıyla, Eşitlik (1) ve Eşitlik (2)'deki gibi açıklanmıştır.

$$\epsilon_b = \frac{D}{2R_c} \quad (1)$$

$$R_c = \frac{\sigma \pi D t}{P_u} \quad (2)$$



Şekil 3. Boru eğrilik yarıçapı modellemesi [5]

Burada;  $\sigma$  aksenal çekme gerilmesi, D boru çapı, t boru et kalınlığı,  $P_u$  ise çekme nedeniyle dolgu-boru arasında oluşan, birim boya düşen kuvvettir. Bu kuvvetin hesabında zeminin kumlu veya killi olmasına göre iki ayrı formülden söz edilirken burada Boğaz tabanının kumlu zemin olması dikkate alınarak aşağıdaki Eşitlik (3)'ten faydalanılmıştır.

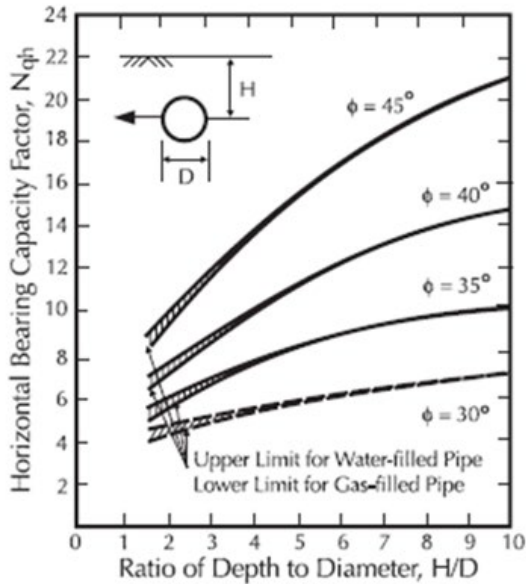
$$P_u = \bar{\gamma} H N_{qh} D \quad (3)$$

Burada  $D$  boru çapı,  $\bar{\gamma}$  toprağın efektif birim hacim ağırlığı,  $H$  boru hattı ekseninin gömülme derinliğidir.  $N_{qh}$  ise kum için yatay taşıma kapasitesidir (Şekil 4) [8].

Ayrıca  $x = H/D$  olarak tanımlanarak;

$$N_{qh} = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 \quad (4)$$

olacak şekilde aşağıdaki Çizelge 1’de kullanılabilir [8].



Şekil 4. Kum için yatay kapasite faktörü [9]

Çizelge 1. Yatay taşıma kapasite faktörü

	$\emptyset$	a	b	c	$dx10^{-3}$	$e x10^{-5}$
$N_{qh}$	20	2,399	0,439	-0,03	1,059	-1,754
$N_{qh}$	25	3,332	0,839	-0,09	5,606	-13,19
$N_{qh}$	30	4,565	1,234	-0,089	4,275	-9,159
$N_{qh}$	35	6,816	2,019	-0,146	7,651	-16,83
$N_{qh}$	40	10,959	1,783	0,045	-5,425	-11,53
$N_{qh}$	45	17,658	3,309	0,048	-6,443	-12,99

Eşitlik (1)’den elde edilen şekil değiştirme oranı için sınırlayıcı bir durum olan lokal burkulma durumunun analizlerde mutlaka dikkate alınması önemli bir gerekliliktir.

### 1.3. Çelik Boruların Lokal Burkulma Analizi

Burkulma, basınç yüküne maruz bir yapı elemanının kararlı durumdan kararsız duruma aniden geçiş yaptığı yapısal bir sorunlu durumu ifade etmektedir. Lokal burkulma ise boru cidarının (çeperinin) yerel istikrarsızlık durumu olarak ifade edilmektedir (Şekil 5). Lokal çeper burkulmasının başlamasından sonra burkulma bölgesinde iç ve dış kuvvetlerin etkisiyle gerilme yığılmaları meydana gelir. Bu yığılmalar nedeniyle meydana gelen boru cidarındaki büyük eğilmeler (çöküntü ve çıkıntılar) boruda çevresel çatlamalara ve sonunda da sızıntıların ortaya çıkmasına neden olurlar. Borularda lokal burkulma üzerine yapılan birçok çalışmanın yanı sıra önceden yapılmış olan laboratuvar testlerine dayanarak Hall ve Newmark (1977) bir boruda basınç nedeniyle ortaya çıkan yerel burkulmanın ( $\epsilon_{cr}$ ), teorik değer ( $\epsilon_{teorik}$ ) 1/3 ile 1/4’ü kadar bir şekil değiştirme oranında başladığını ortaya koymuştur [10-14]. Buna göre  $t$  boru et kalınlığı ve  $R$  yarıçap olacak şekilde Eşitlik (5) ve Eşitlik (6) elde edilmiştir.

$$\epsilon_{teorik} = 0,6 \frac{t}{R} \quad (5)$$

$$0,15 \frac{t}{R} \leq \epsilon_{cr} \leq 0,20 \frac{t}{R} \quad (6)$$



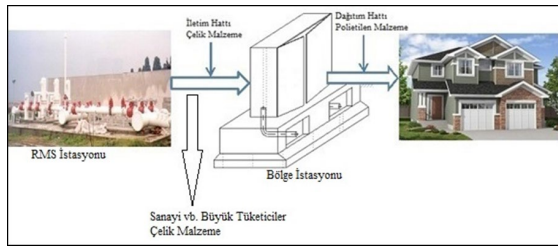
Şekil 5. Boruların lokal burkulması [14]

Kritik lokal burkulma (buruşma) şekil değiştirme oranı ( $\epsilon_{cr}$ ) sınırlayıcı bir boru hattı yetersizlik kriteri olup çalışmanın hassasiyetine bağlı olarak kıyas yapmak için alt veya üst sınır değerleri kullanılabilirdiği gibi bu iki değer ortalaması da kullanılabilir. Bu çalışma kapsamında ise minimum değer kullanılmıştır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Malzeme

Üzerinde çalışma yapılmakta olan doğal gaz şebeke ağında çelik ve polietilen (PE) olmak üzere iki tür boru malzemesi mevcuttur. RMS istasyonu olarak adlandırılan ana merkezden teslim alınan doğal gaz 20 bar basınçta gaz taşıyan iletim hatları (çelik boru) ile büyük tüketici ve bölge istasyonlarına taşınmaktadır. Bölge regülatörlerinde 4 bar basınçta düşürülen doğal gaz polietilen borular ile evsel kullanım için arz edilmektedir (Şekil 6). Değerlendirilmeye alınan gaz şebekesinde kullanılmakta olan polietilen ve çelik borular için bu çalışma kapsamında yapılmakta olan analizlerde kullanılacak gerekli bazı değerler aşağıda Çizelge 2’de verilmiştir [15,16].



Şekil 6. İstanbul doğal gaz arz krokisi

Çizelge 2. Boru malzemesi özellikleri [7,8]

Malzeme adı	D (mm)	t (mm)	E (MPa)	Akma dayanımı $\sigma$ (MPa)
PE 63	63	5,8	850	19
PE110	110	10,0	850	19
PE125	125	11,4	850	19
4" Çelik	114,3	4,37	200.000	241 (Grade B)
6" Çelik	168,3	4,37	200.000	241 (Grade B)
8" Çelik	219,1	4,78	200.000	241 (Grade B)
12" Çelik	323,8	5,56	200.000	241 (Grade B)
16" Çelik	406,4	6,35	200.000	241 (Grade B)
20" Çelik	508	7,14	200.000	241 (Grade B)
24" Çelik	609,6	7,92	200.000	241 (Grade B)
28" Çelik	711,2	9,52	200.000	241 (Grade B)
30" Çelik	762	11,13	200.000	241 (Grade B)

Boğaz geçişi özel bir imalat şekli olup bu tür özel imalatlar için çelik boruların kullanılması tercih edilen bir husustur. Ancak bunun yanı sıra Boğaz geçişinin esas amacı her iki yakadaki şebeke ağını

birbirleriyle desteklemek olduğundan 20 bar basınçta gaz taşıyan şebeke elemanının 4 bar taşıyana göre tercih edilmesi diğer bir önemli nedendir. Bu nedenlerle bu çalışma kapsamındaki analizlerde çelik borulara odaklanılmıştır.

### 2.2. Analizler

Batimetrik detayı Şekil 2’de görülmekte olan kesit tabanına boru hattı serilerle imalat yapılabileceği gibi güzergah boyunca deniz dibinde tranşe açılıp planlanmakta olan çelik boru hattı bu tranşeye gömülerek de imalatın yapılması mümkündür. Gömülerek yapılacak olan böyle bir imalatta tabanın yüzey şekillerine uyma zorunluluğu nispeten az olup eğrilik yarıçapı yüksek olan yerlerde tranşe kazısı ayarlanarak bu eğriliğin yumuşatılması sağlanabilir. Yüzeye serme yaklaşımına göre böyle bir uygulamanın gömme derinliğine bağlı gelecek ilave dolgu yükü, İstanbul’da beklenmekte olan yaklaşık 7,5 büyüklüğündeki bir depremden kaynaklanacak dolgu-boru hattı arasındaki sürtünmelere bağlı ilave sismik yükler gibi dezavantajları olacaktır. Ayrıca gemilerin çapa atma ihtimalleri dikkate alındığında gömülü olmayan imalatta boru hattının bu tür dış müdahalelere açık olması istenen bir durum değildir. İstanbul Boğazı dünya deniz yolları arasında kritik geçiş noktalarından, düğüm noktalarından biri olup bu trafiği aksatmadan en kısa sürede planlanan imalatın tamamlanması elzem bir durumdur. Hem bu imalat hızı hem de beklenen deprem etkileri dikkate alındığında dış müdahalelere karşı boru hattının beton/betonarme korumayla muhafaza edilerek ilgili imalatın gerçekleştirilmesi ön plana çıkmaktadır.

Her ne şekilde proje ve planlama yapılırsa yapılsın Boğaz dibi topoğrafyası (Şekil 2) dikkate alındığında mutlaka kurp dönüşleriyle karşılaşılacağı açıktır. Burada yapılmakta olan analizler geçiş tipine göre boru hattında oluşacak yükler ve bunlara bağlı tasarımlardan ziyade bu kurp dönüşlerine odaklanmaktadır. Çelik boru ile yapılması planlanan doğal gaz Boğaz geçişi imalatı için elastik sınırlar içinde kalacak şekilde analizler yapılmıştır. Analizlerde akma gerilmesinin %70 ( $\sigma=0,70\sigma_a$ ) değeri emniyetli tarafta kalmak için kullanılmıştır. Buna göre eğrilik yarıçapı;

$$R_c = \frac{ED}{1,4\sigma_a} \quad (7)$$

olarak elde edilmiştir. Burada E elastisite modülü, D boru çapıdır.

Irgat yardımıyla uç uca kaynaklanan boruları 135 tonluk çekme kuvveti uygulayarak tabana yerleştirme yöntemi kullanılacak olup böyle bir uygulamada boru kesit alanı, dolayısıyla da boru et kalınlığı diğer önemli bir belirleyici parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu analizler Şekil 2’de verilmiş olan kritik kurp noktasına göre yapılmış olup bu kurban doğal yüzey eğrilik yarıçapı ise yaklaşık olarak 150 metre olarak tespit edilmiştir [1]. Burada bahsedilen genel analiz yaklaşımları kapsamında elde edilen bulgular aşağıda değerlendirilmeye tabi tutulmaktadır.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

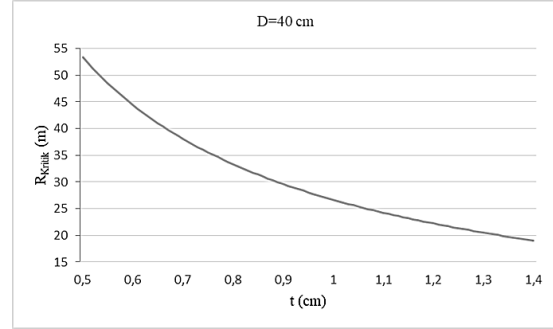
Boru hattında burkulma oluşmayacak şekilde bir imalat yapılabilmesi için gerekli olan minimum eğrilik yarıçapları, Eşitlik 6’daki minimum kritik burkulma şekil değiştirme oranı değeri dikkate alınarak, Çizelge 2’deki çelik boru özelliklerine göre aşağıdaki gibi elde edilmiştir (Çizelge 3). Buna göre her bir boru çapı için elde edilmiş olan minimum kritik eğrilik yarıçapı ( $R_{kritik}$ ) ilgili boruda lokal burkulmanın başladığı alt sınır olarak kabul edilmiştir. Diğer bir deyişle bu durum, bu eğrilik yarıçapından daha düşük değerdeki kurpların söz konusu boru malzemesiyle dönülemeyeceğinin tespitidir. Çelik boru burkulmasına bağlı minimum kritik eğrilik yarıçapı;

$$R_{Kritik} = \frac{D^2}{0,6t} \quad (8)$$

şeklinde elde edilmiştir.

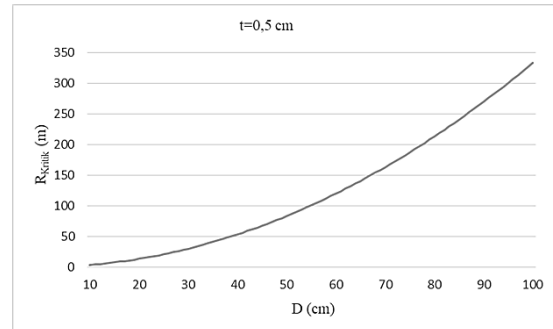
Lokal burkulmaya dayalı elde edilen minimum kritik eğrilik yarıçapının et kalınlığına (Şekil 7) ve boru çapına (Şekil 8) göre değişimi incelenmiştir. Örnek olarak ele alınan ve çapı 40 cm olan çelik bir boru için et kalınlığı arttıkça kritik minimum

eğrilik yarıçapının düştüğü görülmektedir. İstenen bir durum olarak değerlendirilen bu husus et kalınlığı arttığında bir boruda lokal burkulma riskinin azaldığını ve daha keskin (küçük) kurpların dönülebilmesine olanak sağladığını göstermektedir.



Şekil 7. Boru et kalınlığı - kritik eğrilik yarıçapı

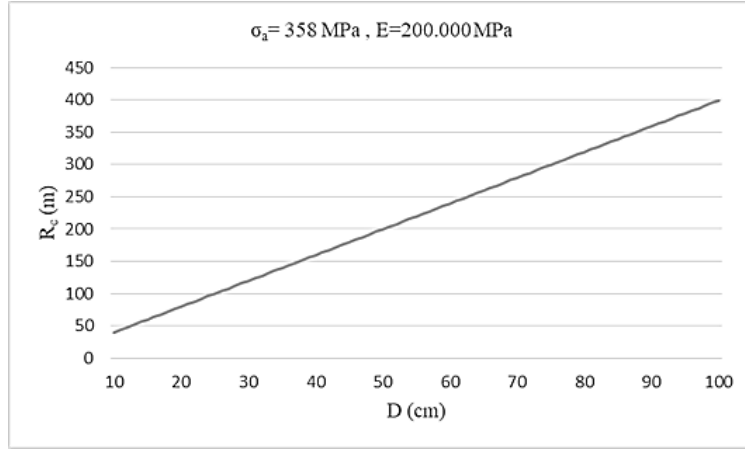
Ayrıca sabit bir et kalınlığı ( $t=0,5$  cm) dikkate alınarak boru çapına göre kritik minimum eğrilik yarıçapının arttığı görülmektedir. Bu durum boru çapı arttıkça lokal burkulma riskinin artması ve buna bağlı olarak küçük kurpların dönülebilme kapasitesinin azalması olarak değerlendirilebilir. Şekil 8’e göre örneğin 100 cm çaplı bir boru ancak 333 metrelik bir kurptan daha düşük bir kurbu dönemezken 40 cm çaplı bir boruda ise bu alt sınır 53 metre olarak tespit edilmiştir.



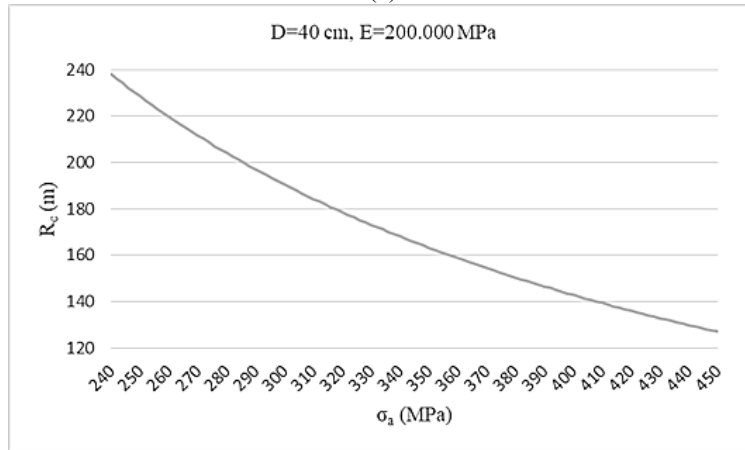
Şekil 8. Boru çapı- kritik eğrilik yarıçapı

Bir boruda çap arttıkça akma dayanımına göre dönebileceği kurp yarıçapı da artmaktadır (Şekil 9a). Yani lokal burkulma analizinde olduğu gibi çapın artması daha küçük (keskin) kurpların dönülebilme kapasitesini azaltmaktadır. Akma

dayanımı yüksek boru malzemesi kullanılması tespit edilmiştir (Şekil 9b).  
durumunda ise söz konusu bu kapasitenin arttığı



(a)



(b)

Şekil 9. a) Çapa göre, b) Akma dayanımına göre boru kurp kapasitesi

### 3.1. İncelenen Sahaya Uygulama - Boğaz Geçiş Uygulaması

İmalat aşamasında, elastik sınırlar dahilinde kalabilmek için, ırgatın uygulayacağı kuvvetten (135 ton) kaynaklı kesitte oluşacak olan gerilme emniyetli akma dayanımını aşmamalıdır. Bu şartlar altında Çizelge 2’de verilmiş olan Grade B çelik borular için gerekli boru cidar kalınlıkları ( $t_{hesap}$ ) ve kurp kapasiteleriyle (Max.  $R_c$ ) birlikte kritik minimum eğrilik yarıçapları ( $R_{kritik}$ ) Çizelge 3’teki gibi elde edilmiştir.

Çizelge 3. Mevcut çelik boru tipleri için sonuçlar

Çap	Çap (mm)	t (mm)	$R_{kritik}$ (m)	$t_{hesap}$ (mm)	Max. $R_c$ (m)	$R_{Mevcut}$ (m)
4"	114,3	4,37	5	30,34	68	150
6"	168,3	4,37	11	16,82	100	150
8"	219,1	4,78	17	12,32	130	150
12"	323,8	5,56	31	8,07	192	150
16"	406,4	6,35	43	6,37	241	150
20"	508	7,14	60	5,06	301	150
24"	609,6	7,92	78	4,21	361	150
28"	711,2	9,52	89	3,60	422	150
30"	762	11,13	87	3,36	452	150

Analizlerden elde edilen sonuçlara göre hem et kalınlığı hem de kurp yapabilme kapasitesi açısından her iki gerekliliği de sağlayan kısımlar Çizelge 4’te gölgelendirilmiştir. Buna göre X-52 çelik malzeme için sadece 12” çelik borunun gerekli şartları sağladığı, X-80 çelik malzeme için ise 12”, 16” ve 20” çelik boruların bu şartları sağladığı görülmektedir. Mühendislik yaklaşımı anlamında en optimum durumun ise X-52

malzemeden üretilmiş 12” çelik boru olduğu, örneğin X-80 malzemeden üretilmiş 20” borunun et kalınlığının ise gerekenden fazla olduğu anlaşılmaktadır. Standartlarda Psi cinsinden minimum akma dayanımına göre ( $\sigma_a$ ) sınıflandırılmış olan (örneğin X-42 için min.  $\sigma_a=42.100$  Psi) çelik boruların minimum akma dayanımları MPa cinsinden Çizelge 4’te verilmektedir.

**Çizelge 4.** Çelik boru malzeme için analizler

Çap	t (mm)	R <sub>Mevcut</sub> (m)	X-52 ( $\sigma_a=290$ Mpa)		X-60 ( $\sigma_a=415$ Mpa)		X-65 ( $\sigma_a=450$ Mpa)		X-70 ( $\sigma_a=485$ Mpa)		X-80 ( $\sigma_a=555$ Mpa)	
			t <sub>hesap</sub> (mm)	Max. R <sub>c</sub> (m)	t <sub>hesap</sub> (mm)	Max. R <sub>c</sub> (m)	t <sub>hesap</sub> (mm)	Max. R <sub>c</sub> (m)	t <sub>hesap</sub> (mm)	Max. R <sub>c</sub> (m)	t <sub>hesap</sub> (mm)	Max. R <sub>c</sub> (m)
4"	4,37	150	17,76	46	14,96	40	13,61	36	12,51	34	10,76	30
6"	4,37	150	10,89	67	9,35	58	8,58	54	7,94	50	6,90	44
8"	4,78	150	8,13	87	7,01	76	6,44	70	5,98	65	5,21	57
12"	5,56	150	5,39	129	4,66	112	4,29	103	3,98	96	3,48	84
16"	6,35	150	4,26	162	3,69	141	3,40	130	3,16	120	2,76	105
20"	7,14	150	3,40	203	2,94	176	2,71	162	2,52	151	2,20	132
24"	7,92	150	2,83	243	2,45	211	2,26	194	2,10	181	1,83	158
28"	9,52	150	2,42	284	2,10	246	1,93	227	1,80	211	1,57	184
30"	11,13	150	2,26	304	1,96	264	1,80	243	1,68	226	1,46	198

#### 4. SONUÇLAR

Gömülü sürekli (birbirine kaynakla birleştirilen) boru hatları imal edilirken yatay veya düşey kurpların dönülmesi gerekliliği ortaya çıkabilmektedir. Bu tür dönüşler dirsekler yardımıyla yapılabileceği gibi çelik boruların kurp yapabilme kapasitesinden de faydalanılabilir. Bu çalışmada ele alınan İstanbul Boğaz geçişinde olduğu gibi dirseklerden her zaman bu anlamda teknik kısıtlılıklar nedeniyle faydalanılması mümkün olmamaktadır. Böyle durumlarda veya boru kaynağının fazla olması nedeniyle ortaya çıkabilecek işçilik ve maliyetlerden, zaman kayıplarından kaçınmak istenildiğinde boruların kurp yapabilme kapasitelerinden yararlanmak gerekmektedir.

Borularda çap arttıkça kurp yapabilme kapasiteleri azalmakta, et (cidar) kalınlığı ve akma dayanımı arttıkça da bu kapasite artmaktadır. Buna göre ihtiyacı karşılayacak derecede mümkün olan en düşük çap, yüksek et kalınlığı olan ve yüksek

akma dayanımına sahip boru malzemesi tercih edilmelidir. Bu çalışmada örnek olarak ele alınan İstanbul Boğaz’ı çelik doğal gaz geçişi proje çalışması çelik boruların düşey kurp yapma kapasitelerinin ele alınması anlamında önemli bir analizdir. Yapılan analizler sonucu, Boğaz geçişi için, mevcut doğal gaz şebekesinde kullanılmakta olan Grade-B çelik malzemeden üretilmiş olan borular yerine en az X-52 çelik malzemeden üretilmiş boruların kullanılması gerektiği tespit edilmiştir. Ayrıca bu örnek çalışma için en optimum boru çapının ise 12” olduğu tespit edilmiştir.

#### 5. KAYNAKLAR

1. Yigit, A., Lav, M.,A, Gedikli, A., 2018. Vulnerability of Natural Gas Pipelines Under Earthquake Effects. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 9(1).
2. O’Rourke, M.J., Liu, X., 1999. Response of Buried Pipelines Subject to Earthquake Effects. Monograph No. 3, Multidisciplinary Center for



- Earthquake Research, University of Buffalo, Buffalo, 249.
3. Yiğit, A., 2021. Embedment Depths of Natural Gas Pipelines. *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, 8(1); 471-480.
  4. İstanbul Gaz Dağıtım A.Ş., 2007. Salacak – Sarayburnu Arası Boğaz Geçiş Hattı Proje Raporu, Proje Çalışmaları, İGDAŞ, İstanbul, Türkiye, 12.
  5. Kennedy, R.P., Chow, A.W., Williamson, R. A., 1977. Fault Movement Effects on Buried Oil Pipeline. *Journal of the Transportation Engineering Division, ASCE*, May, 103, No. TE5, 617-633.
  6. Polenta, V., Garvey, S., Chronopoulos, D., Long, A., Morvan, H., 2015. Effects of Pipe Curvature and Internal Pressure on Stiffness and Buckling Phenomenon of Circular Thin-Walled Pipes. *ICAMME 2015: XIII International Conference on Applied Mechanics and Materials*, February, London.
  7. Ye, S., Ding, H., Wei, S., Ji, J.C., Chen, L., 2021. Non-trivial Equilibriums and Natural Frequencies of A Slightly Curved Pipe Conveying Supercritical Fluid. *Ocean Engineering*, 227(12).
  8. American Society of Civil Engineers (ASCE), 1984. *Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems*, Committee on Gas and Liquid Fuel Lifeline, ASCE, 473.
  9. Trautmann, C.H., O'Rourke, T.D., 1983. Load-Displacement Characteristics of a Buried Pipe Affected by Permanent Earthquake Ground Movements. *Earthquake Behavior and Safety of Oil and Gas Storage Facilities, Buried Pipelines and Equipment*, PVP-77, ASME, New York, June, 254-262.
  10. Hall, W., Newmark, N., 1977. *Seismic Design Criteria for Pipelines and Facilities. Current State of Knowledge of Lifeline Earthquake Engineering*, ASCE, New York, 18-34.
  11. Li, Y., Shuai, J., Jin, Z., Zhao, Y., Xu, K., 2012. Local Buckling Failure Analysis of High-strength Pipelines. *Petroleum Science*, 14, 549-559.
  12. Gresnigt, A.M., Foeken, R.J., 2001. Local Buckling of UOE and Seamless Steel Pipes. *The Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference*, Stavanger, Norway, June.
  13. Mantovano, L., Bravo, R.E., Cravero, S., Cravero, S., Ernst, H.A., 2010. Offshore Installation of Welded Pipe: Local Buckling Evaluation. *8<sup>th</sup> International Pipeline Conference*, Calgary, Alberta, Canada.
  14. Karamanos, S., A., Gresnigt, A., M., 2007. Failure of Locally Buckled Pipelines. *Journal of Pressure Vessel Technology, ASME*, 129(2), 272-279.
  15. Türkel, V., 2012. Doğal Gz Dağıtımında Tasarım, İmalat ve Yönetim. İstanbul: İBB İstanbul Gaz Dağıtım A.Ş. (İGDAŞ) Yayınları, 518.
  16. Yiğit A., 2015. Deprem Etkisi Altındaki Gömülü Sürekli Boru Hatları, Doktora Tezi, I.T.U. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 140.

