



Yumuşak Kil zeminlerde Basıncılı ve Basıncısız Gömülü Çelik Boruların Davranışının Karşılaştırılması

Comparison of the mechanical behavior of the buried steel pipelines in soft clayey soils under pressurized and non-pressurized conditions

Hadi Khanbabazadeh^{1*}

¹ Gebze Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, hk.babazadeh@gtu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9764-7799>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 11 Aralık 2022
Revizyon 31 Aralık 2022
Kabul 6 Mart 2023
Online 23 Mart 2023

Anahtar Kelimeler:

Gömülü Çelik Borular, Zemin-boru etkileşimi, Yanal atımlı fay, Doğrusal olmayan zemin davranışı.

ÖZ

Deprem sonrası can damarı sistemlerinde oluşan hasarlara bağlı ortaya çıkan maddi ve manevi kayıplar toplumun yaşam kalitesini olumsuz etkileyen önemli durumlardan biri olarak bilinir. Deprem kaynaklı fay hareketleri gömülü boru hatları için önemli tehlikelerden biridir. Bu çalışmada, yumuşak kil zeminde gömülü basınçlı ve basınçsız çelik boru hattının doğrusal olmayan sayısal modellenmesi yapılmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, gömülü boru hatlarının uygulamasında yaygın olarak kullanılan X80 çelik sınıfından olan ve tipik çap-kalınlık oranı (D/t) 57,6 olan boru çeşidi ele alınmaktadır. Çalışmada, 90°, 70°, 45° ve 30° olmak üzere dört farklı fay boru hattı kesişme açısı modellenmiştir. Analiz aracı olarak sonlu farklar yöntemini kullanan FLAC3D yazılımı kullanılmıştır. Sayısal modellemelerden elde edilen sonuçlar, kesişme açısının 90° olduğu durumda hem basınçlı hem de basınçsız borularda yerel bükülme sınır durumunun baskın olduğunu göstermektedir. Basınçlı borunun yerel burkulması basınçsız boruya göre yaklaşık %20 daha büyük fay hareketinde meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca, sonuçlar, basınç altına olan boru hattının sınır durumları basınçsız duruma göre daha büyük fay hareketlerinde meydana geldiğini göstermektedir. Fayla 30° açıyla kesişen basınçlı boru %3 sınır durumuna ulaşamamış iken, 70° ve 45° kesişme açılarında fay hareketinde basınçsız boruya göre sırasıyla yaklaşık %8 ve %33 artış meydana geldiği görülmüştür. Sunulan sonuçlar, kalıcı zemin kaynaklı yer değiştirmeye maruz gömülü boru hatlarının performansa dayalı tasarım çerçevesi geliştirilmesinde önemli olacağı düşünülmektedir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 11 December 2022
Received in revised form 31 December 2022
Accepted 6 March 2023
Available online 23 March 2023

Keywords:

Soil-pipe interaction, Buried Steel Pipes, Continuous Pipelines, Fault Crossings, Strick-slip fault, Non-linear soil behavior.

ABSTRACT

Loss of life and property because of Earthquake related damages to the lifelines is considered as one the most important conditions affecting the living quality of the societies. Fault movement during the earthquakes is one of the important hazards for the buried pipelines. In this study, the nonlinear numerical analysis of the pressurized and non-pressurized buried steel pipeline in soft clayey soils is applied. To this end, soil-pipeline interaction behavior of the pipeline with D/t ratio of 57.6 and X80 steel grade is investigated. To study the effect of the fault-pipeline crossing conditions, four different crossing angles including 90°, 70°, 45° and 30° has been considered. The applied nonlinear analyses have been performed by a fully nonlinear analysis method based on an explicit finite difference scheme is performed using FLAC3D code. The results show the dominant failure mode for both pressurized and non-pressurized conditions at crossing angle of 90° is local buckling. There is a 20% increase in the fault movement causing local buckling for pipeline under pressurized condition. While the 3% tensile strain limit has not been reached for non-pressurized pipeline at crossing angle of 30°, there is 8% and 33% increase in the fault movement causing this failure limit at crossing angles of 45° and of 30° respectively for pressurized condition. The presented results will play important role in the development of the design methods of the buried steel pipelines under permanent ground deformation condition.

Doi: 10.24012/dumf.1217395

* Sorumlu Yazar

Giriş

Türkiye dünyanın en aktif deprem kuşaklarından biri olan Alp-Himalaya deprem kuşağı üzerinde yer almakta ve ülke topraklarımızın %90'ı deprem tehlikesi altında bulunmaktadır. Deprem sonrası alt yapılarda oluşan hasarlarla bağlı ortaya çıkan maddi ve manevi kayıplar toplumun yaşam kalitesini olumsuz etkileyen önemli durumlardan biri olarak bilinir. Can damarı sistemleri olarak bilinen enerji hatlarında (doğalgaz, petrol, elektrik, su, yol vb.) meydana gelecek hasarlar depremin doğrudan etkilemediği ancak bu sistemlerin devam ettiği bölgelerde ekonomik ve iş-sürekliliği kayıplarına sebep olacaktır.

Araştırmalar, sürekli petrol ve gaz çelik boru hatlarındaki sismik hasarların çoğunun fay hareketleri, heyelanlar, sıvılaşmaya bağlı yanal yayılma gibi kalıcı zemin deformasyonlarından kaynaklandığını göstermiştir [1]. Bu deformasyonlar boru hattı üzerinde yarı statik bir şekilde uygulanır. Bu tür boru hattı hasarları, 1971 San Fernando depremi ve daha yakın zamanda 1995 Kobe depremi, 1999 Kocaeli depremi ve 1999 Chi-Chi depremi gibi birçok depremde gözlemlenmiştir [2]. Kennedy ve diğ. [3-4] boru hattı ve toprak arasındaki düzgün olmayan sürtünme arayüzüne dayalı bir analitik model geliştirdi. Wang ve Yeh [5], yaptıkları çalışmada ile modellemede kullanılan boru elemanına eğilme rijitliği de ekleyerek uygulanan yöntemi geliştirdi. Vougioukas ve diğ. [6] fayların yatay ve düşey hareketlerini de gözönüne alarak boruları elastik kirişler olarak inceledi. Daha sonra McCaffrey ve O'Rourke [7] ve Desmod ve diğ. [8], San Fernando depreminden sonra su ve gaz borularının performansına dayalı olarak fayla kesişen gömülü boruların davranışını incelemek için bir araştırma yaptı. Wang ve Wang [9] boruyu elastik temel üzerinde bir kiriş olarak ele alırken, Takada ve diğ. [10] fayla kesişen çelik boruların kritik gerilmesini değerlendirmek için yeni bir yöntem kullandı. Lillig ve diğ. [11], boru hattının fay bölgesine yakın olması durumunda fay hareketinin boru hattı tepkisi üzerinde güçlü bir etkiye sahip olabileceğini gösterdiler. Kokavessis ve Anagnostidis [12], toprak-boru etkileşimini incelemek için ara yüzey elemanlarını kullanarak bir sonlu eleman analizi uygulamıştır. Karamitros ve diğ. [13] elastik zemine oturan temek kiriş ve elastisite teorisini birleştirerek analitik bir çözüm yöntemi sundu. Liu ve diğ. [14] kabuk sonlu elemanlar kullanarak aktif faylardan geçen boru hatlarının davranışını inceledi. Ayrıca, Ha ve diğ. [15-16] ve Abdoun ve diğ. [17] doğrultu atımlı fayların gömülü yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) boru hatlarının üzerindeki etkilerinin belirlenmesi için önemli deneysel çalışmalar yaptılar. Çelik boru hattının elastik olmayan malzeme davranışını da hesaba katabilmek amacıyla, Trifonov ve Cherniy [18-19] tarafından fay hareketi altında gömülü boru hatlarının davranışının yarı analitik bir yöntemle incelenmesi sunulmuştur. İleri sayısal yöntemlerle boru hatlarının zeminle etkileşiminin araştırılması günümüzde sıcak araştırma konularından biri olarak devam etmektedir [20-22].

Konu üzerinde literatürde yapılan çalışmaların yanı sıra, fay-boru etkileşiminin daha detaylı şekilde incelenmesi amacıyla, bu çalışmada, gömülü boru hatların uygulamasında yaygın olarak kullanılan X80 çelik sınıfından olan ve tipik çap-kalınlık oranı (D/t) 57,6 olan boru çeşidi ele alınmaktadır.

Elde edilen sonuçlardan, basınçlı ve basınçsız boruların davranışı boru hatlarının performans kriterlerine göre karşılaştırılacaktır. Analiz aracı olarak sonlu farklar yöntemini kullanan FLAC3D yazılım kullanılacaktır. Sayısal sonuçlar, her zemin çeşidi için tipik D/t oranı değerleri ve fay-boru kesişme açılarına göre (30°,45°,70°,90°) belirli performans kriterlerine karşı fay hareketini gösteren diyagramlar şeklinde sunulmaktadır. Sunulan sonuçlar, kalıcı zemin kaynaklı yer değiştirmeye maruz gömülü boru hatlarının performansa dayalı tasarım çerçevesi geliştirilmesinde önemli olacağı düşünülmektedir.

Gömülü çelik boru hatları için sınır durumları

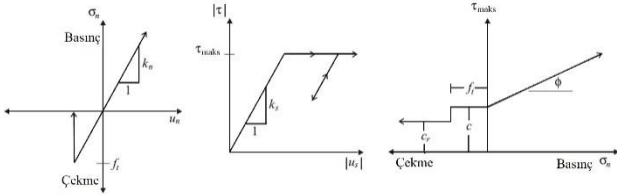
Limit durum tasarım konseptine göre (Limit state design concept) sınır durum koşulu, bir boru hattı sisteminin işlevsel yönlerini olumsuz şekilde etkileyen bir durum olarak tanımlanır. Boru hattı sınır durumlarının genel bir listesi olarak patlama, aksel çekme göçmesi, aşırı eğilme, aşırı titreşim, aşırı korozyon, ovalleşme ve yerel burkulma (local buckling), buruşma, hidrostatik göçme, burkulma ve kontrolsüz çatlak yayılması gibi durumlardan oluşmaktadır [23]. Limit durum tasarım yönteminin geleneksel emniyet gerilmesine göre tasarım yöntemine göre önemli avantajlarından biri boru hattının gerçek davranışı ve güvenliği hakkında daha iyi bilgi sağlamasıdır. Böylece, daha ekonomik bir tasarımın yapılmasını mümkün kılmaktadır. Genel olarak, çekme şekil değiştirmesi borunun yerel burkulmaya maruz kaldığı bölgede basınç şekil değiştirmesine göre daha düşük hızla artar. Ayrıca, limit durumu şekil değiştirmenin odaklanması sürecinin başlangıcı ve nihai burkulmanın oluşması ile de ilişkilendirilebilir. Ek olarak, fay-boru hattının küçük pozitif açılarla kesiştiği durumda, bükülme noktalarında meydana gelen büyük eğilme momenti daha büyük eğilme şekil değiştirmesi ve kesit ovalleşmesine neden olur. Bu durumların göz önüne alındığında, boru hattı için baskın performans sınır durumu, %15 kesit ovalleşmesi [24] ve %3 çekme gerilmesi sınır durumu olarak tanımlanmaktadır [25]. Özellikle daha büyük çap-kalınlık oranına sahip boruların bükülme noktalarında eğilme momentinin daha büyük olması nedeniyle, bu iki sınır durumuna ulaşılır. Boru cidarının yırtılması ve aşırı deformasyonların meydana gelmesi, boru hattının önemli iki hasar modunu teşkil etmektedir.

Model özellikleri ve analiz yöntemi

Deterministik çalışmaların temel amacı, gerçek saha davranışına en yakın sonuçları sunabilmesidir. Bu amaçla, sahadaki koşulların daha ayrıntılı bir şekilde sayısal modele yansıtılması ve kullanılacak analiz yönteminin seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmadaki analizlerde, zeminin büyük şekil değiştirme seviyesinde göstereceği doğrusal olmayan davranışın fay-boru hattının tepkisi üzerinde önemli etkisi olduğundan ve zemin-boru etkileşimini de daha gerçekçi bir şekilde modelleyebilmek için sonlu farklar yöntemi esaslı FLAC3D yazılımı kullanılmaktadır. Zemin davranışı birleşmiş akma kuralı içeren elstoplastik Mohr-Coulomb bünye modeliyle modellenmektedir. Modelleme yönteminin kapasitesini büyük şekil değiştirme seviyesine yükseltmek için, sabit şekil değiştirme oranlı dört yüzlü meş elemanları (constant strain-rate tetrahedra mesh elements) kullanılmaktadır. Yarı uzayın

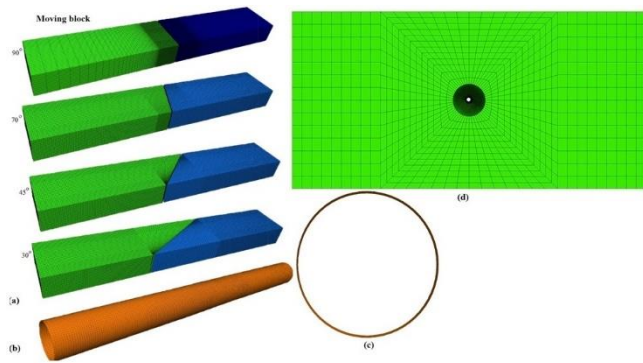
ayrıklaştırılması için birleşmiş ayrıklaştırma (mixed discretization) tekniği uygulanmaktadır.

Bu tekniğin uygulanma amacı birleşmiş ayrıklaştırmayla oluşan meşlere daha fazla hacimsel esnekliğin tanımlanmasıdır. Böylece, özellikle daha büyük kayma şekil değiştirme seviyesinde, daha dikkatli sonuçların elde edilmesi sağlanmaktadır. Yapısal eleman ile zemin arasındaki etkileşimin modellenmesi de önemli faktörlerden biridir. Boru hattının yapısal eleman olarak modellenmesinde Cook ve diğerleri (1989) tarafından tanımlanan DKT-CST (Discrete Kirchhoff Theory-Constant Stress Triangle) kabuk elemanı kullanılmıştır. Bu eleman, düğüm başına beş serbestlik derecesine sahip üç düğümlü, yassı ve ince bir kabuklu sonlu elemandır. Kullanılan yapısal eleman, çevresindeki sürekli ortam ile hem elemanın düzlem dışı yönünde sıkışma/çekme hem de düzlem içi yönünde sürtünme etkileşimini algılayan doğrusal olmayan yayları içerir. Şekil 1'de bir yapısal elemanın ara yüzündeki etkileşim yaylarının düzlem içi ve düzlem dışı yönündeki davranış modeli verilmektedir.



Şekil 1. Yapısal elemanın arayüzünde (a) düzlem dışı ve (b) düzlem içi yönündeki davranış modeli.

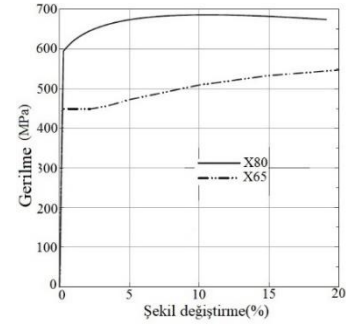
Bu çalışmada incelenen fay-boru hattı modelleri, toplam 60m uzunluğunda, 10m genişliğinde ve 5m yüksekliğinde iki zemin bloğundan oluşmaktadır. Şekil 2'de de gösterildiği gibi, sol blok fayın hareket eden bloğunu temsil etmektedir. Doğrultu atımlı fayın boruyla olan kesişme açısının etkisini araştırmak için boru hattı eksenine göre 30°, 45°, 70° ve 90° olmak üzere dört farklı kesişme açısı dikkate alınmaktadır.



Şekil 2. Fayı farklı açılarda kesen boru hattının sayısal modelleri: a) zemin için boyuna sonlu fark ağı; b) sonlu eleman (boru hattı) ağı c) boru kesiti ve d) zemin için enine kesit sonlu fark ağı.

Ayrıca, doğal gaz ve petrol hatlarının uygulamasında kullanılan tipik çelik sınıfının (API 5L X80) etkisi araştırılmaktadır. İncelenen boruların dış çapı (D) ve boru et kalınlığı (t) sırasıyla 914.4 mm ve 9.525 mm seçilerek, incelenen boru hattının çap kalınlık oranı (D/t) 57,6 olarak alınmıştır. Kullanılan çelik tipinin gerilme-şekil değiştirme

eğrisi Şekil 3'te gösterilmektedir. Boru hattının gömüldüğü zemine göre tepkisini incelemek için, yumuşak kilden oluşan zemin çeşidi kullanılmıştır. Tablo 1'de de, çelik boru hattının gömüldüğü yumuşak kil zeminin geoteknik özellikleri verilmektedir.



Şekil 3. API 5L X80 çelik borunun gerilme-şekil değiştirme davranışı.

Tablo 1. Kullanılan kil zeminin geoteknik özellikleri

Zemin	c (kPa)	φ (°)	V _s (m/s)	G (kPa)	K (kPa)	γ (kN/m ³)	PI (%)
Yumuşak	34-45	10	75-175	10.1e3-61.2e3	26.4e3-159.7e3	18-20	10

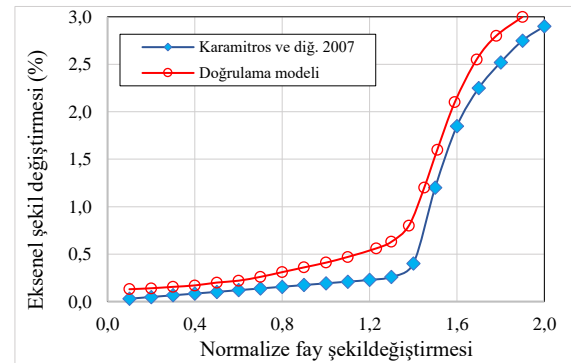
φ: içsel sürtünme açısı; c: kohezyon; V_s: Kayma dalgası hızı; G: kayma modülü; K: balk modülü; γ: birim hacim ağırlığı

Uygulanan sayısal modellemenin doğrulaması için Karamitros ve diğ. (2007) ve Wang ve Yeh(1985) 'in analitik çözümleri kullanılmıştır. Doğrulama modelinde kullanılan çelik ve zemin-boru etkileşimi özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Verifikasyon modelinin kil zemininin özellikleri

API5L-X65 çelik özellikleri		
Akma gerilmesi (σ ₁)	490 Mpa	
Kırılma gerilmesi (σ ₂)	531 Mpa	
Kırılma şekildeğiştirme (ε ₂)	0.040	
Elastisite modülü (E ₁)	210 Gpa	
Akma şekildeğiştirme (ε ₁ = σ ₁ /E ₁)	0.002	
Plastisite modülü (E ₂ =(σ ₂ - σ ₁)/(ε ₂ - ε ₁))	1.088 Gpa	
Zemin-yay özellikleri		
	Akma kuvveti (kN/m)	Akma şekildeğiştirme (mm)
Eksenel (sürtünme) yay	40.5	3.0
Düzlem içi yatay yay	318.6	11.4
Düzlem dışı yay (dışarı yönde)	52.0	2.2
Düzlem dışı yay (içeri yönde)	1360.0	100.0

Bu çalışma kapsamında yapılmış olan doğrulama modelinin sonuçları Karamitros ve diğ. (2007) tarafından yayınlanan sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Wang ve Yeh'in (1985) 45° fay geçiş açısı için analitik tahmini Şekil 4'te sunulmuştur. Sonuçların yakınlığının makul olduğu görülmektedir.

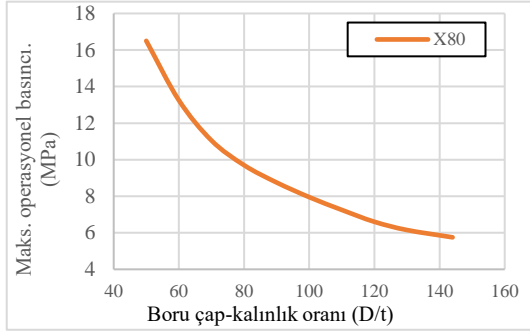


Şekil 4. 45° fay kesişmesi açısı için analiz sonuçlarının karşılaştırılması.

Sonuçlar ve tartışma

Bu bölümde yumuşak kil zeminde gömülü basınçlı ve basınçsız çelik boru hattının doğrusal olmayan sayısal modellemesinden elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Sonuçlar, X80 çelik sınıfından olan ve fay ile 30°, 45°, 70° ve 90° gibi farklı açılarla kesişen boruların yerel burkulma, çekme şekil değiştirmesi ve kesit ovalleşmesi gibi performans sınır kriterlerine karşılık gelen fay yer değiştirmesine göre verilecektir. Boru hatlarının maksimum operasyonel basıncı D/t oranı ve kullanılan çeliğin akma gerilmesine bağlıdır. Maksimum operasyonel basıncı aşağıdaki bağıntıda ve X80 çelik sınıfı için maksimum basıncın D/t oranıyla değişimi Şekil 5'te verilmektedir.

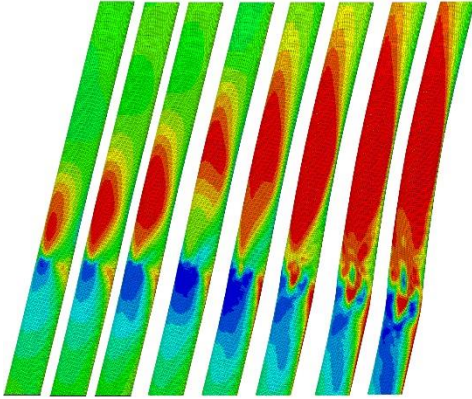
$$p_{max} = 0.72 \times (2\sigma_y t/D) \quad (1)$$



Şekil 5. X80 çelik sınıfı için maksimum basıncın D/t oranıyla değişimi

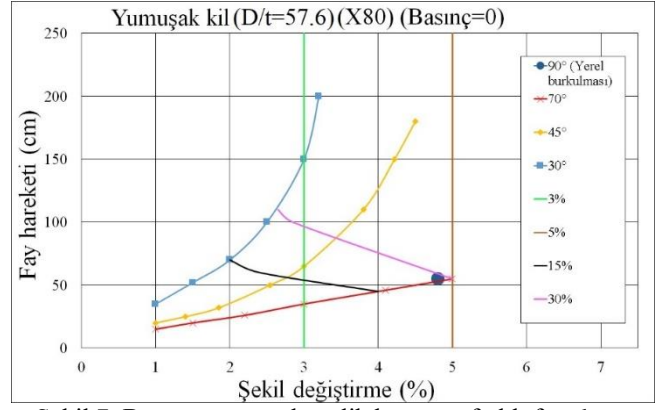
Yumuşak killi zeminde gömülü çelik boru hattının davranışı

Şekil 6'da, borunun kritik zonunda fayın şekil değiştirmesiyle oluşan çekme ve basınç gerilmesinin değişimi verilmektedir. Görüldüğü gibi, çekme gerilmesi fayın hareketsiz bloğunda borunun daha uzun kısmını etkilemektedir.



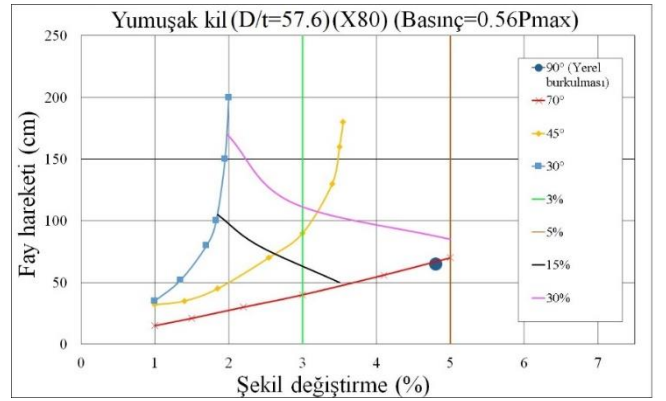
Şekil 6. Borunun kritik zonunda fayın şekil değiştirmesiyle oluşan çekme ve basınç gerilmesinin değişimi (X80, Yumuşak kil, D/t=57,6, basınç=0).

Şekil 7'de, yumuşak kil zeminde gömülü basınçsız D/t oranı 57,6 ve X80 sınıfından olan çelik boru hattının farklı kesişme açılarda gösterdiği davranışı verilmektedir.



Şekil 7. Basınçsız gömülü çelik borunun farklı fay- boru kesişme açılarında performans sınırları (X80 boru, Yumuşak kil, D/t=57,6, sıfır basınç).

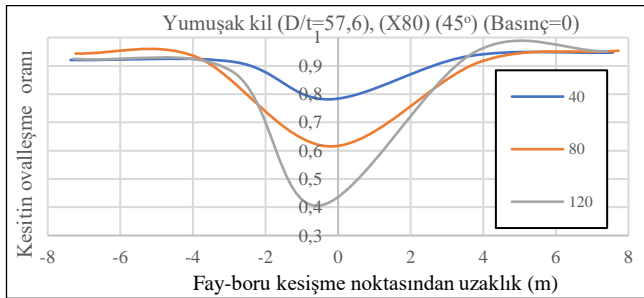
Kesişme açısının 90° olduğu durumda, borunun sadece bir tarafında sınırlı bölgede meydana gelen büzüşmeden dolayı yerel bükülme sınır durumunun baskın olduğu görülmektedir. Sonuçlar bu durum için yerel burkulmanın fayın 55 cm hareket ettiğinde gerçekleştiğini göstermektedir. Fay ve boru hattının kesişme açısı azaldığında, boruların %3 ve %5 çekme gerilmesi ve %15 ile %30 kesit ovalleşme performans sınırlarına ulaşmak için gerekli fay hareketinde artış meydana gelmektedir. Görüldüğü gibi, fay-boru kesişme açısı 70° olan borunun %3 ve %5 çekme şekil değiştirmesi sırasıyla yaklaşık 40 cm ve 55 cm'lik fay hareketinde ulaşmış iken, kesişme açısı 45° olan boru hattı %3 sınır koşuluna 65 cm'de ulaşmaktadır. Bu durum için, %5 sınır koşuluna varılmamaktadır. Ancak, kesişme açısı 45° olan boru hattında %5 çekme şekil değiştirmesine gelmeden önce %30 kesit ovalleşme sınır performansı aşıldığından, bu durum için baskın sınır durumu kesit ovalleşmesi olmaktadır. Kesişme açısı 30° olan boru hattına bakıldığında, %3 çekme şekil değiştirme sınır durumuna varmadan yaklaşık 115 cm'lik bir fay hareketinde %30 ovalleşme sınır durumu aşılmaktadır.



Şekil 8. Basınçlı gömülü çelik borunun farklı fay- boru kesişme açılarında performans sınırları (X80, Yumuşak kil, D/t=57,6, Basınç=0,56 Pmaks).

Şekil 8'de, basınçlı gömülü çelik borunun farklı fay boru kesişme açılarında performans sınırlarına karşılık fay hareketleri verilmektedir. Bu çalışmada, basınçlı ve basınçsız boruların davranışının karşılaştırılması amacıyla doğal gaz ve petrol aktarma operasyonunda uygulanan tipik basınç değerlerinden olan 0,56Pmaks basıncın boru hattının davranışına etkisi incelenmektedir. Şekilde görüldüğü gibi,

basıncılı durumda fay ve boru hattının 90° açıyla kesiştiğinde, yerel burkulma 65 cm'lik bir fay hareketinde meydana gelmektedir. Bu da, yerel burkulmanın baskın olduğu durumlarda borunun iç basıncının davranış üzerinde 10 cm'lik bir artışla etkisinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Daha önce basınçsız boru hattında da görüldüğü gibi, fay ve boru hattının kesişme açısı azaldığında, boruların performans sınırlarına ulaşmak için gerekli fay hareketinde artış meydana gelmektedir. Sonuçlar, 90° den farklı açılarda, basınçlı boruların sınır durumlarının basınçsız duruma göre daha da iyileştğini göstermektedir. Örneğin, fayla 70° açıyla kesişen basınçsız borunun %5 çekme şekil değiştirmesi yaklaşık 55m cm'lik bir fay hareketinde gerçekleşmişken, bu değer basınçlı boru için yaklaşık 71cm'de meydana gelmektedir. Kesişme açısı 45° ve 30° olan boruların basınçlı durumdaki tepki eğrileri basınçsız duruma göre farklılıklar göstermektedir. Bu da, basınçlı borunun fay hareketine maruz iken meydana gelen dengesizlikten kaynaklanmış olabilir. 45° kesişme açısında, basınçsız boruda sırasıyla yaklaşık 65 cm ve 80 cm fay hareketiyle %3 çekme şekil değiştirmesi ve %30 kesit ovalleşmesi sınır durumuna ulaşmış iken, basınçlı boruda sırasıyla 90 cm ve 110 cm'de ulaşılmaktadır. 30° kesişme açısına bakıldığında, basınçsız durum için %3 kesme şekil değiştirme sınır durumu 150 cm de ulaşmış iken, basınçsız boruda bu sınır durumuna ulaşılmamaktadır. Ancak, %30 kesit ovalleşmesi sınır durumu basınçlı boruda basınçsız boruya göre 110 cm'den 165cm'ye yükselmiştir.

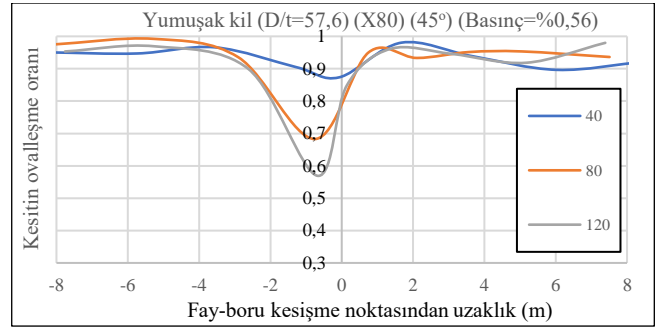


Şekil 9. Boru-fay kesişme bölgesinde (X80, Yumuşak kil, 45°, D/t=57,6, basınç sıfır) uzaklıkta farklı fay hareketleri için çap bozulma oranı.

Boru hattının fay ile kesiştiği durumlarda önemli konulardan biri de borunun fayla kesiştiği bölgede etkilendiği uzunluktur. Şekil 9'de yumuşak kil zeminde basınçsız D/t=57,6 ve X80 sınıfından olan çelik borunun fayla 45° açıyla kesiştiği durum için farklı fay şekil değiştirmesinde etkilendiği uzunluk verilmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi, düşük fay şekil değiştirmesinde önce borunun fayın hareketli tarafında olan kısmı etkilenmeye başlar. Fay şekil değiştirmesinin artmasıyla borunun etkilenen uzunluğu artıyor ve şekilde incelenen durum için fayın hareketli tarafında (Şekil 9'in sol tarafı) yaklaşık 4 m ve fayın sabit tarafında 6 m'ye (toplamda 10 m) ulaşmaktadır. Ancak, borunun etkilendiği en kritik bölgesi fayın hareketli tarafından yaklaşık 4m uzunluğunda bir mesafede meydana geldiği görülmektedir.

Şekil 10'da maksimum operasyonel basıncının %56 seviyesinde çalışan borunun farklı fay hareketinde etkilenen uzunluğunu vermektedir. Görüldüğü gibi, basınç etkisi altında olan boru hattını tepkisi, fayın hareketli tarafında

(Şekil 10'un sol tarafı) yaklaşık 4 m'ye ve fayın sabit tarafında 8 m'ye (toplamda 12 m) ulaşmaktadır.



Şekil 10. Boru-fay kesişmesinin (X80, Yumuşak kil, 45°, D/t=57,6, basınç Pmaks'ın %56'sı) farklı fay hareketleri için çap bozulma oranı.

Sonuç

Doğalgaz ve altyapı sistemlerinde depremden ve deprem sonrası ikincil afetlerden dolayı olabilecek hasarlar ülkelerin ekonomik ve iş-sürekliliği açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmanın amacı fay-boru hattının kesişme açısının yumuşak kil zeminlerde gömülü çelik borularının davranışına etkisinin araştırılması olduğundan, tipik petrol ve doğal gaz uygulamalarında kullanılan D/t oranı 57,6 olan X80 çelik sınıfından oluşan boruların basınçlı ve basınçsız durumdaki davranışlarının sayısal modellenmesinden elde edilen sonuçların karşılaştırılmasıdır. Çalışmada, 90°, 70°, 45° ve 30° olmak üzere dört farklı fay boru hattı kesişme açısı modellenmiştir.

Sonuçlar, kesişme açısının 90° olduğu durumla şekil değiştirmenin sınırlı bölgede meydana geldiğini ve o bölgede büzüşmenin oluştuğunu göstermektedir. Kesişme açısının 90° olduğu durumda hem basınçlı hem de basınçsız borularda yerel bükülme sınır durumunun baskın olduğu görülmektedir. Ancak, basınçlı borunun yerel burkulması basınçsız boruya göre yaklaşık %20 daha büyük fay hareketinde meydana gelmektedir. Fay ve boru hattının kesişme açısı azaldığında, boruların %3 ve %5 çekme gerilmesi ve %15 ile %30 kesit ovalleşme performans sınırlarına ulaşmak için gerekli fay hareketinde artış meydana gelmektedir. Örneğin, basınçsız boru hattı için %3 çekme şekil değiştirmesi sınır durumu 70°, 45° ve 30° kesişme açıları için sırasıyla 40 cm, 60 cm ve 150 cm fay hareketinde meydana gelmiştir. Kesişme açısının azalmasının %15 ve %30 kesit ovalleşmesi sınır durumları üzerinde de benzer etkisinin olduğu görülmüştür. Sonuçlar, basınç altına olan boru hattının sınır durumları basınçsız duruma göre daha büyük fay hareketlerinde meydana geldiğini göstermektedir. Örneğin, basınç altında olan borunun %3 çekme şekil değiştirmesi sınır durumu için 70° ve 45° kesişme açıları fay hareketinde basınçsız boruya göre sırasıyla yaklaşık %8 ve %33 artış meydana gelmektedir. Basınçlı borunun fayla 30° açıyla kesiştiğinde ise, çekme şekil değiştirmesi sınır durumlarına ulaşılmamaktadır. Ayrıca, bu çalışmada borunun fayla kesiştiği bölgede etkilendiği uzunluğu da incelenmiştir. Borunun fayla 45° açıyla kesiştiği durumda etkilendiği uzunluğu basınçsız durumda 10 m'den basınçlı durumda 12 m'ye çıkmaktadır.

Kaynaklar

- [1] Vazouras P, Karamanos SA. Structural behavior of buried pipe bends and their effect on pipeline response in fault crossing areas. *Bull Earthq Eng* 2017; 15:4999–5024. doi:10.1007/s10518-017-0148-0.
- [2] Takada S, Nakayama M, Ueno J, Tajima C. Report on Taiwan Earthquake. RCUSS, Earthquake Laboratory of Kobe University, 1999. p. 2–9.
- [3] Kennedy RP, Chow AW, Williamson RA. Fault movement effects on buried oil pipeline. *Journal of Transportation Engineering, ASCE* 1977;103:617–33.
- [4] Kennedy RP, Kincaid RH. Fault crossing design for buried gas oil pipelines. In: *Proceedings of the ASME, PVP conference*, vol. 77; 1983. p. 1–9.
- [5] Wang LRL, Yeh YA. A refined seismic analysis and design of buried pipeline for fault movement. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 1985;13:75–96.
- [6] Vougioukas EA, Theodossis C, Carydis PG. Seismic analysis of buried pipelines subjected to vertical fault movement. *Journal of Technical Councils, ASCE* 1979;105(TCI):432–41.
- [7] MaCaffrey MA, O'Rourke TD. Buried pipeline response to reverse faulting during the 1971 San Fernando Earthquake. In: *Proceedings of the ASME, PVP conference*, vol. 77; 1983. p. 151–9.
- [8] Desmond TP, Power MS, Taylor CL, Lau RW. Behavior of large-diameter pipeline at fault crossings. *ASCE, TCLEE* 1995;1995(6):296–303.
- [9] Wang LLR, Wang LJ. Parametric study of buried pipelines due to large fault movement. *ASCE, TCLEE* 1995;1995(6):152–9.
- [10] Takada S, Hassani N, Fukuda K. A new proposal for simplified design of buried steel pipes crossing active faults. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2001;2001(30):1243–57.
- [11] Lillig DB, Newbury BD, Altstadt SA. The second ISOPE strain-based design symposium—a review. In: *Proceedings of the international society of offshore & polar engineering conference*, Osaka, Japan; 2009.
- [12] Kokavessis NK, Anagnostidis GS. Finite element modelling of buried pipelines subjected to seismic loads: soil structure interaction using contact elements. In: *Proceedings of ASME PVP conference*, Vancouver, BC, Canada; 2006.
- [13] Karamitros DK, Bouckovalas GD, Kouretzis GP. Stress analysis of buried steel pipelines at strike-slip fault crossings. *Soil Dyn Earthq Eng* 2007;27:200–11.
- [14] Liu M, Wang Y-Y, Yu Z. Response of pipelines under fault crossing. In: *Proceedings of the international offshore and polar engineering conference*, Vancouver, BC, Canada; 2008.
- [15] Ha D, Abdoun TH, O'Rourke MJ, Symans MD, O'Rourke TD, Palmer MC, et al. Buried high-density polyethylene pipelines subjected to normal and strike-slip faulting—a centrifuge investigation. *Canadian Geotechnical Journal* 2008;45: 1733–42.
- [16] Ha D, Abdoun TH, O'Rourke MJ, Symans MD, O'Rourke TD, Palmer MC, et al. Centrifuge modeling of earthquake effects on buried high-density polyethylene (HDPE) pipelines crossing fault zones. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 2008;134(10):1501–15.
- [17] Abdoun TH, Ha D, O'Rourke MJ, Symans MD, O'Rourke TD, Palmer MC, et al. Factors influencing the behavior of buried pipelines subjected to earthquake faulting. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2009;29:415–27.
- [18] Trifonov OV, Cherniy VP. A semi-analytical approach to a nonlinear stress–strain analysis of buried steel pipelines crossing active faults. *Soil Dyn Earthq Eng* 2010;30:1298–308.
- [19] Trifonov OV, Cherniy VP. Elastoplastic stress–strain analysis of buried steel pipelines subjected to fault displacements with account for service loads. *Soil Dyn Earthq Eng* 2012;33(1):54–62.
- [20] Morshed A, Roy K, and Hawlader B. Modeling of buried pipelines in dense sand for oblique movement in vertical - lateral plane. *J Pipeline Sys Eng and Practice* 2020; 11(4):04020050.
- [21] Dey S, Chakraborty S, Tesfamariam S. Structural performance of buried pipeline undergoing strike-slip fault rupture in 3D using a non-linear sand model. *Soil Dyn Earthq Eng.* 2020; 135: 106180. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106180>.
- [22] Melissianos V, Vamvatsikos D, Gantes C. Methodology for failure mode prediction of onshore buried steel pipelines subjected to reverse fault rupture. *Soil Dyn Earthq Eng.* 2020; 135:101-116.
- [23] Polynikis Vazouras , Spyros A. Karamanos , Panos Dakoulas. Mechanical behavior of buried steel pipes crossing active strike-slip faults. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Volume 41, October 2012, Pages 164-180.
- [24] Gresnigt AM, Karamanos SA. Local buckling strength and deformation capacity of pipes. In: *Proceedings of the 19th international offshore and polar engineering conference*. Osaka, Japan; 2009. p. 212–23.
- [25] Canadian Standard Association. Oil and gas pipeline systems, CSA-Z662. Mississauga, Ontario, Canada; 2007.