SAÜ Fen Bil Der 20. Cilt, 3. Sayı, s. 451-462, 2016

# Doğalgaz boru hatlarında dalga bariyeri olarak yapay kaya dolgusunun dalga yayılışına etkisi

Fatih Göktepe[1*], Hüseyin Serdar Küyük[2], Erkan Çelebi[3]

*31.05.2016 Geliş/Received, 25.06.2016 Kabul/Accepted*

doi: 10.16984/saufenbilder.67415

**ÖZ**

Depremler yeryüzünün büyük bir kesimini etkileyerek mühendislik yapılarına ciddi hasarlar vermekte ve önemli ekonomik kayıplara yol açmaktadır. Bu yüzden, deprem etkisi altındaki boru hatlarının dayanımı ve güvenliği hayati öneme sahiptir. Zemin titreşimlerinin yayılma alanında ve korunacak yapı çevresinde azaltmak için yatay konumlandırılmış dalga bariyer uygulamaları inşaat mühendisliği çözümleri arasında yer almaktadır. Bu çalışmada yapı-zemin etkileşimi de dikkate alınarak 1999 Kocaeli depreminden kaynaklanan titreşim etkilerinin azaltılması için zeminin radyasyon sönümünü ifade eden enerji yutucu sınırları ve doğrusal olmayan malzeme özelliklerini de içeren bir nümerik model geliştirilmiştir. Geliştirilen bu model yardımıyla dalga bariyer sisteminde farklı kontrol parametrelerinin yalıtım etkisi kapsamlı parametrik çalışmalar yapılarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar dalga engelleyici yapay kaya dolgusunun titreşim etkilerinin azaltılmasında %70 mertebesinde etkili olduğunu ve bu tür problemler çözüm olarak gelecekte uygulanabileceğini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Dinamik analiz, doğalgaz boru hattı, dalga yayılımı, elasto-plastik davranış modeli

# Effect of artificial rock as a wave impeding barrier for wave propagation in pipeline

**ABSTRACT**

Earthquakes have destructive influences onto lifeline engineering and especially leading to considerable economic loss to the underground structure. Underground structures are significant unit of lifeline engineering. . Applying horizontal wave barriers is used in civil engineering as an alternative solution to reduce the soil vibrations in the wave propagation region and surrounding of the structures to be protected. In this study, discrete computer model including non-linear soil conditions as well as radiation damping is improved for testing corresponding wave propagation of earthquake vibrations in the soil under 1999 Kocaeli earthquake strong ground motion and mitigation of buried pipeline responses. Extensive parametric investigations by using the developed numerical model for isolation systems have been executed to conceive the influence of different controlling parameters on the screening efficiency. Results indicated that WIB are very promising as a cut off frequency isolators by reduction of 70% and a promising candidate for future application in the field.

**Keywords**: Dynamic analysis, pipeline, wave propagation, elasto-plastic constitutive model

[*] Sorumlu Yazar / Corresponding Author
1 Bartın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bartın - fgoktepe@bartin.edu.tr
2 Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya - skuyuk@sakarya.edu.tr
3 Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya - ecelebi@sakarya.edu.tr

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yerkabuğunun bir titreşimi olan depremler zamana bağlı bir yer değiştirme hareketi meydana getirerek altyapı mühendisliğinin önemli bir birimi olan boru hattı sistemlerinde, özelliklede petrol ve doğalgaz boru hatlarında dinamik bir etki oluşturmaktadır. Bununla birlikte, aktif tektonik bölgelerde oluşan kuvvetli yer hareketi süresince meydana gelen aşırı dinamik yüklemeler altyapı sistemlerinde büyük deformasyon ve gerilmelere sebep olmaktadır.

Son on yılda yüzeysel gömülü boru hatları, ham benzin, doğalgaz, telekomünikasyon ve su temini uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğer taraftan, Güney Kafkasya ile Türkiye'nin doğusu arasındaki enerji koridoru anahtar rolündeki çok sayıda boru hattından oluşmaktadır. Bu boru hatlarındaki ham benzin ile doğalgaz Azerbaycan'dan Gürcistan yoluyla Türkiye'ye ve tüm dünya pazarına dağılmaktadır. Bu boru hattı projesinin en önemli iki tanesi Bakü-Tiflis-Ceyhan ham benzin boru hattı ve Bakü-Tiflis-Erzurum doğalgaz boru hatlarıdır. Bu boru hatlarının inşasındaki çoğu proje tamamlanmış ve bir kısmının da yapımı halen devam etmektedir.

Geçmiş depremlerden elde edilen tecrübeye göre, depremin oluşturmuş olduğu cisim ve yüzey dalgalarının yumuşak zemin ortamında yayılması ile oluşan kuvvetli zemin hareketleri zemin içersinde bulunan boru hatlarında önemli derecede hasarlara sebep olmaktadır [1, 2]. Depremlerin vermiş olduğu zararlar sadece boru hattının yapısıyla sınırlı kalmayıp aynı zamanda çok büyük artçı ekonomik kayıplara da yol açmaktadır [3]. Sonuç olarak, depremlerin oluşturmuş olduğu hasarlar, altyapı mühendisliğinin önemli bir birimi olan boru hattı sistemlerinde ve özelliklede petrol ve doğalgaz boru hatlarında önem arz etmektedir [4, 5]. Deprem etkisi altındaki boru hatlarının dayanımı ve güvenliği konusundaki tasarımların birçok ülkede hayati öneme sahip olduğu, araştırmacılar [6-18] tarafından yapılan birçok çalışmada gösterilmiştir.

Zeminlerde dalga yayılımı genellikle titreşim kaynağından yayılan dalgaların zemin ortamında kırılması ve yansıması yoluyla olur. Trafik yükleri, makine temelleri, inşaat aktiviteleri, patlamalar ve deprem gibi titreşim kaynaklarının oluşturduğu yıkıcı etkiler daha çok yüzey dalgaları (Rayleigh dalgası) yoluyla zemin ortamında ilerlemekte, üstyapı ve altyapılarda olumsuz etkiler ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle çevreyi titreşim kaynaklarının ürettiği kuvvetli yer hareketlerinden korumak ihtiyacı ve en uygun yalıtım aracının bulunması için dalga yayılım probleminin iyi anlaşılması gerekmektedir.

Literatürde yüksek frekans içeriğine sahip titreşim kaynaklarının oluşturduğu titreşimlerin oluşum mekanizmasının ve bunların yumuşak zemin koşullarında yayılma özelliklerinin incelenmesi ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Bu alandaki ilk çalışmalar, Pao ve Mow tarafından basit geometri ve idealleştirilmiş koşullarla kısıtlanmış mekanik modellerde kullanılan teorik yaklaşımlarla düzlemsel basınç dalgalarının bir engel karşısındaki saçılma davranışı incelenerek başlatılmıştır [19]. İmpuls yük kaynağının yayılma alanında meydana getirdiği titreşim etkilerinin azaltılması amacıyla geliştirilen bariyerlerin sonlu farklar formülasyonlarına dayalı çözümleri araştırmacılar [20, 21] tarafından ortaya konmuştur.

Zeminlerdeki dalga yayılım problemleriyle ilgili analitik tabanlı çalışmalar, yirminci yüzyılın başlarında bilgisayar teknolojisine bağlı sayısal çözüm yöntemlerinin gelişmesiyle ortaya çıkmıştır [22-24]. Titreşim problemlerinin yaşandığı yumuşak zeminlerde, düşey [25-30] ve yatay konumlandırılmış dalga bariyer uygulamalarının [31-37] yalıtım performanslarıyla ilgili literatürde önemli sayıda teorik çalışma mevcuttur.

Ahmad ve Al-Hussaini, çevreye yayılan yüksek frekanslı titreşim dalgalarının basit bariyer uygulamaları ile soğurulmasını amaçlayan parametrik çalışmalarını sınır elemanlar yöntemini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Yalıtım performansını bariyerin malzeme ve geometrik özelliklerine bağlı inceleyerek ampirik formüller geliştirmişlerdir [38]. Klein vd., harmonik dış yükün frekans içeriğini ve farklı zemin özelliklerini dikkate alarak Rayleigh tipi yüzeysel dalgaların yayılma biçimini bariyerin yerleşimine bağlı inceleyerek analizlerini gerçekleştirmişlerdir [39]. Forchap ve Verbic, titreşim etkilerinin yayılma alanında azaltılması için arazi deneyleri yaparak zemin içerisinde ana kaya özelliğini taşıyan bir yapay kaya dolgusu modeli önermişlerdir. Çalışmalarında, rijit tabanlı tek tabakalı zemin ortamının temel frekansının dış yükün frekans değerlerinden küçük olması durumunda dalga yayılışının gerçekleşmediğini göstermişlerdir [40]. Adam ve Chouw, sonlu elemanlar ve sınır elemanlar yöntemlerini birlikte kullanarak geliştirdikleri melez nümerik model üzerinde dış yük olarak trafik yükünü darbe yüküne benzeştirmişler ve titreşimlerin azaltılması için yapay kaya dolgusu önermişlerdir. Araştırma kapsamında yatay dalga bariyerinin yerleştirileceği kritik derinlik, Rayleigh yüzey dalga boyuna bağlı elde edilen farklı tabaka yükseklikleri ile elastik yarı uzay çözümleri karşılaştırılarak tespit edilmeye çalışılmış ve rezonans etkisi araştırılmıştır [41]. Saikia, harmonik yüzey dalgalarının yalıtımı için ikili düzenekte yerleştirilen yumuşak dolgu malzemeli düşey bariyerlerin dalga yayılımına etkisini aksi simetrik sonlu eleman modeli kullanarak incelemiştir [42].

Bu çalışmada, zeminin doğrusal olmayan davranışının ve sonsuzluğunun uygun bir şekilde tanımlandığı sayısal model kullanılarak, doğalgaz boru hatlarında Kocaeli depreminden kaynaklanan titreşim etkilerinin azaltılması için geliştirilen yapay kaya dolgusu modelinin yalıtım performansı ilk aşamada bariyerin kalınlığına bağlı irdelenmiştir. Dalga bariyer modelinin analizlerde öngörülen optimum kesit boyutları belirlendikten sonra, doğalgaz boru hattı alt dolgusu ile yalıtım aracı arasındaki farklı dolgu yükseklikleri kullanılarak yapay kaya dolgusu modelinin etkinliği kapsamlı parametrik analizler yürütülerek araştırılmıştır.

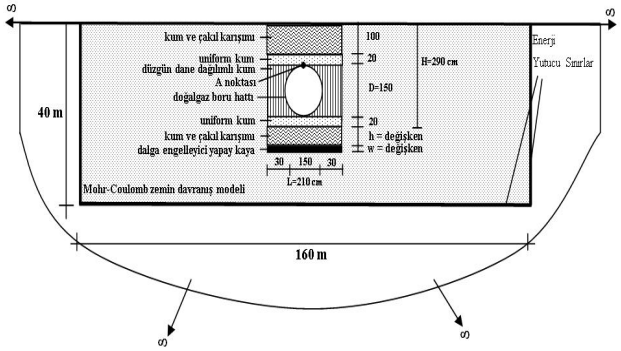
## 2. SAYISAL MODEL (NUMERICAL MODEL)

Sonsuz zemin bölgesinin ayrıklaştırılmasında çözüm yöntemi olarak düzlem şekil değiştirme problemi için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Problemin çözümünde kullanılacak bilgisayar programı malzeme sönümü ile birlikte geometrik sönümü de dikkate alabilecek düzeyde olmalıdır. Oluşturulan matematik modelde, titreşim kaynağından yayılan dalgaların sınırlardan geri gelerek korunması düşünülen yapılarda olumsuz etki oluşturmasının önlenmesi bu tür problemlerde çok önemli olmaktadır. Bu çalışmada, dinamik sınır şartlarının ve malzeme davranışının uygun bir şekilde tanımlanabildiği sonlu elemanlara dayalı Plaxis 2D dinamik modülü [43] bilgisayar programı tercih edilmiştir.

Şekil 1'de yapay kaya dolgusu için analizlerde kullanılan sayısal model gösterilmiştir. Titreşim kaynağından gelen ve elasto-plastik zemin ortamında yayılan dalgaların genliğini azaltmak için korunacak yapının altına bir yapay kaya dolgu modeli önerilmiştir. Sayısal hesaplarda dikkate alınan doğalgaz borusunun konumlandırıldığı derinlik, üst ve alt dolgu yükseklikleri yazarların [11, 12, 16] daha önceki analitik çalışmalarına dayalı belirlenmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında dalga bariyer modelinin farklı kalınlıklara sahip olması durumunda gösterdiği yalıtım etkisi dikkate alınarak kesit boyutlarına karar verilmiştir. Sonraki aşamada ise, optimum kesit boyutlarına sahip yapay kaya dolgusu ile doğalgaz borusunun konumlandığı alt dolgu (20cm'lik üniform kum tabakası) arasındaki kum ve çakıl karışımlarından oluşan farklı dolgu yüksekliklerine bağlı yapay kaya dolgusu modelinin etkinliği araştırılmıştır. Sonlu eleman analizlerinde gözlem noktası olarak doğalgaz borusunun tepe noktası (A noktası) seçilmiştir.

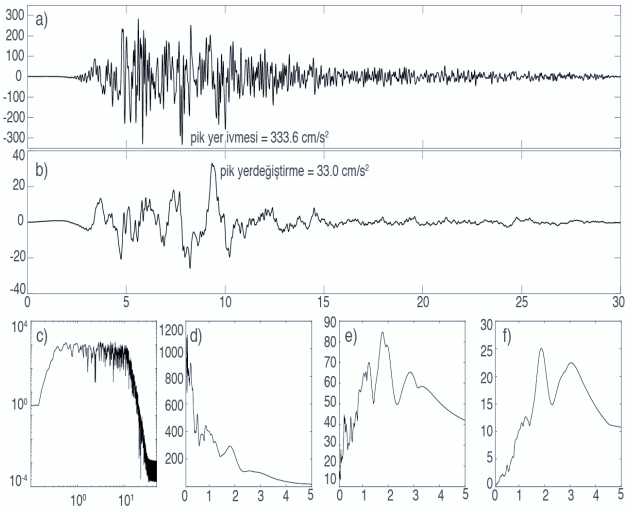
### 2.1. Dinamik Yük Kaynağı (Dynamic Load Source)

Dinamik yük hareketinin doğalgaz boru hattında meydana getirdiği dinamik etkilerin gerçeğe yakın incelenmesi geliştirilen modele etkiyen deprem hareketinin doğru tanımlanmasına bağlıdır.




Şekil 1. Dalga engelleyici yapay kaya dolgusu yardımıyla titreşim etkilerinin azaltılması (Artificial bedrock model for vibration reduction)

Bu çalışmada, en büyük yer ivmesi 333.60 cm/s$^2$ olan 17/08/1999 Kocaeli deprem Sakaya kaydı kullanılmıştır (Şekil 2a). İvmeler Sakarya baseninin 10 km'lik mesafesinde kaydedilmiş olup, bu deprem yüksek frekans içeriğine sahip yakın saha depremi olarak bilinmektedir. Depremin Fourier spektrumundaki etkin frekans aralığı 0.5 ile 10 Hz aralığındadır (Şekil 2c). İncelenen kayda ait spektral ivme, hız ve yerdeğiştirme grafikleri Şekil 2 d-e-f'de sırasıyla verilmiştir.




Şekil 2. 17/08/1999 Kocaeli depremine ait a) ivme kaydı b) yerdeğiştirme zaman kaydı c) Fourier spektrum d)spektral ivme e) spektral hız f) spektral yerdeğiştirme (17/08/1999 Kocaeli Earthquake a) acceleration record b) displacement record c) Fourier Spectrum d) spectral acceleration e) spectral velocity f) spectral displacement)

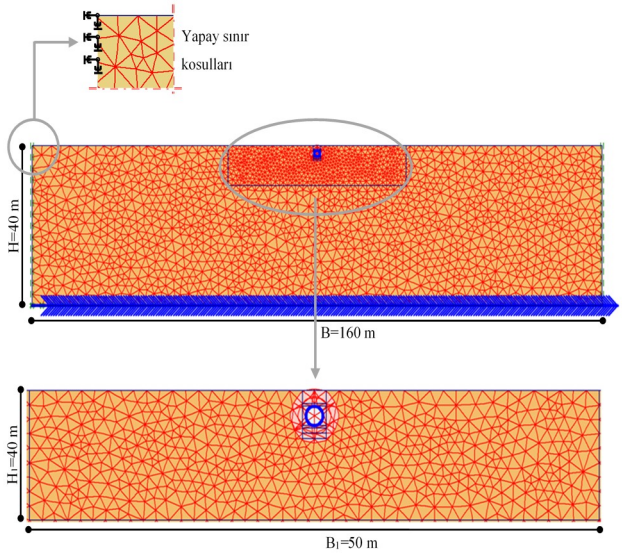
### 2.2. Sonlu Eleman Modeli (Finite Element Model)

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) çözüm yaklaşımında, sürekli bir ortam sonlu elemanlara bölünür ve oluşturulan her bir eleman için ayrı ayrı denklemler yazılır. Elde edilen doğrusal diferansiyel denklem takımları yardımıyla, seçilen birincil bilinmeyenler (yerdeğiştirme) ile bunlara bağımlı ikincil

bilinmeyenlerin (gerilme, şekil değiştirme) birlikte ele alınması sonucu sonlu eleman formülasyonları geliştirilmektedir.

Bu çalışmada, deprem etkisi altında değerlendirilen altyapı-zemin ortak sisteminin zaman bölgesindeki çözümü için, sonlu elemanlar yöntemine dayanan Plaxis 2D dinamik modülü [43] bilgisayar programı kullanılmıştır. Dalga yalıtım bariyerinin performansını değerlendirebilmek için geliştirilen sonlu eleman modeli Şekil 3'de gösterilmiştir.

Geoteknik mühendisliği problemlerinde yerdeğiştirme ve taşıma gücü analizleri için özel olarak geliştirilen sonlu eleman yazılımı kullanılarak yapılan nümerik çözümlemelerin gerçekçi ve güvenilir olması bakımından 15 düğüm noktalı elemanların seçimi daha uygundur. Fakat bu şekilde tercih edilen eleman seçimi, 3 gerilme noktasına sahip 6 nodlu eleman tipine göre, analiz süresi açısından çok daha fazla zaman almaktadır [43]. Bu çalışmada, zemin bölgesinin ayrıklaştırılması işlemi için, 15 düğüm noktalı üçgen elemanlar kullanılmış ve her bir düğüm noktasında düzlemin farklı doğrultuları için iki ötelenme serbestlik derecesi ($u_x$ ve $u_y$) bilinmeyen olarak tanımlanmıştır (Şekil 3).




Şekil 3. Altyapı-zemin etkileşim problemi için önerilen sonlu eleman modeli (Schematic diagram of FE model developed for soil-infrastructure interaction problem)

### 2.2.1. Sonlu Eleman Analizinde Sayısal Doğruluk (Numerical Accuracy of Finite Element Analysis)

Yapısal modeli iyi derecelendirilmiş sonlu eleman ağ yapısı ile analiz etmek için, hesaplanması istenen büyüklüğün hesaplama alanı içindeki değişimini yansıtacak kadar iyi seçilmiş uygun boyutlu elemanlarla ve deplasman fonksiyonlarıyla kullanılması gerekmektedir. Geliştirilen yapısal modeli istenilen doğruluk düzeyinde modelleyebilmek, gerekli sayı ve tipteki elemana karar vermek, uygun şekil fonksiyonlarını seçmek ve doğru sınır şartlarını belirlemek için ise problemin fiziğinin ve yükleme durumunun iyi bilinmesi gerekmektedir. Sonsuza uzanan bölgelerin modellenmesinde kullanılacak olan eleman boyutları, dinamik yük kaynağının oluşturduğu dalga boyu ($\lambda$) yardımıyla denetlenmektedir.

Birçok araştırmacı farklı açısal frekanslarda sayısal modele yüklenen dalga boylarının ortamdaki şekil değiştirme biçimini yeterli yaklaşıklık düzeyinde idealize edebilmek için sonlu eleman boyutunun dikkatlice seçilmesi gerektiğini vurgulamıştır. Sayısal modelde sonuçların tutarlılığı ve doğruluk düzeyi açısından, kullanılan eleman büyüklüğünün ($\Delta h$) maksimum değeri ortamdaki minimum dalga boyuna ($\lambda$) bağlı olarak belirlenmektedir [44, 45].

$$\Delta h \leq \frac{\lambda_{min}}{k} = \frac{v_j}{k f_{maks}} \quad (1)$$

Formülasyondaki k çarpanı sonlu eleman tipi ile şekil fonksiyonuna bağlı olarak farklı değerler almaktadır ($5 \leq k \leq 10$). Kocaeli depreminin Fourier spektrumundaki belirleyici katkılarını ifade eden maksimum frekans değeri $f_{maks}$ ile verilmiştir.

Yapılan çalışmada, doğalgaz borusunun dinamik davranışı açısından önemli görülen ve zeminin plastik davranış gösterebileceği zemin ortamı ($H_1$=10m, $B_1$=50m) için minimize edilmiş ebatlara sahip sonlu elamanlar kullanılmış olup, sismik yük kaynağından yayılan Rayleigh dalga boyunun ($\lambda_R=0.9\lambda_s$) sekizde birinden az olacak biçimde tercih yapılmıştır ($\Delta h$=1.2m). Kullanılan sonlu eleman ağ yapısı dinamik davranışı araştırılan altyapı sisteminden uzaklaştıkça büyütülmüştür (H=40m, B=160m için $\Delta h$=2.80m) (Şekil 3). Sınırsız ortam olarak kabul edilen zemin sonlu serbestlik dereceli ayrık bir sisteme dönüştürülerek modellenmesi uygun sınır şartlarının kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen nümerik modelde kullanılan sınır şartlarına ait bilgiler yazarların daha önceki çalışmasında [16] detaylı olarak verilmiştir.

### 2.3. Altyapı ve Zemin için Malzeme Davranış Modeli (Material Constitutive Model for Soil and Infrastructure)

Lineer elastik malzeme dayanımı yaklaşımında akma yüzeyi sınırları aşıldığında gerilmeler dikkate alınamadığından dolayı, zemin ve beton gibi basınç

dayanımları yüksek olan gevrek malzemelerde davranışın doğrusal olmayan esaslara göre şekillendiği bilinmektedir. Bu çalışmada zemin davranış modeli olarak Mohr-Coulomb malzeme davranışı seçilmiştir. Çökme mekanizmaları için gerekli Mohr-Coulomb plastisite parametreleri sırasıyla, içsel sürtünme açısı (φ), zemin kohezyonu (c) ve kayma esnasında hacimde gerçekçi bir geri dönülemez değişiklik olarak akış kuralını tanımlamak için kullanılan kabarma açısı (ψ)'dır. Sadece elasto - plastik davranışta (x,y) koordinat sistemi ile dikkate alınan yüzeysel deformasyonun, efektif gerilmeler açısından plastik potansiyel fonksiyonla ilgili olan akma fonksiyonu aşağıdaki şekilde yazılabilir [46]:

$$f(\sigma,\varphi) = /\sigma_i-\sigma_j/-(\sigma_i+\sigma_j)\sin\varphi-c\cos\varphi \quad (2)$$

$$g(\sigma,\psi) = /\sigma_i-\sigma_j/-(\sigma_i+\sigma_j)\sin\psi \quad (3)$$

$$\sigma_i = \frac{\sigma_{ii}+\sigma_{jj}}{2} + \sqrt{(\frac{\sigma_{ii}+\sigma_{jj}}{2})^2+\sigma_{ij}^2}$$

$$\sigma_j = \frac{\sigma_{ii}+\sigma_{jj}}{2} - \sqrt{(\frac{\sigma_{ii}+\sigma_{jj}}{2})^2+\sigma_{ij}^2} \quad (4)$$

Zeminin çekme yenilmesi, çekme kesilme eşiği ile belirlenerek elde edilir. Çekme kesilme eşiği için iki ilave akma fonksiyonu tanımlanır:

$$F_k(\sigma) = \sigma_k-\sigma_t \le 0 \quad (k=1, 2) \quad (5)$$

Burada, $\sigma_t$, müsaade edilebilir çekme gerilmesidir. Çekme kesilme eşiği için bu akma fonksiyonları ile ilişkili bir akış kuralı uygulanır. Mohr-Coulomb yenilme kriteri ile birlikte sonlu eleman modelleri açısından, yapı ve zemin arasındaki ara yüzde tam bağlama olduğu varsayılmıştır [46]. Öngörülen sistemin boru-zemin yatay ve düşey arakesitlerinde elastik ve kalıcı deformasyonların oluşabileceği plastik davranış Coulomb teoremiyle belirlenmiş ve kayma gerilmesi (τ)

$$|\tau_i| = R_{inter}(c_i+\sigma_n \tan\varphi_i) \quad (6)$$

ifadesi ile belirlenmiştir. Burada, $\sigma_n$ ara yüzün normal gerilmesidir. Doğlagaz borusu ile zemin arasındaki dinamik etkileşimi daha gerçekçi anlamda ifade etmek için, arayüz dayanım azaltma faktörü ($R_{inter}$) kullanılmıştır. Bu katsayı, kendisini çevreleyen malzeme özelliklerine ve ortak mukavemet azaltma faktörü bağlı aşağıda verilen kurallara göre hesaplanır:

$$c_i = R_{inter}\, c_{soil}$$
$$\tan\varphi_i = R_{inter}\tan\varphi_{soil} \le \tan\varphi_{soil}$$
$$\varphi_i = 0^o \text{ için } R_{inter} < 1, \text{ diğer durumda } \varphi_i = \varphi_{soil} \quad (7)$$

Genelde, gerçek yapı-zemin dinamik davranışında ara yüzey kendini çevreleyen zemine göre daha zayıf ve daha elastik davranış gösterdiğinden mukavemet özellikleri kendilerini çevreleyen zemininkinden daha düşük değerde ($R_{inter} \le 1$) olması gerekir. Bu çalışmada kullanılan tüm zemin ve dolgu malzemesi türleri için mukavemet değeri $R_{inter}$=0.67 alınarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Oluşturulan sayısal modelde; düşük kayma dalgası hızına sahip alüvyon zemin bölgesi, doğalgaz borusunun üstünde ve altında kullanılan dolgu malzemeleri ve çelik doğalgaz boru hattı özelikleri Tablo1-3'de verilmiştir.

Tablo 1. Zemin ortamının mekanik özellikleri [47] (Mechanical properties of the soil medium)

| Parametre | Sembol | Birim | Büyüklük |
|---|---|---|---|
| Birim hacim ağırlık | γ | (kN/m$^3$) | 16.67 |
| Elastisite modülü | E | (kPa) | 34500.00 |
| Kayma modülü | G | (kPa) | 13270.00 |
| Poisson oranı | ν | - | 0.30 |
| Basınç dalgası | $V_p$ | m/s | 165.200 |
| Kayma dalgası | $V_s$ | m/s | 88.300 |
| Boşluk oranı | e | - | 0.50 |
| Kohezyon | c | (kPa) | 0.00 |
| Kayma mukavemeti açısı | φ | (º) | 33.00 |
| Kabarma açısı | ψ | (º) | 3.00 |
| Arayüz dayanım azaltma faktörü | $R_{inter}$ | - | 0.67 |

Tablo 2. Kullanılan dolgu malzemesi özellikleri [48] (Properties of filling soil of buried pipeline)

| Parametre | Kum ve çakıl karışımı | Uniform kum | Düzgün dane dağılımlı kum |
|---|---|---|---|
| Birim hacim ağırlık (kN/m$^3$) | 19.62 | 15.70 | 17.66 |
| Elastisite modülü (kPa) | 15000 | 15000 | 20000 |
| Poisson oranı (-) | 0.25 | 0.25 | 0.25 |
| Kohezyon (kPa) | 3.00 | 0.00 | 0.00 |
| Kayma mukavemeti açısı (º) | 38.00 | 32.00 | 33.00 |

Tablo 3. Doğalgaz boru hattı özellikleri (çelik, elastic plate-element) (Properties of steel pipeline)

| Parametre | Sembol | Birim | Büyüklük |
|---|---|---|---|
| Birim hacim ağırlık | γ | (kN/m$^3$) | 77.00 |
| Elastisite modülü | E | (kPa) | 2x10$^8$ |
| Rayleigh sönüm katsayıları | α,β | - | 0.05 |
| Poisson oranı | ν | - | 0.30 |
| Arayüz dayanım azaltma faktörü | $R_{inter}$ | - | 0.67 |

Sonraki aşamada, modelin kalibrasyonu işlemi için belirlenen boyutlar kullanılarak oluşturulan matematik model üzerinde farklı sonlu eleman ağ yapısı sıklığına (çok kaba, kaba, orta sıkı, sıkı çok sıkı) bağlı analizler yapılmış ve seçilen gözlem noktalarındaki yerdeğiştirme ve ivme değişimleri incelenmiştir. Yazarların daha önceki çalışmasında [16] detaylandırılarak verilen grafikler incelendiğinde altyapı-zemin etkileşim problemini gerçeğe yakın temsil eden modelin doğruluğu bir kez daha kanıtlamıştır.

## 3. SAYISAL UYGULAMA VE ANALİZ SONUÇLARI (NUMERICAL APPLICATION AND RESULTS)

Elasto-plastik zemin ortamında depremin oluşturduğu dalgaların genliğini azaltmak amacıyla Şekil 1'de görüldüğü üzere doğalgaz borusunun altına bir yapay kaya dolgusu önerilerek modellenen yapı zemin dinamik etkileşimi problemi için kapsamlı analizler gerçekleştirilmiştir. Önerilen yapay kaya dolgusunun özellikleri Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Dalga engelleyici yapay kaya dolgusu malzeme özelikleri (Properties of concrete wave impeding block)

| Parametre | Sembol | Birim | Büyüklük |
|---|---|---|---|
| Birim hacim ağırlık | $\gamma$ | ($kN/m^3$) | 22.00 |
| Elastisite modülü | E | (kPa) | $3.7x10^7$ |
| Poisson oranı | $\nu$ | - | 0.25 |
| Arayüz dayanım azaltma faktörü | $R_{inter}$ | - | 0.67 |

Çalışmanın ilk aşamasında, sonlu eleman analizlerinde gözlem noktası olarak seçilen A noktasında meydana gelen yerdeğiştirme-ivme değerlerinin değişimi incelenerek dalga bariyer modelinin optimum kalınlığı araştırılmıştır (Şekil 4, 5).

Farklı bariyer kalınlıklarının (w = 10, 20, 30, 40, 60 ve 100 cm) doğalgaz borusunun üstünde meydana gelen düşey yerdeğiştirme genliklerinde önemli oranda azaltma etkisi gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 4 a-g). Yatay yerdeğiştirmelerde ise yapay kaya dolgusunun daha az etkili olduğu ve herhangi bir büyütme etkisi göstermediği bulunmuştur (Şekil 4h-o).

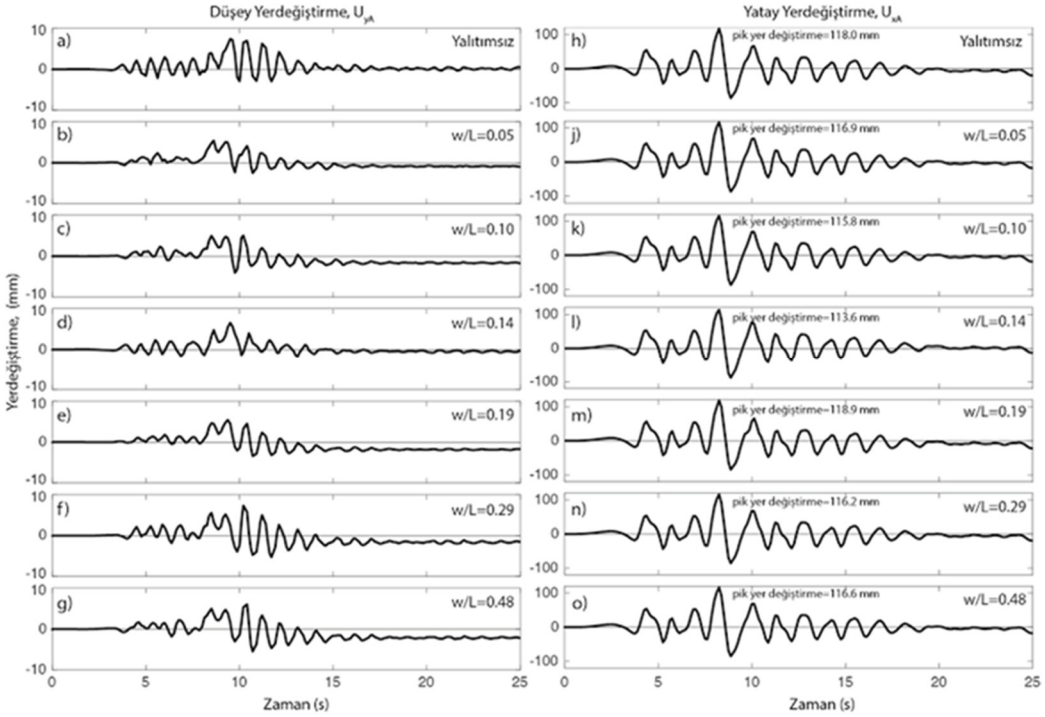
17/08/1999 Kocaeli depremi etkisi altında dinamik davranışı incelenen doğalgaz borusunun tepe noktasında meydana gelen yatay ve düşey ivme değerlerinde ise, dalga bariyer modelinin genel anlamda azaltma etkisi gösterdiği ve farklı bariyer kalınlıklarının bazı frekans değerleri için filtreleme yaptıkları gözlemlenmiştir (Şekil 5).

Özelikle yapay kaya dolgusunun w=20cm (w/L=0.10) ve w=40cm (w/L=0.14) kalınlıklarında gözlem noktası olarak seçilen A noktasında oluşan düşey ivme değerlerinde önemli oranda azaltma etkisi gözlemlenmiştir (Şekil 5c-d).

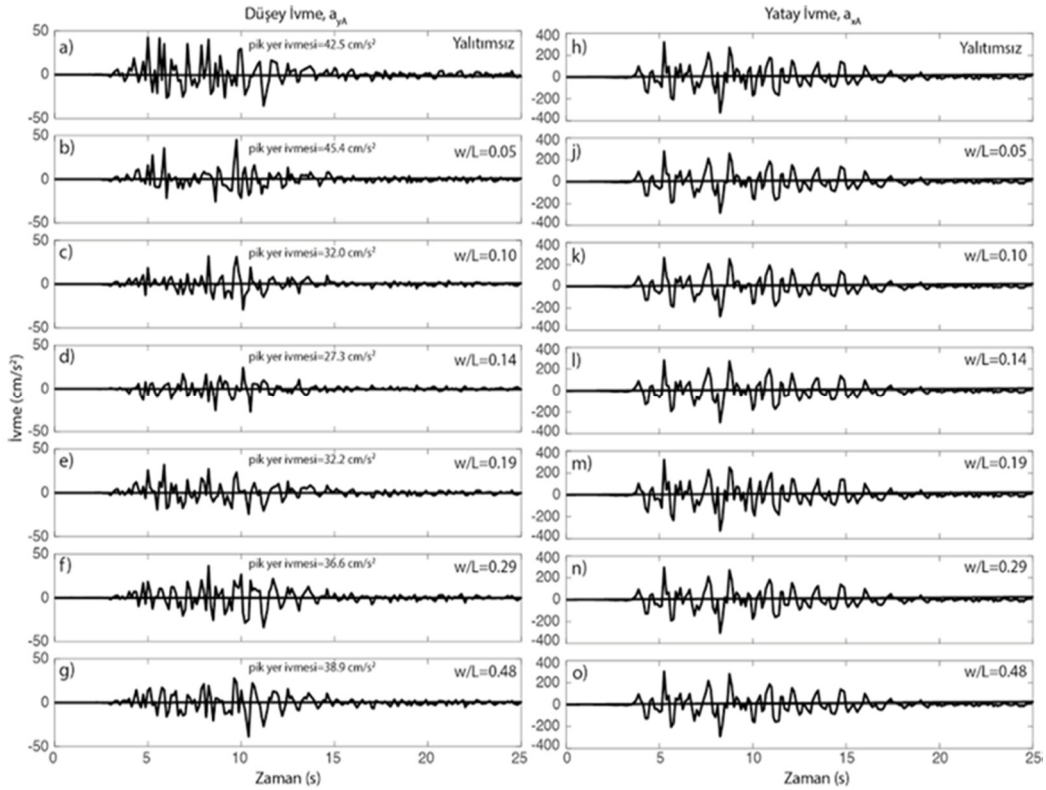
Bu analizler sonucu, önerilen çözümün ekonomik boyutu da düşünüldüğünde yapay kaya dolgusu kalınlığının w=20 cm olmasına karar verilmiştir. Dalga bariyerinin optimum kalınlığının tespit edilmesinden sonraki aşamada ise gömülme derinliğine bağlı yapılan parametrik çalışmalar grafikler halinde verilmiştir (Şekil 6, 7).

Yapay kaya dolgusunun farklı gömülme derinliklerindeki (h = 20, 40, 80, 160 ve 200 cm, h/H=0.07, 0.14, 0.28, 0.55, 0.69) etkisini tespit etmek için yapılan analizler sonucu elde edilen yatay ve düşey yerdeğiştirme grafiklerinden dalga bariyerinin özellikle düşey yerdeğiştirme değerlerinde etkili olduğu belirlenmiştir.

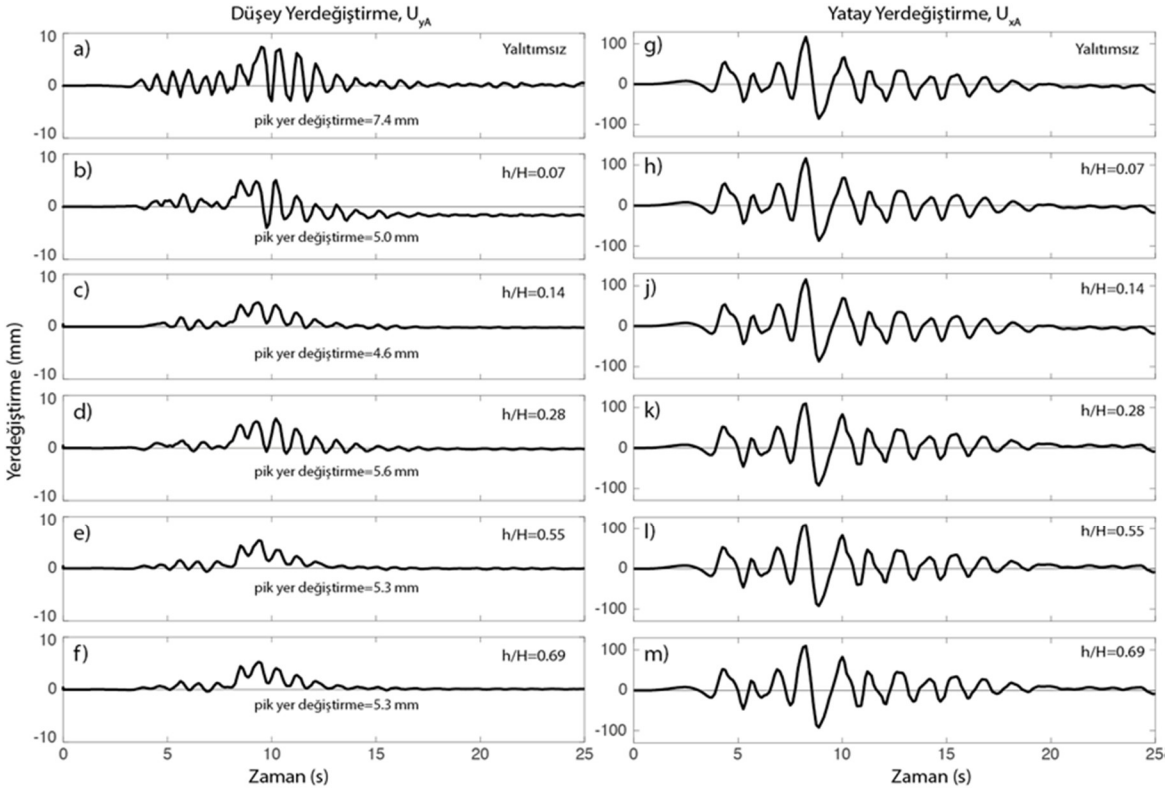
Yalıtımsız duruma göre depremin ürettiği maksimum yapısal titreşimler 7.4 mm iken, yalıtımlı durumda bu değer h/H=0.14 (40 cm) gömülme derinliği için 4.6 mm'ye inmektedir. Yapay kaya dolgusu özellikle doğalgaz borusunun tepe noktasındaki düşey ivme değerlerini, yalıtımsız duruma göre önemli oranda azaltmıştır. Bununla birlikte, dalga bariyer modeli A noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirme ve ivme değerlerinde az bir oranda yalıtım etkisi göstermiştir (Şekil 6, 7).



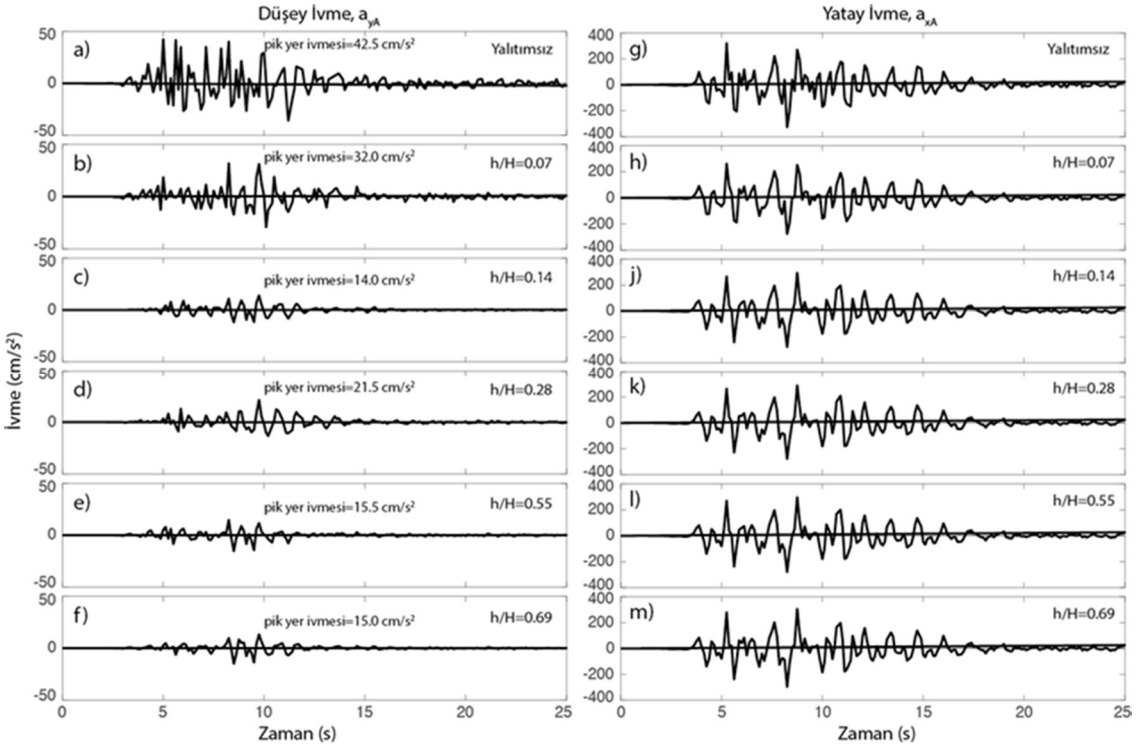

Şekil 4. Farklı w/L oranlarına bağlı olarak A noktasında elde edilen düşey (a-g) ve yatay yerdeğiştirmelerin (h-o) zaman geçmişi (The vertical and horizontal displacement time histories of point A depending on w/L ratios)




Şekil 5. Farklı w/L oranlarına bağlı olarak A noktasında elde edilen düşey (a-g) ve yatay (h-o) ivmelerin zaman geçmişi (The vertical and horizontal acceleration time histories of point A depending on w/L ratios)




Şekil 6. Farklı h/H oranlarına bağlı olarak A noktasında elde edilen düşey ve yatay yerdeğiştirmelerin zaman geçmişi (The vertical and horizontal displacement time histories of point A, depending on h/H ratios)




Şekil 7. Farklı h/H oranlarına bağlı olarak A noktasında elde edilen düşey ve yatay ivmelerin zaman geçmişi (The vertical and horizontal acceleration time histories of point A, depending on h/H ratios)

17/08/1999 Kocaeli depremi etkisi altında yapay kaya dolgulu durumdaki doğalgaz borusunun üst noktasında oluşan yerdeğiştirme ve ivme değerleri için elde edilen azalım oranları dalga bariyerinin farklı kalınlık ve gömülme derinliklerine bağlı, karşılaştırılmalı olarak Şekil 8'de verilmiştir.

Yapay kaya dolgusunun dalgayı perdeleme etkisini göstermek için kullanılan azalım oranı boyutsuz parametresi;

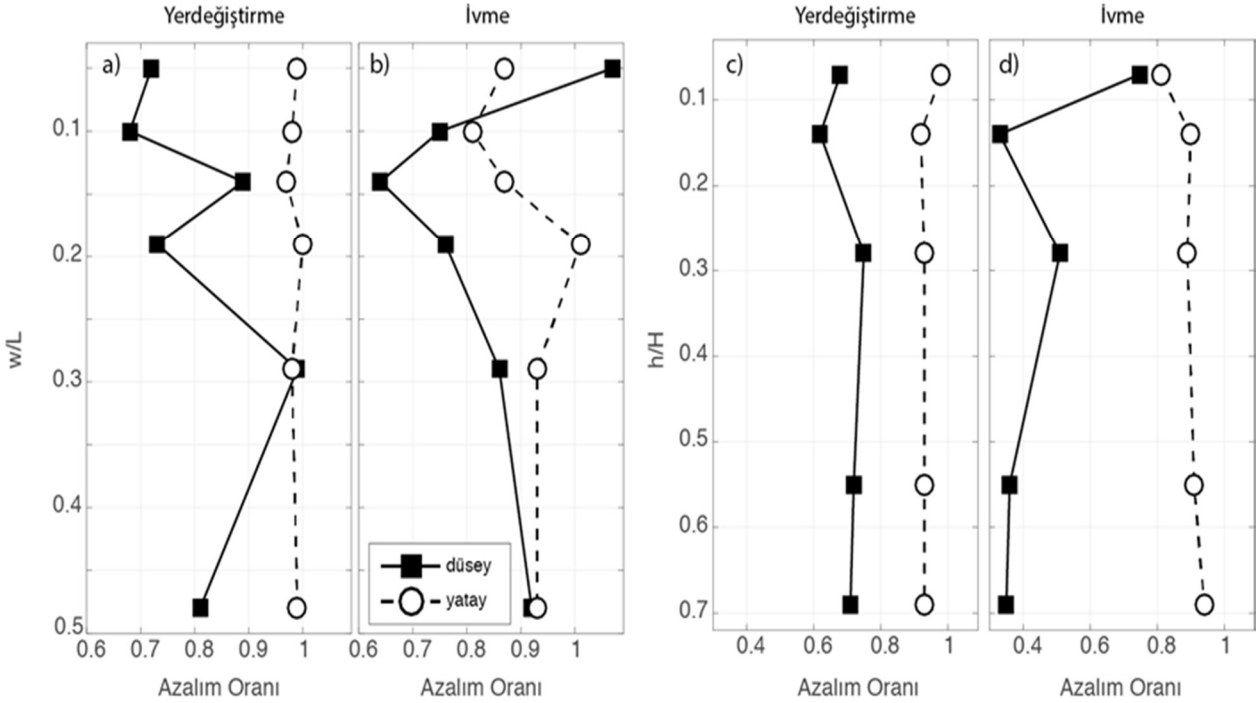
$$Azalım\ oranı = \left(\frac{yalıtımlı\ durumda\ oluşan\ yerdeğiştirme\ veya\ ivme}{yalıtımsız\ durumda\ oluşan\ yerdeğiştirme\ veya\ ivme}\right) \quad (8)$$

bağıntısıyla hesaplanmıştır.

Dalga azalım oranı değerinin 0 olması durumunda bariyerin tam yalıtım sağladığı, 1 olması durumunda ise yalıtım etkisinin gerçekleşmediği değerlendirmesi yapılmıştır.

Seçilen gözlem noktasında meydana gelen düşey yerdeğiştirme ve ivme değerlerinde yapay kaya dolgusunun w=20cm ve w=40cm kalınlığı için yaklaşık % 25'lik bir yalıtım elde edilmiştir (Şekil 8).

Dalga bariyer modelinin farklı kalınlılarına bağlı (w = 10, 20, 30, 40, 60 ve 100 cm) yapılan analizler sonucu yatay yerdeğiştirme ve ivme değerlerinde genellikle yalıtım etkisinin çok olmadığı gözlemlenmiştir.




Şekil 8. Farklı w/L (a-b) ve h/H (c-d) oranlarına bağlı olarak yerdeğiştirme ve ivmelerde elde edilen azalım oranları (The reduction factors with respect to w/L and h/H ratios for displacement and acceleration

Dalga perdeleme açısından önerilen çözümün ekonomik boyutu düşünülerek optimum bariyer kalınlığı w=20cm seçilmiş ve farklı gömülme derinlikleri (h = 20, 40, 80, 160 ve 200 cm ) için analizler yapılmıştır.

40 cm kalınlığa sahip yapay kaya dolgusunun doğalgaz borusunun altındaki uniform kum dolgusunun 40 cm altına konumlandırılması durumunda, doğalgaz borusunun tepe noktasında meydana gelen düşey ivme değerlerinde yaklaşık %70 gibi ciddi bir yalıtım etkisine ulaşılmıştır (Şekil 8).

Yine aynı koşullarda, dalga bariyerinin yalıtım etkisi düşey yerdeğiştirmelerde %40'a yükselmiştir (Şekil 8). Deprem etkisi altındaki doğalgaz borusunda meydana gelen yapısal titreşimlerin azaltılmasında yapay kaya dolgusu kalınlığının ve gömülme derinliğinin baskın iki parametre olduğu analizler neticesinde anlaşılmıştır.

## 4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Depremlerin neden olduğu yüksek frekans içeriğine sahip kuvvetli dalgalar yumuşak zemin koşullarında inşa edilen mühendislik yapılarına ciddi hasarlar vermektedir.

Bu titreşimler, özellikle altyapı sistemlerinin önemli bir birimi olan doğalgaz boru hatlarına hasar vererek kalıcı deformasyonlara sebep olabilmektedir. Bu nedenle, kuvvetli yer hareketlerinin altyapı sistemleri üzerindeki olumsuz etkilerinin önlenmesi amacıyla titreşim yalıtım araçları geliştirilebilinir. Bu çalışmada, alüvyon zemin ortamının doğrusal olmayan davranışının ve sonsuzluğunun uygun bir şekilde tanımlandığı sayısal model kullanılarak, 17/08/1999 Kocaeli deprem hareketinin oluşturmuş olduğu titreşimlerin doğalgaz boru hattına ulaşmasına engel olmak amacıyla geliştirilen yapay kaya dolgusu modelinin yalıtım performansı ilk aşamada kalınlığa bağlı irdelenmiştir. Elde edilen optimum kesit boyutlarına sahip yapay kaya dolgusu farklı gömülme derinliklerine konumlandırılarak dalga bariyerinin yalıtım etkisi kapsamlı bir şekilde araştırılmış ve sonuçlar grafikler halinde gösterilmiştir.

Dalga engelleyici yapay kaya dolgusu için elde edilen veriler neticesinde 40 cm kalınlığa sahip yapay kaya dolgusunun doğalgaz borusunun altındaki uniform kum dolgusunun 40 cm altına konumlandırılması durumunda, doğalgaz borusunun tepe noktasında meydana gelen yerdeğiştirme ve ivme değerlerinde %70 yalıtım etkisi gözlemlenmiştir.

Büyük bir kısmı deprem kuşağı içerisinde yer alan ülkemiz topraklarının altyapısında bulunan mühendislik yapılarında oluşabilecek bu titreşim hareketinin incelenmesi ve zemin özelliklerine göre uygun yalıtım sistemlerinin tasarımı ile inşaat mühendislerine bu tarz problemlerin çözümü, yapılan bu çalışma ile gösterilmeye çalışılmıştır.

## KAYNAKÇA (REFERENCES)


[1] S. Takada, N. Hassani ve K. Fukuda, "A new proposal for simplified design of buried steel pipes crossing active faults", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 30, 1243–1257, 2001.

[2] P. Vazouras, S.A. Karamanos ve P.D. Dakoulas, "Mechanical behavior of buried steel pipes crossing active strike-slip faults", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 41(2012), 164-180, 2012.

[3] R. Bilham, P. Doyle, R. Evans, P. Greening, R. May, A. Stewart ve dig., " TheKocaeli, Turkey earthquake of 17 August 1999a field report by EEFIT", Earthquake engineering field investigation team institution of structural engineers, Dina D'Ayala (editör), MatthewFree(editör), 2003.

[4] J. Eidinger, M. M,O'Rourke ve J. Bachhuber, "Performance of a pipeline at a fault crossing", In: Proceedings of 7th U.S.National Conference on Earthquake Engineering, Oakland, California, 2002.

[5] Y.W. Choo, T.H. Abdoun, M.J. O'Rourke ve D. Ha. "Remediation for buried pipeline systems under permanent ground deformation" *Soil Dynamics and Earthquake Engineering,* 27 (12), 1043–55, 2007.

[6] W.J. Hall ve T.D. O'Rourke, "Seismic behavior and vulnerability of pipelines", Lifeline earthquake engineering, M. A. Cassaro, ed., American Society of Civil Engineers, New York, 761–773, 1991.

[7] H. Liu ve E. Song, "Seismic response of large underground structures in liquefiable soils subjected to horizontal and vertical earthquake excitations", *Computers and Geotechnics*, 32(4), 223-244, 2005.

[8] D.K. Karamitros, G.D. Bouckovalas ve G.P. Kouretzis, "Stress analysis of buried steel pipelines at strike-slip fault crossings", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering,* 27(3), 200-211, 2007.

[9] T.H. Abdoun, D. Ha, M.J. O'Rourke, M.D. Symans, T.D. O'Rourke, M.C. Palmer ve diğ., "Factors influencing the behavior of buried pipelines subjected to earthquake faulting", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering,* 29(3), 415-427, 2009.

[10] P. Vazouras, S.A. Karamanos ve P.D. Dakoulas, "Finite element analysis of buried steel pipelines under strike-slip fault displacements", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering,* 30(11), 1361-1376, 2010.

[11] F. Göktepe, H.S. Küyük ve E. Çelebi, "Analysis of Embedded Pipeline Induced by Earthquake Excitation under Various Soil Material Types" The 2001 Bhuj Earthquake and Advances in Earthquake Science, Gandhinagar, India, 22-27 January 2011 (Only abstract published).

[12] F. Göktepe, H.S. Küyük ve E. Çelebi, "Effect of Wave Impeding Barrier Depth on Buried Pipeline", *The Online Journal of Science and Technology, (TOJSAT)*, 3(4), 55-63, 2013.

[13] M.J. O'Rourke ve X. Liu, "Seismic Design of Buried and Offshore Pipelines", MCEER- 12-MN04, 2011.

[14] V. Chaudhari, V.D.K. Kumar ve R.P. Kumar, "Finite element analysis of buried continuous pipeline subjected to fault motion", *International Journal of Structural Engineering*, 4(4), 314-331, 2013.

[15] X. Xie, M.D. Symans, M.J. O'Rourke, T.H. Abdoun, T.D. O'Rourke, M.C. Palmer ve diğ., "Numerical Modeling of Buried HDPE Pipelines Subjected to Normal Faulting: A Case Study", *Earthquake Spectra*, 29(2), 609–632, 2013.

[16] F. Göktepe, H.S. Küyük ve E. Çelebi, "Efficiency of wave impeding barrier in pipeline construction under earthquake excitation using non-linear finite element analysis", *SADHANA-Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 39(2), 419-436, 2014.

[17] B. Akbas, M. O'Rourke, E. Uckan, J. Shen ve M. Caglar, "Performance-baseddesıgn of burıed steelpıpes at fault crossıngs", In: Proceedings of the ASME 2015 pressure and vessels & piping conference, PVP2015-45662 PVP 2015, Boston, MA, USA, July 19–23, 2015.

[18] E. Uckan, B. Akbas, J. Shen, W. Roud, F. Paolacci ve M. O'Rourke, "A simplified analysis model for determining the seismic response of buried steel pipes at strike-slip fault crossings", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering,* 75(2015), 55-65, 2015.

[19] Y.H. Pao ve C.C. Mow, "Scattering of plane compressional waves by a spherical obstacles", *Journal of Applied Physics*, 34, 493–4999, 1963.

[20] J. Aboudi, "Elastic waves in half-space with this barrier", *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, 99(1), 69–83, 1973.

[21] M. Fuyuki ve Y. Matsumoto, "Finite difference analysis of rayleigh wave scattering at a trench", *Bulletin of Seismological Society of America*, 70(6), 2051–2069, 1980.

[22] E. Kausel, "Thin-Layer method: formulation in the time domain", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 37, 927–941, 1994.

[23] C. Bode, R. Hirschauer ve S.A. Savadis, "Soil–structure interaction in the time domain using half-space green's functions", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22 (4), 283–295, 2002.

[24] R. Hildebrand, "Effect of soil stabilization on audible band railway ground vibration", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24, 411–424, 2004.

[25] C.J.C. Jones ve J.R. Block, "Prediction of ground vibration from freight trains", *Journal of Sound and Vibration*, 193(1), 205–213, 1996.

[26] G. Pflanz, K. Hashimoto ve N.Chouw, "Reduction of structural vibrations induced by a moving load", *Journal of Applied Mechanics*, 5, 555–563, 2002.

[27] M.H. El Naggar ve A.G. Chehab, "Vibration barriers for shock-producing equipment", *Canadian Geotechnical Journal*, 42, 297–306, 2005.

[28] M. Buonsanti, F. Cirianni, G. Leonardi, A. Santini ve F. Scopelliti, "Mitigation of railway traffic induced vibrations: the influence of barriers in elastic half space", *Hindawi Publishing Corporation, Advances in Acoustics and Vibration*, 2009.

[29] I.L. Howard ve K.A. Warren, "Finite-element modeling of instrumented flexible pavements under stationary transient loading", *Journal of Transportation Engineering*, 135(2), 53-61, 2009.

[30] C.H. Chiang ve P.H. Tsai, "A Numerical Study of the Screening Effectiveness of Open Trenches for High-Speed Train-Induced Vibration", *Hindawi Publishing Corporation Shock and Vibration*, 2014 (2014), 1-11, 2014.

[31] N. Chouw, R. Le ve G. Schmid, "Propagation of vibration in a soil layer over bedrock", *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 8(3), 125-131, 1991.

[32] N. Chouw, "Wave propagation from the source via the subsoil into the building", Proceedings of the 1st. International Workshop Wave'94 and Reduction of Vibrations, Berg-Verlag GmbH, Bochum, Germany, 33-46. 1994.

[33] H. Takemiya, "Lineside ground vibrations induced by high-speed train passage", Workshop on Effect of High-Speed Vibration on Structures and Equipment, Dept. Civil Eng., Nat. Cheng Kung Univ., Tainan, Taiwan, R.O.C., 43-49, 1998a.

[34] H. Takemiya, "Paraseismic behavior of wave impeding block measured for ground vibration reduction", Workshop on Effect of High-Speed Vibration on Structures and Equipment, Dept. Civil Eng., Nat. Cheng Kung Univ., Tainan, Taiwan, R.O.C., 51-56, 1998b.

[35] N. Chouw ve G. Pflanz, "Impediment of wave propagation from a moving source via the subsoil into the building", Wave 2003, Chouw&Schmid, Balkema, Rotterdam, 101-111, 2003.

[36] E. Çelebi ve F. Göktepe, "Non-linear 2-D FE analysis for the assessment of isolation performance of wave impeding barrier in reduction of railway-induced surface waves", *Construction and Building Materials*, 36 (2012), 1-13, 2012.

[37] F. Göktepe ve E. Çelebi, "Vibration reduction on surrounding buildings induced by high speed

trains", Vienna Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics (VEESD 2013), C. Adam, R. Heuer, W. Lenhardt & C. Schranz (eds), Vienna, Austria, 2013.

[38] S. Ahmad ve T.M. Al-Hussaini, "Simplified design for vibration screening by open and infilled trenches", *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(1), 67-88, 1991.

[39] R. Klein, H. Antest ve D.L. Honedect, "Efficient 3D modeling of vibration isolation by open trenches", *Computers and Structures*, 64(1-4), 809-817, 1997.

[40] E. Forchap ve B. Verbic, "Wave propagation and reduction of foundation vibrations", Berg-Verlag GmbH, Bochum, 165-178, 1994.

[41] M. Adam ve N. Chouw, "Reduction of footing response to man-made excitations by using a wave impeding barrier", *Journal of Applied Mechanics*, 4, 423-431, 2001.

[42] A. Saikia, "Numerical study on screening of surface waves using a pair of softer backfilled trenches", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 65, 206–213. 2014.

[43] R. B. J. Brinkgreve, R. Al-Khoury, K. J. Bakker, P.G. Bonnier, P.J.W. Brand, W. Broere, H.J. Burd, G. Soltys, P. A. Vermeer ve D. D. Haag, "Plaxis finite element code for soil and rock analyses", Published and distributed by A.A. Balkema Publisher, The Netherlands, 2002.

[44] R.L. Kuhlemeyer ve J. Lysmer, "Finite element method accuracy for wave propagation problems", *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 99 (SM5), 421-427, 1973.

[45] J. Lysemer, T. Ukada, C.F. Tsai ve H.B.Seed, "FLUSH-A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil-Structure Interaction Problems", Report No: EERC 75/30, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1975.

[46] I.M. Smith ve D.V. Griffith, "Programming the finite element method", 2nd edition, John Wiley&Sons, Chisester, U.K., 1982.

[47] N. K. Gamber, "Shallow foundation systems response to blast loading", A Thesis Presented to The Faculty of the Fritz J and Dolores H Russ College of Engineering and Technology, Ohio University, In Partial Fulfillment Of the Requirement for the Degree Master of Science, Athens, 2004.

[48] G. A. Zaneta, "Analysis NATM tunnel responses due to earthquake loading in various soils", *Mining Technology Bulletin-Institute of Mining Science and Technology,* 2(3), 9–17, 2006.