



## Reducing Seismic Effects by Using Steel Metamaterials in Different Configurations

Selcuk Kacin <sup>1</sup>, Umur Korkut Sevim <sup>1</sup>, Murat Ozturk <sup>1</sup>, Muharrem Karaaslan <sup>2</sup>, Mustafa Demirci <sup>1</sup>, Oguzhan Akgol <sup>2</sup>, Emin Unal <sup>2</sup>, Zafer Ozer <sup>3</sup>, Mustafa Tunahan Basar <sup>4</sup>, Bayram Ali Mert <sup>5</sup>, Seyda Gulsum Kaya <sup>1</sup>, Maide Erdogan Alkurt <sup>2</sup> and Fatih Ozkan Alkurt <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Iskenderun Technical University, Department of Civil Engineering, Hatay, 31200, Turkey

<sup>2</sup> Iskenderun Technical University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Hatay, 31200, Turkey

<sup>3</sup> Mersin University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Mersin, Turkey

<sup>4</sup> Iskenderun Technical University, Department of Mechanical Engineering, Hatay, 31200, Turkey

<sup>5</sup> Iskenderun Technical University, Department of Petroleum Civil Engineering, Hatay, 31200, Turkey

ORCID: 0000-0001-5406-5756, 0000-0002-6268-4909, 0000-0003-3389-4883, 0000-0003-0923-1959, 0000-0002-3249-2586, 0000-0002-1423-1569, 0000-0002-4088-8353, 0000-0001-7118-938X, 0002-3108-8995, 0000-0002-3492-9817, 0000-0002-7018-9377, 0000-0003-1858-510X, 0000-0002-9940-0658

### Keywords

Metamaterial, Earthquake, Steel materials, Surface waves

### Highlights

- \* Seismic effects on the soil were analysed using steel piles
- \* Different sequences such as sine, square, triangle and circle were carried out on the ground
- \* Similar results in common frequency values were examined and interpreted

### Acknowledgements

This study was carried out within the framework of the UDAP-Ç-19-21 project supported by the Disaster and Emergency Management Presidency (AFAD). The authors (AFAD) would like to thank.

### Aim

To demonstrate that seismic effects can be attenuated using steel piles in various field applications.

### Methods

Simulation studies are carried out to determine the seismic behavior of steel piles in field applications with different field configurations.

### Results

It is thought that steel piles can show effective performance in seismic metamaterial applications. Effective results were obtained in all field applications, especially between 5.8 Hz and 8.5 Hz frequency values. It is seen that the most successful results are obtained in the triangular field arrangement. Effective results can be obtained in triangular array field applications in wide band gaps.

### Supporting Institutions

Iskenderun Technical University,  
Disaster and Emergency Management (AFAD)

### How to cite

Kacin S., Sevim U.K., Ozturk M., Karaaslan M., Demirci M., Akgol O., Unal E., Ozer Z., Basar M.T., Mert B.A., Kaya S.G., Alkurt M.E., Alkurt F.O., 2021. Reducing Seismic Effects by Using Steel Metamaterials in Different Configurations, Turk. J. Earthq. Res. 3 (1), 20-32, <https://doi.org/10.46464/tdad.911133>

### Manuscript

Research Article

Received: 26.04.2021

Revised: 18.05.2021

Accepted: 28.05.2021

Printed: 30.06.2021

### DOI

10.46464/tdad.911133

### Corresponding Author

Selcuk Kacin

Email: selcuk.kacin@iste.edu.tr

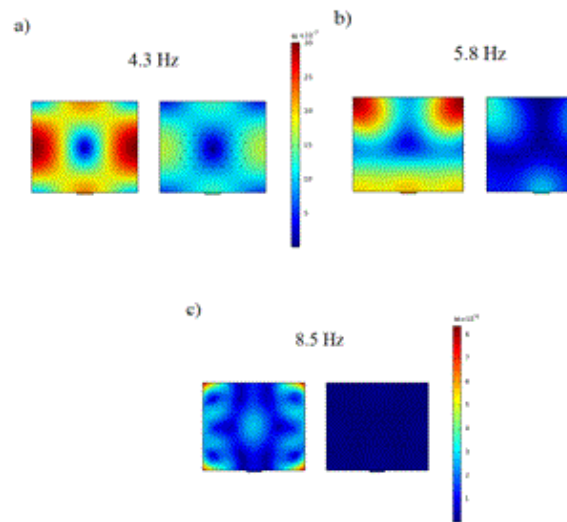


Figure 11. Displacement differences between field applications with triangular piles and field applications without metamaterials a) 4.3 Hz, b) 5.8 Hz, c) 8.5 Hz



## Farklı Konfigürasyonlarda Çelik Metamalzemeler Kullanarak Sismik Etkilerin Azaltılması

Selçuk Kaçın<sup>1</sup>, Umur Korkut Sevim<sup>1</sup>, Murat Öztürk<sup>1</sup>, Muharrem Karaaslan<sup>2</sup>, Mustafa Demirci<sup>1</sup>, Oğuzhan Akgöl<sup>2</sup>, Emin Ünal<sup>2</sup>, Zafer Özer<sup>3</sup>, Mustafa Tunahan Başar<sup>4</sup>, Bayram Ali Mert<sup>5</sup>, Şeyda Gülsüm Kaya<sup>1</sup>, Maide Erdoğan Alkurt<sup>2</sup> ve Fatih Özkan Alkurt<sup>2</sup>

<sup>1</sup> İskenderun Teknik Üniversitesi, İnşaat Müh. Bölümü, İskenderun 31200, Türkiye,

<sup>2</sup> İskenderun Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, İskenderun 31200, Türkiye

<sup>3</sup> Mersin Üniversitesi, Mersin Meslek Yüksekokulu, Elektronik Bölümü, Mersin, 31200, Türkiye

<sup>4</sup> İskenderun Teknik Üniversitesi, Makina Müh. Bölümü, Hatay, 31200, Türkiye

<sup>5</sup> İskenderun Teknik Üniversitesi, Petrol ve Doğal gaz Müh. Bölümü, Hatay, 31200, Türkiye

ORCID: 0000-0001-5406-5756, 0000-0002-6268-4909, 0000-0003-3389-4883, 0000-0003-0923-1959, 0000-0002-3249-2586, 0000-0002-1423-1569, 0000-0002-4088-8353, 0000-0001-7118-938X, 0002-3108-8995, 0000-0002-3492-9817, 0000-0002-7018-9377, 0000-0003-1858-510X, 0000-0002-9940-0658

### ÖZET

Depremlerin yıkıcı etkilerini azaltmak için yapılan çalışmalar, son zamanlarda üzerinde durulan araştırma konuları arasındadır. Bu çalışmada, kare, üçgen, sinüs ve daire olmak üzere dört farklı saha dizisinde çelik metamalzemeler kullanılarak titreşim etkilerini azaltmak için bir dizi simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Oluşan iletim kayıpları sonlu elamanlar yöntemi (FEM) kullanılarak belirlenmiştir. Simülasyon çalışmasında, çelik yapıların çap ve malzeme özellikleri ile zemin yapısı ve boyutları sabit tutulurken parametrik tanımlamalar yapılmış, kazıkların dizilişleri geometrik olarak birbirinden farklı tutulmuştur. Çalışmanın amacı, çelik için en uygun saha uygulamasını belirlemek ve saha dizilimleri sonucunda ortaya çıkan farklılıkları incelemektir. Simülasyonlar sonucunda bütün uygulamalarda yüzey titreşimlerinin 5.8 ve 8.5 Hz frekans değerlerinde önemli ölçüde kısıtlandığı görülmüştür. Ancak uygulanan saha yapıları karşılaştırıldığında, üçgen dizilimindeki sahanın diğer saha uygulamalarına göre yüzey dalgalarını daha fazla engellediği sonucuna varılmıştır.

### Anahtar kelimeler

Metamalzeme, Deprem, Çelik malzeme, Yüzey dalgaları

### Öne Çıkanlar

- \* Çelik kazıklar kullanılarak toprak zeminde sismik etkilerin analiz edildi
- \* Zemin üzerine sinüs, kare, üçgen ve daire olmak üzere farklı dizilimin gerçekleştirildi
- \* Ortak frekans değerlerinde benzer sonuçların irdelenerek yorumlandı

### Makale

Araştırma Makalesi

Geliş: 26.04.2021

Düzeltilme: 18.05.2021

Kabul: 28.05.2021

Basım: 30.06.2021

### DOI

10.46464/tdad.911133

### Sorumlu yazar

Selçuk Kaçın

Eposta:

selcuk.kacin@iste.edu.tr

## Reducing Seismic Effects by Using Steel Metamaterials in Different Configurations

Selcuk Kacin<sup>1</sup>, Umur Korkut Sevim<sup>1</sup>, Murat Ozturk<sup>1</sup>, Muharrem Karaaslan<sup>2</sup>, Mustafa Demirci<sup>1</sup>, Oğuzhan Akgöl<sup>2</sup>, Emin Unal<sup>2</sup>, Zafer Ozer<sup>3</sup>, Mustafa Tunahan Basar<sup>4</sup>, Bayram Ali Mert<sup>5</sup>, Seyda Gulsum Kaya<sup>1</sup>, Maide Erdogan Alkurt<sup>2</sup> and Fatih Ozkan Alkurt<sup>2</sup>

<sup>1</sup> İskenderun Technical University, Department of Civil Engineering, Hatay, 31200, Turkey

<sup>2</sup> İskenderun Technical University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Hatay, 31200, Turkey

<sup>3</sup> Mersin University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Mersin, Turkey

<sup>4</sup> İskenderun Technical University, Department of Mechanical Engineering, Hatay, 31200, Turkey

<sup>5</sup> İskenderun Technical University, Department of Petroleum Civil Engineering, Hatay, 31200, Turkey

ORCID: 0000-0001-5406-5756, 0000-0002-6268-4909, 0000-0003-3389-4883, 0000-0003-0923-1959, 0000-0002-3249-2586, 0000-0002-1423-1569, 0000-0002-4088-8353, 0000-0001-7118-938X, 0002-3108-8995, 0000-0002-3492-9817, 0000-0002-7018-9377, 0000-0003-1858-510X, 0000-0002-9940-0658

### ABSTRACT

Studies conducted to reduce the destructive effects of earthquakes are among the research topics that have been focused on recently. In this study, a series of simulation studies were carried out to reduce vibration effects by using steel metamaterials in four different field sequences: square, triangle, sine and circle. The resulting transmission losses are determined using the finite integration method (FEM). In the simulation study, parametric definitions were made while keeping the steel structures and ground constant, and the arrangement of the piles were kept geometrically different from each other. The aim of the study is to determine the most appropriate field application for steel and to examine the differences that arise as a result of the field alignments. As a result of the simulations, it has been observed that the surface vibrations are significantly restricted at 5.8 and 8.5 Hz frequency values in all applications. However, when the applied field structures were compared, it was concluded that the field in the triangular arrangement prevented surface waves more than other field applications.

### Keywords

Metamaterial, Earthquake, Steel materials, Surface waves

### Highlights

- \* Seismic effects on the soil were analysed using steel piles
- \* Different sequences such as sine, square, triangle and circle were carried out on the ground
- \* Similar results in common frequency values were examined and interpreted

### Manuscript

Research Article

Received: 26.04.2021

Revised: 18.05.2021

Accepted: 28.05.2021

Printed: 30.06.2021

### DOI

10.46464/tdad.911133

### Corresponding Author

Selcuk Kacin

Email:

selcuk.kacin@iste.edu.tr

## 1. GİRİŞ

Depremler, yer kabuğunda titreşimler yaratan dalgaların kaynağı olarak tanımlanabilir. Bu titreşimler arasında Love ve Rayleigh dalgaları yüzeyde en yoğun şekilde hissedilen dalga türleri olarak kabul edilir. Bu iki tür dalga, yer kabuğunda titremelere neden olur ve yıkıcı etkiler yaratabilir (Dudchenko vd. 2021). Geçmişten günümüze kaçınılmaz doğal afetlerde büyük yıkıcı etkilere sahip olan depremler, bir mühendislik sorunu haline gelmiştir. Genel olarak depremlerin oluşumunu önlemek mümkün olmamakla birlikte, meydana geldikten sonra etkilerini absorbe etmek için birçok çalışma yapılmıştır (Achaoui vd. 2017, Casablanca vd. 2018, Mandal ve Somala 2020).

Depremlerin çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri göz önünde bulundurulduğunda yapıların güçlendirilmesi, uygulama alanı olarak seçilen arazinin zemin yapısı, inşaat sektöründe kullanılan malzeme özellikleri gibi birçok parametre üzerinde çalışmalar yapılması büyük önem arz etmektedir (Du vd. 2017, Shelar ve Thaker 2019). Bu bağlamda sismik metamateryallerin kullanımının avantajlı olabileceği düşünülmektedir (Kikuchi vd. 2008, Yamamoto vd. 2009, Kacin vd. 2021). Metamateryaller, üstün fiziksel özelliklere sahip olan ve çeşitli amaçlarla kullanılabilen yapay materyaller olarak adlandırılabilir. Ek olarak, sismik etkilerin hafifletilmesi için gerekli koşullar yaratılırsa bu materyaller oldukça işlevsel olarak çalışabileceği ileri sürülmektedir (Shelby vd. 2001, Prati 2006, Mu vd. 2020, Geng vd. 2018, Mendhe ve Kosta 2011). Ayrıca metamateryaller, korunması planlanan yapıdan ayrı konumlandırılarak yapıya müdahale etmeden titreşim etkilerini kontrol etme gibi büyük avantajlara sahiptir (Kim 2014). Metamateryaller ilk olarak elektromanyetik dalgaları kontrol etmek için tanımlanmıştır. Bununla birlikte, elektromanyetik dalgaların ve deprem dalgalarının benzer davranışları nedeniyle, sismik metamateryaller yaratma fikri ortaya çıkmıştır (Veselago 2009, Mu vd. 2020). Literatürde sismik etkilerin azaltılmasında metamateryallerin kullanılmasını öneren birçok çalışma bulunmaktadır. Bunlar arasında genel kabul gören inanç, toprak zeminde bulunan çeşitli yapıların yüzey dalgaları olarak adlandırılan Rayleigh dalgalarını önemli ölçüde kısıtlayabileceğini öngörmektedir (Wagner vd. 2018). Sismik dalgaların yüzey üzerindeki etkilerinin sönümlenmesinin temel amacı, dalgaların sahadaki yayılma alanlarının daralması veya ortaya çıkan titreşim etkilerinin toprak yoğunluğuna bağlı olarak dağılımına dayanmaktadır. Burada, zemindeki silindirik rezonatör yapıların belirli bir alana konumlandırılarak oluşabilecek sismik etkilerin dağıtılması ve alan etkilerinin azaltılması amaçlanmaktadır (Brule vd. 2012). Du vd. (2018) yaptıkları çalışmada metamateryalleri kullanarak yapılarda titreşimleri azaltmada yaşanan zorluklardan bahsetmektedirler. Sismik dalgaların elektromanyetik dalgalardan daha karmaşık olduğunu, dolayısıyla sönümlenmelerinde problemler olduğunu iddia etmişlerdir. Ancak, bu sorunu çözmek için, geometrik şekilli H profil yapılarının sismik metamateryaller olarak geniş bir bantta kullanımını araştırmışlardır. Chen vd. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada sismik etkileri 10 Hz'nin altına düşürmek için bir materyal geliştirmeye odaklanılmıştır. Beton kazıkların periyodik olarak belirlenen bir zemin yapısına yerleştirilmesine dayanan sayısal ve deneysel çalışmalarında, 7.2 Hz'e kadar bant boşluklarının oluştuğundan ve düşük frekanslı yüzey dalgalarının belirledikleri metodoloji ile sınırlandırabileceğinden bahsetmişlerdir (Chen vd. 2019). Lott vd. (2020) tarafından yapılan metafor net deneyinde akustik ve optik gibi uygulama alanlarında görülen karmaşık dalga oluşumlarının jeofizik uygulamalarda da geçerli olduğu kabul edilmiştir. Ancak yoğun orman yapıları ile boş arazi arasındaki sismik etkilerin ölçülmesine bağlı olarak ağaç yapılarının doğal bir rezonatör materyal olarak işlev gördüğünü ve yüzey dalgalarını bir ölçüde zayıflattığını belirtmişlerdir (Lott vd. 2020). Sonuç olarak, metamateryallerin sismik dalgaları sönümlenmede bir miktar etkiye sahip olduğu açıkça belirtilmiştir. Ancak sismik metamateryallerin geliştirilmesi ve araştırılması için çalışmaların sürdürülmesi gerekmektedir (Wagner vd. 2016).

Bu çalışmada, çelik materyallerin farklı saha dizilerindeki etkilerini araştırmak için bir simülasyon çalışması yapılmıştır. Kare, üçgen, sinüs ve dairesel dizilerde COMSOL multifizik uygulamalarında bir düzlem üzerine çelik kazıklar yerleştirilmiş ve bu dört yapıya 10 Hz'e kadar

uygulanan sismik etkilerin davranışı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, yapılar kendi aralarında karşılaştırılmış ve çalışma kapsamında optimum dizilim formu belirlenmeye çalışılmıştır.

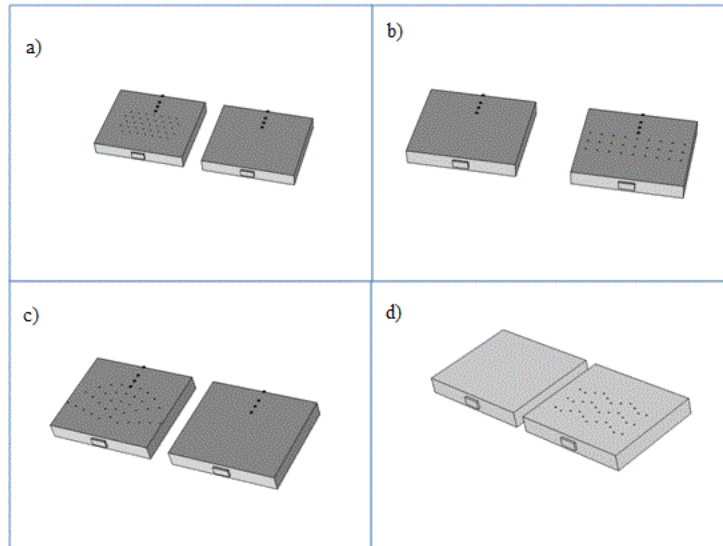
## 2. YÖNTEM

Bu çalışmada, COMSOL çoklu fizik programları kullanılarak simülasyonlar yapılmıştır. İlk adım, programdaki parametreleri tanımlamak ve alan ve kazık yapılarını geometrik olarak bir düzlem üzerinde oluşturmaktır. İkinci olarak çalışmada kullanılacak malzemelerin fiziksel özellikleri belirlenir. Son olarak, sonuçlar (1-10) Hz frekans değeri ve 1N test darbesi ve yer değiştirme parametreleri altında iletim grafikleri olmak üzere iki yerde elde edilir. Çalışma kapsamında kullanılan çelik malzemenin özellikleri sabit tutularak saha dizileri arasındaki fark belirlenmeye çalışılır. Tüm uygulamalar için yerleştirilen çelik kazıkların çapları 15 cm ve uzunlukları 2 m olarak girilmiştir. Ayrıca çalışmalarda kullanılan malzeme özellikleri Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Simülasyon çalışmalarında kullanılan malzeme özellikleri (Miniaci vd. 2016)

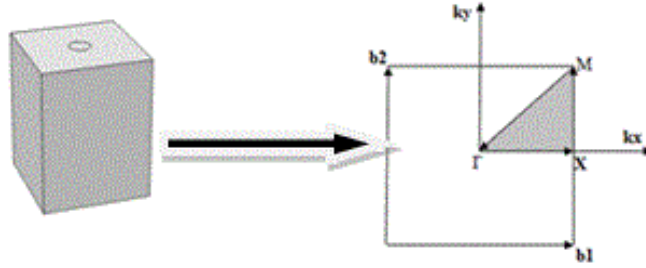
Toprağın Özellikleri	Değişken	Değerler	Birimler
Elastisite modülü	E	30e <sup>6</sup>	Pa
Poisson oranı	$\nu$	0.3	1
Yoğunluk	$\rho$	1800	kg/m <sup>3</sup>
Çeliğin Özellikleri	Değişken	Değerler	Birimler
Elastisite modülü	E	207e <sup>9</sup>	Pa
Poisson oranı	$\nu$	0.3	1
Yoğunluk	$\rho$	7784	kg/m <sup>3</sup>

Tablo 1'de görüldüğü gibi COMSOL multifizik uygulamalarında sistem için malzeme olarak 3 farklı fiziksel özelliğe dayalı malzemeler tanımlanmıştır. Bu özellikler sırasıyla elastisite modülü, poisson oranı ve yoğunluktur.



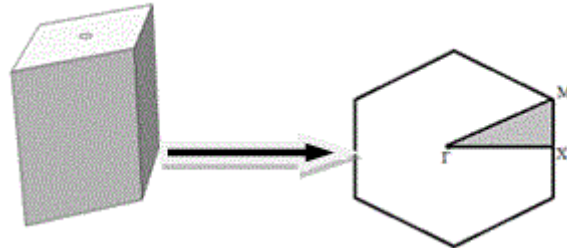
Şekil 1: COMSOL uygulamalarında belirlenen geometrik saha yapıları; a) üçgen, b) kare, c) dairesel, d) sinüs

Şekil 1'de görüldüğü gibi uygulama alanları olarak seçilen geometride kare yapılar zemin olarak seçilmiştir. Her kare yapı üzerindeki desenler ise sahanın örgü yapısını göstermektedir. Ayrıca kare şeklinde oluşturulan saha yapıları; boyları 14 m, genişlikleri 12 m ve derinlikleri 2 m olan toprak saha yapılar şeklinde oluşturulmuştur. Burada simüle edilen yapılar arasında kare ve üçgen kafes yapılar düzenli (simetrik) yapılar olduklarından birim hücre yapılarına sahiptirler. Ancak sinüs ve dairesel dizimli yapılarda çelik kazıklar doğrusal olmayan bir dağılım içerisine yerleştirildiği için birim hücre yapısı oluşmamaktadır. Bu sebeple kare ve üçgen dizilerin yapıldığı saha uygulamalarında bant boşluklarını görmek mümkündür, sinüs ve dairesel dizimlerin uygulandığı saha uygulamalarında bant boşluklarını belirlemek mümkün değildir.



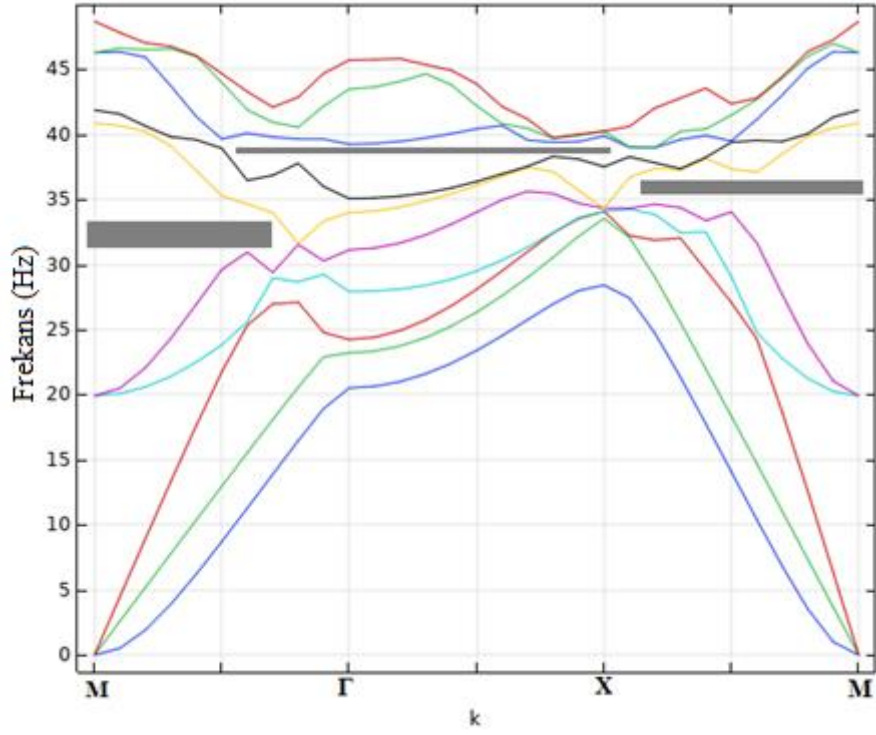
Şekil 2: Kare dizilim için oluşturulan birim hücre yapısı

Şekil 2'de olduğu gibi, kare kafes dizisi için dalga vektörleri, indirgenmiş Brillouin bölgesinin en yüksek simetrisinin M- $\Gamma$ -X-M yönleri boyunca değerlendirilir. Standart dalga denklemleri, yerçekimini ihmal ederek sismik dalga boylarında çözülebilir.



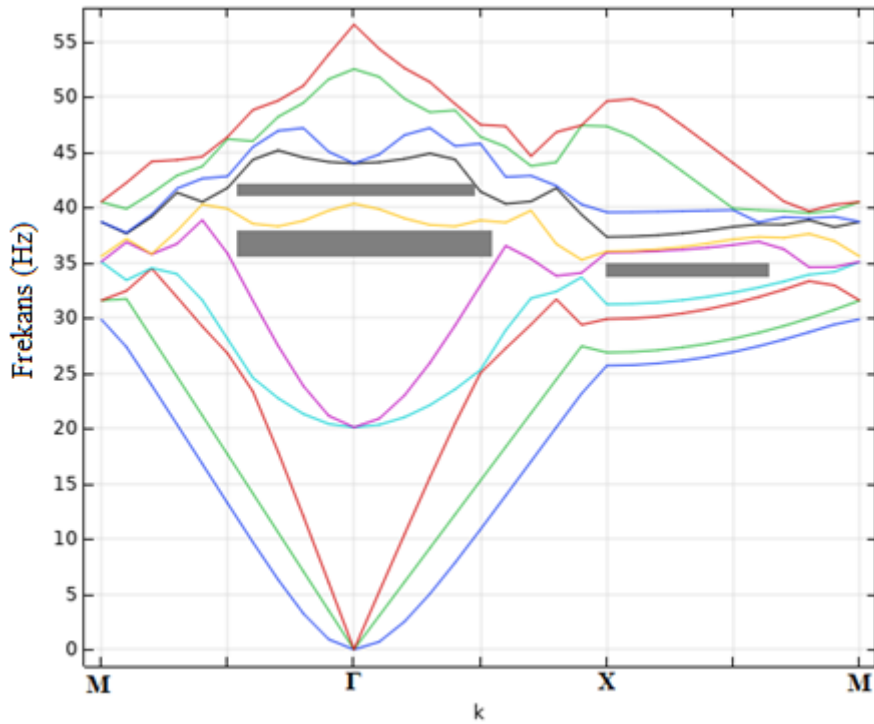
Şekil 3: Üçgen dizilim için oluşturulan birim hücre yapısı

Şekil 3'te oluşturulan yapıda vektör yönleri M- $\Gamma$ -X-M şeklinde ilerlemektedir. Burada COMSOL multifizik programında tanımlanan parametrelere bağlı olarak sinyallerin dağılım yönleri fiziksel olarak hesaplanmakta ve birim hücrelerin analizi sonucunda bant boşlukları görülebilmektedir.



Şekil 4. Kare dizilimde birim hücre yapısı için ortaya çıkan bant boşlukları

Şekil 4'te görüldüğü gibi kare kafes dizili çelik yapılar toprak bir alana yerleştirildiğinde, M- $\Gamma$ ,  $\Gamma$ -X ve X-M yönlerinde tam bant boşluğu olmamasına rağmen, kısmi ve sürekli bant boşlukları oluşmaktadır.



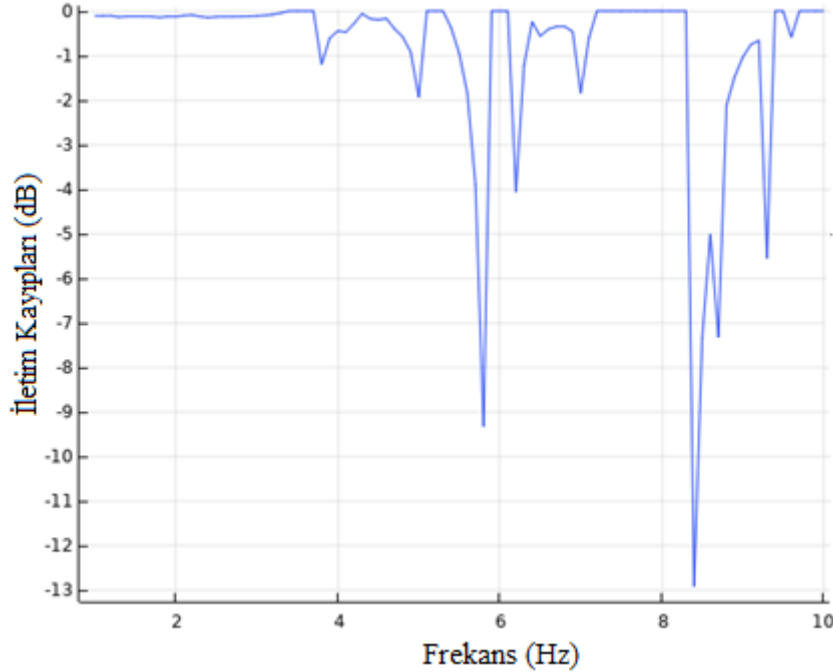
Şekil 5: Üçgen dizilimde birim hücre yapısı için ortaya çıkan bant boşlukları



Şekil 5'te gösterilen üçgen diziliminde çelik kazıkların yerleştirildiği alanda tam bir bant boşluğu olmadığı, ancak R-X ve X-M yönlerinde kısmi bant boşlukları olduğu görülmektedir. Bant yapısı üzerinde oluşan çizgilerin birbiriyle kesişmemesi bu boşlukları oluşturan unsurdur. Burada boşlukların oluşması, yüzey dalgalarının boşlukların olduğu yönlerde ilerleyemeyeceğini gösterir. Buradaki bant boşluklarının kısmi oluşumu, yüzey titreşimlerinin belirli frekans bölgelerinde sönmülenebileceğini göstermektedir.

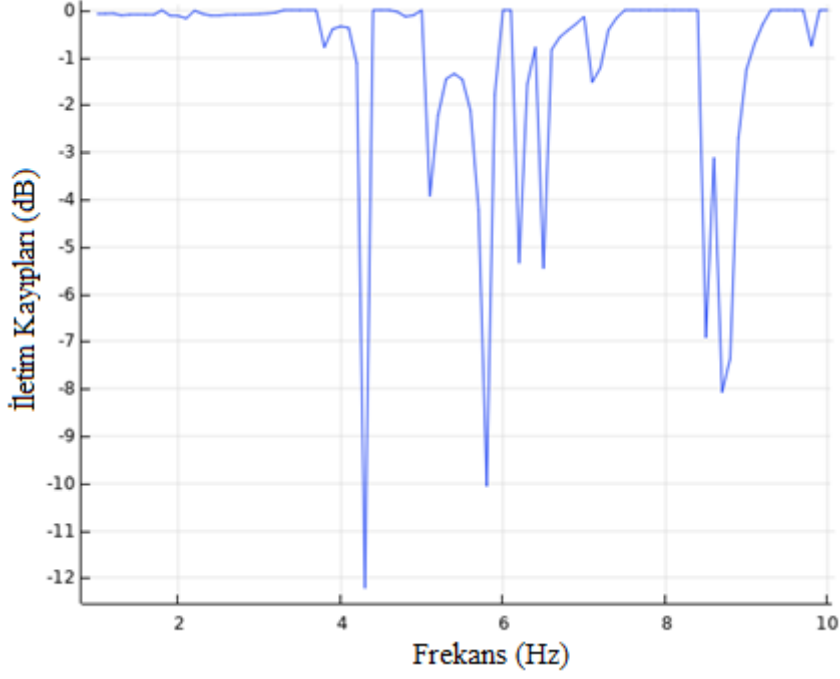
### 3. BULGULAR ve TARTIŞMA

Simülasyon çalışmalarının sonuçlarına göre bir ön değerlendirme yapıldığında, uygulanan saha yapılarının yüzey hareketliliğine karşı benzer davranışlar sergilediği görülmektedir. Ayrıca kare ve üçgen örgü dizilişleri ile saha uygulamalarının bant diyagramlarına baktığımızda, kısmi bant boşluklarının oluşması, yüzey dalgalarının belirli yönlerde yayılmasının kısıtlandığını ve sismik etkilerin azaltılabileceğini ortaya koymaktadır.



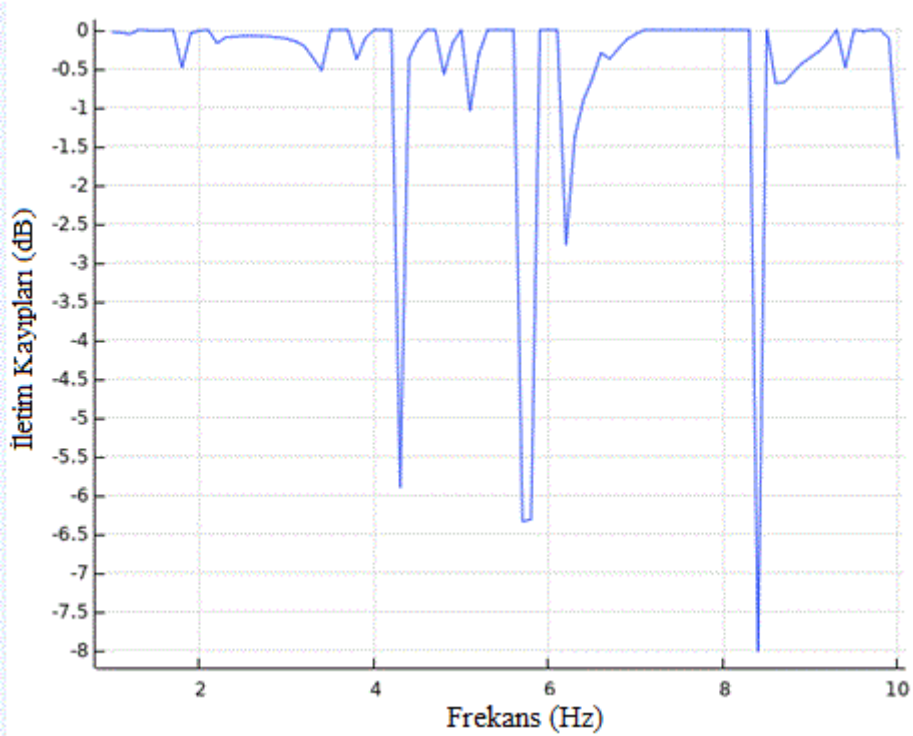
Şekil 6: Kare dizimli saha uygulamasında meydana gelen iletim kayıpları

Şekil 6'da gösterilen iletim grafiğine bakıldığında 5.8 Hz, 6.2 Hz ve 8.5 Hz değerlerinde iletim kayıplarının olduğu görülmektedir. Sismik iletimlerin bazı frekans noktalarında neredeyse tamamen engellendiği saptanmıştır.



Şekil 7: Üçgen dizimli saha uygulamasında meydana gelen iletim kayıpları

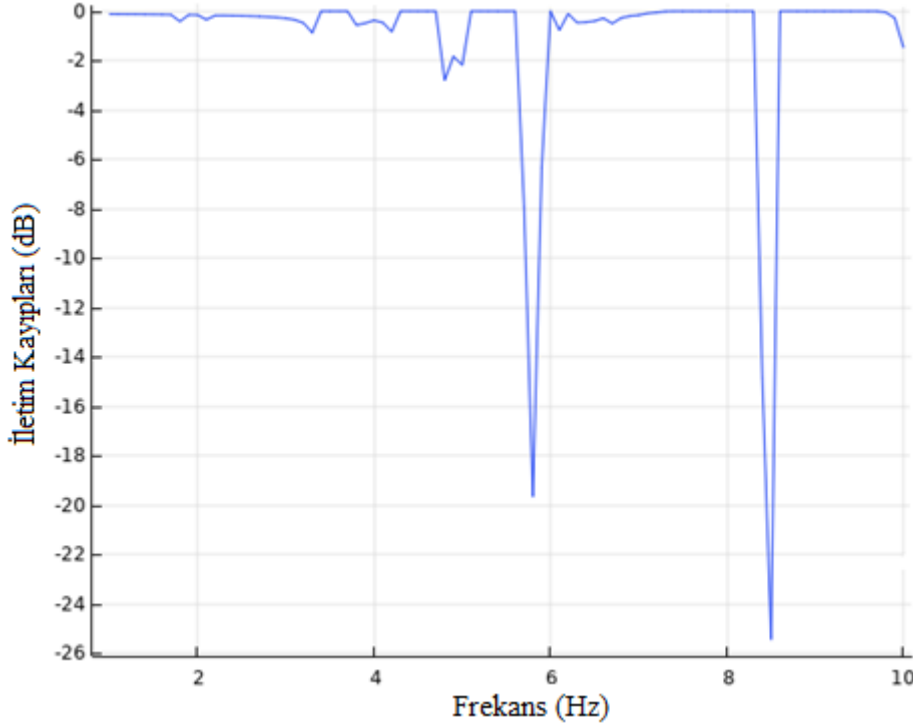
Şekil 7'de gösterildiği gibi üçgen diziliminde meydana gelen iletim kayıpları dikkate alındığında, sismik iletimlerin önemli frekans noktalarında kısıtlandığı görülmektedir. Ancak 4.3 Hz, 5.8 Hz ve 8.5 Hz frekans değerlerinde iletimin büyük ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. Kare dizilim ile karşılaştırıldığında daha çok noktada iletim kayıplarının meydana geldiği görülmektedir. Bu durum, sismik etkilere karşı üçgen dizilimin daha iyi olduğu fikrini ortaya çıkarmaktadır.



Şekil 8: Sinüs dizimli saha uygulamasında meydana gelen iletim kayıpları

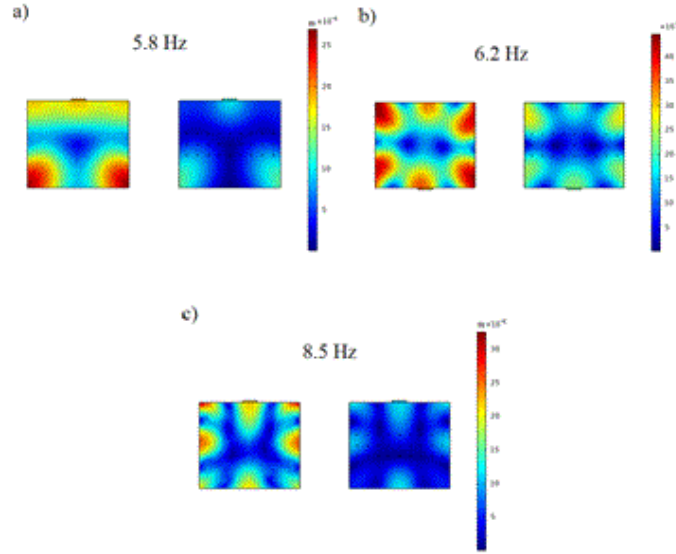


Şekil 8'de gösterilen iletim kayıpları değerlendirildiğinde sinüs diziliminde 4.3 Hz, 5.8 Hz, 6.2 Hz ve 8.5 Hz değerlerinde iletim kayıplarının meydana geldiği görülmektedir. Ancak frekans değeri arttıkça iletimde meydana gelen kısıtlamaların arttığı görülmektedir. Kare ve üçgen kafes yapılarla karşılaştırıldığında, iletim kayıplarının frekansa bağlı olarak düzenli bir artış göstermesi dikkat çekicidir. Ancak iletim kayıplarının kare ve üçgen dizilimlerine göre daha düşük desibel değerlerinde olduğu görülmektedir. Bu durumda, üçgen dizilim tipi şimdiye kadar yapılan ölçümlerde en iyi sonuçları sağlamaktadır.



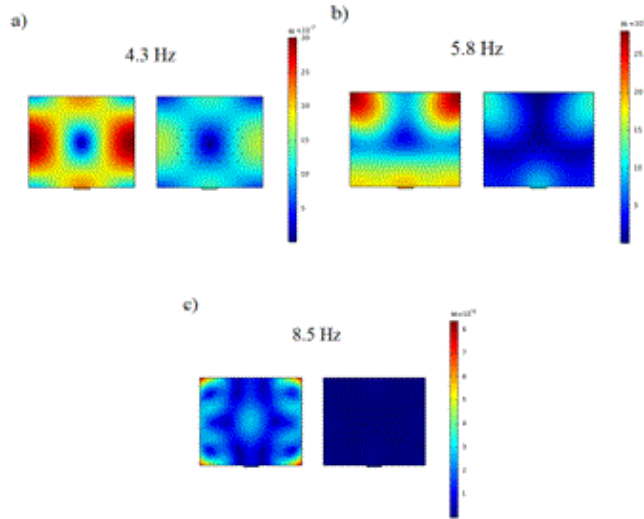
Şekil 9: Dairesel dizimli saha uygulamasında meydana gelen iletim kayıpları

Son olarak Şekil 9'da meydana gelen iletim kayıpları incelendiğinde 5.8 Hz ve 8.3 Hz değerlerinde iletim kayıplarının meydana geldiği görülmektedir. Tüm iletim grafikleri dikkate alındığında 5.8 Hz ve 8.5 Hz frekans değerlerinde çelik kazıkların kullanılması nedeniyle tüm alan dizilimlerinde iletimde kısıtlamalar meydana gelmektedir. Sabit özellikli çelik kazıklar kullanıldığında, tüm saha uygulamalarında ortak frekans noktalarında iletim kayıplarının meydana gelmesi dikkat çekicidir. Öte yandan, her dizilimde küçük farklılıklar olduğu ve sismik iletimin kesintiye uğratmak için en uygun alan diziliminin üçgen dizilim olduğu görülmektedir. Bundan dolayı dairesele dizilimde belirgin desibel kayıpları meydana gelse de sadece iki frekans değeri için bu düşüşlerin meydana gelmesi, üçgen dizilimli saha uygulamalarını daha ön plana çıkarmaktadır.



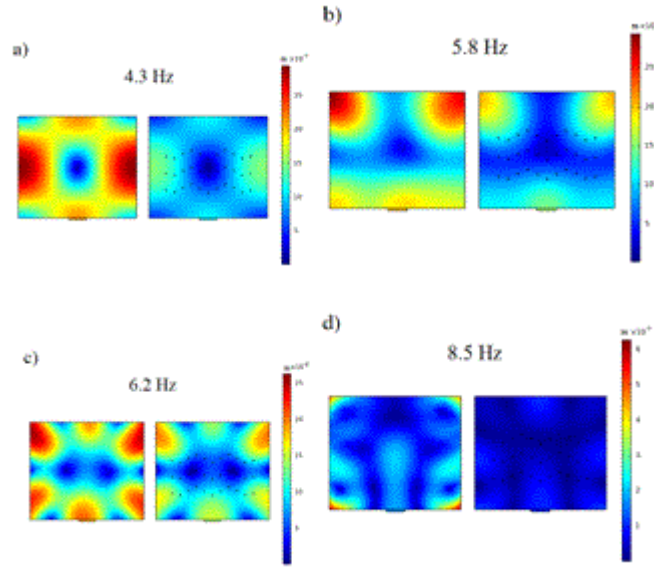
Şekil 10: Kare dizimli kazık yerleştirilmiş saha uygulamaları ile metalmalzemesiz saha uygulamaları arasındaki yer değiştirme farklılıkları a) 5.8 Hz, b) 6.2 Hz, c) 8.5 Hz

İletim grafiklerinde meydana gelen kayıplara bağlı olarak deplasman miktarı incelendiğinde, Şekil 10'da gösterildiği gibi, boş alan ile kazıkların yerleştirildiği alanlar arasında büyük farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Ek olarak, sismik etkiler bu üç frekans değerinde büyük ölçüde sınırlandırılmıştır.



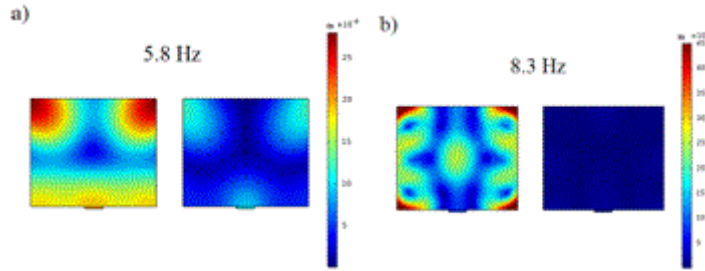
Şekil 11: Üçgen dizimli kazık yerleştirilmiş saha uygulamaları ile metalmalzemesiz saha uygulamaları arasındaki yer değiştirme farklılıkları a) 4.3 Hz, b) 5.8 Hz, c) 8.5 Hz

Şekil 11'de gösterilen deplasman miktarlarına bakıldığında, sinyallerin boş alanda önemli bir ilerleme gösterdiği ancak çelik çubuklarla desteklenen yapılarda kısıtlamalara maruz kaldığı görülmektedir. Burada değişim miktarının genel olarak boş alana göre 5.8 Hz ve 8.5 Hz değerlerinde azaldığı ve ayrıca 4.3 Hz gibi düşük bir frekans değerinde de yüzey dalgalarının ilerlemelerinin engellendiği söylenebilir.



Şekil 12: Sinüs dizimli kazık yerleştirilmiş saha uygulamaları ile metamazemesiz saha uygulamaları arasındaki yer değiştirme farklılıkları a) 4.3 Hz, b) 5.8 Hz, c) 6.2 Hz, d) 8.5 Hz

Şekil 12'de gösterilen deplasman miktarlarına bağlı olarak sinüs yapısının diğer yapılara göre daha fazla noktada iletimi sınırladığı görülmektedir. Ancak 4.3 Hz ve 8.5 Hz değerlerinde sismik yüzey dalgalarını tamamen emmeye yakın davrandığı tespit edilmiştir. Ancak iletim grafiklerinde görüldüğü gibi birçok noktada yüzey dalgalarının sınırlandırılmasına rağmen iletim kayıplarının miktarı desibel olarak düşük bulunmuştur.



Şekil 13: Dairesel dizimli kazık yerleştirilmiş saha uygulamaları ile metamazemesiz saha uygulamaları arasındaki yer değiştirme farklılıkları a) 5.8 Hz, b) 8.5 Hz

Şekil 13'te görüldüğü gibi, boş alan ile çelik kazıkların dairesel diziler halinde yerleştirildiği alanlar arasındaki geçişte bazı kısıtlamalar meydana geldiği söylenebilir. Ancak 5.8 Hz ve 8.5 Hz frekans değerlerinde elde edilen en iyi sonuçlar, bu frekanslardaki çelik kazıkların dört saha uygulamasının hepsinde sismik etkilerin önlenmesinde faydalı olabileceğini göstermektedir. Genel olarak, dairesel kafes dizisindeki iki frekans değerinde önemli düşüşler vardır. Ayrıca iletim kayıplarını içeren grafikler göz önüne alındığında, bu iki frekans değerinde diğer saha uygulamalarına göre daha büyük desibel kayıplarının olması önemli bir çiftidir.

## 5. SONUÇ

Yapılan simülasyon çalışmaları sonucunda çelik malzemelerle üretilecek kazıklı yapıların sismik etkilerin azaltılmasında etkili olabileceği sonucuna varılmıştır. Ancak 5.8 Hz ve 8.5 Hz gibi frekans değerlerinde önerilen çelik yapının saha yapıları farklı dizilerde olmasına rağmen fonksiyonel olarak çalışabileceği tahmin edilmektedir.

Genel olarak çelik malzemelerin yüksek maliyet ve zor işçilik uygulamaları getirdiği düşünüldüğünde, uygulanması zor olan bu tasarımları iyileştirme ihtiyacının gerektiği çalışmanın en bariz çıktısıdır. Öte yandan, alan hizalamaları açısından çok küçük farklılıklar, malzeme özelliklerinde de iyileştirmeler yapılması gerektiğini düşündürmektedir. Bu iyileştirmeler, çelik kazıkların geometrik şekil ve çap faktörlerinin artırılması yönünde veya kullanılan çelik malzemelerin fiziksel özellikleri bağlamında olmalıdır.

Nihai bir değerlendirme yapıldığında, çelik kazıkların sismik metamalzeme olarak kullanılmalarının en avantajlı sonuçları üçgen dizilimli sahada gösterdikleri belirlenmiştir. Burada üçgen dizilimin 5.8 Hz ve 8.5 Hz değerlerinde desibel kayıplarının dairesel örgü dışında diğer saha uygulamalarına göre daha fazla iletim kayıplarını meydana getirmesi ve yüzey yayılımlarına bakıldığında da dairesel örgü ve diğer uygulamalara göre daha fazla gerileme sağlaması çalışmanın en dikkat çekici unsurudur. Bu öncüller ışığında geniş frekans aralıklarında üçgen saha dizilimi tercih edilmesi sismik etkilerin azaltılmasına katkı sağlayabilir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından desteklenen UDAP-Ç-19-21 kodlu proje çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Yazarlar AFAD'a teşekkürü bir borç bilirler.

## KAYNAKLAR

Achaoui Y., Antonakakis T., Brule S., Craster R.V., Enoch S., Guenneau S., 2017. Clamped seismic metamaterials: ultra-low frequency stop bands, *New Journal of Physics* 19 (6), 063022

Brule S., Javelaud E., Guenneau S., Enoch S., Komatitsch, D., 2012. Seismic metamaterials, ETOPIM9 book abstract, S. Guenneau, S. Enoch, Sep 2012, Marseille, France. fhal-01343908

Casablanca O., Ventura G., Garesci F., Azzerboni B., Chiaia B., Chiappini M., Finocchio G., 2018. Seismic isolation of buildings using composite foundations based on metamaterials, *Journal of Applied Physics* 123 (17), 174903

Chen Y., Qian F., Scarpa F., Zuo L., Zhuang X., 2019. Harnessing multi-layered soil to design seismic metamaterials with ultralow frequency band gaps, *Materials and Design* 175, 107813

Du Q., Zeng Y., Huang G., Yang, H., 2017. Elastic metamaterial-based seismic shield for both Lamb and surface waves, *AIP Advances* 7 (7), 075015

Du Q., Zeng Y., Xu Y., Yang H., Zeng Z., 2018. H-fractal seismic metamaterial with broadband low-frequency bandgaps, *Journal of Physics D: Applied Physics* 51 (10), 105104

Dudchenko, A.V., Dias, D., Kuznetsov, S.V. 2021. Vertical wave barriers for vibration reduction. *Archive of Applied Mechanics*, 91(1), 257-276 doi 10.1007/s00419-020-01768-2

Geng Q., Zhu S., Chong K.P., 2018. Issues in design of one-dimensional metamaterials for seismic protection, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 107, 264-278

Kacin S., Ozturk M., Sevim U.K., et al., 2021. Seismic metamaterials for low-frequency mechanical wave attenuation, *Natural Hazards* 107, 213-229 doi 10.1007/s11069-021-04580-5

Kikuchi M., Black C.J., Aiken I.D., 2008. On the response of yielding seismically isolated structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 37 (5), 659-679

Kim, S., 2014. U.S. Patent Application No. 14/359, 338

Lott M., Roux P., Garambois S., Gueguen P., Colombi, A., 2020. Evidence of metamaterial physics at the geophysics scale: the METAFORÉ experiment, *Geophysical Journal International* 220 (2), 1330-1339

Mandal P., Somala S.N., 2020. Periodic pile-soil system as a barrier for seismic surface waves, *SN Applied Sciences* 2, 1-8

Mendhe S.E., Kosta Y.P., 2011. Metamaterial properties and applications, *International Journal of Information Technology and Knowledge Management* 4 (1), 85-89

Miniaci M., Krushynska A., Bosia F., Pugno N.M., 2016. Large scale mechanical metamaterials as seismic shields, *New Journal of Physics* 18 (8), 083041

Mu D., Shu H., Zhao L., An S., 2020. A Review of Research on Seismic Metamaterials, *Advanced Engineering Materials* 22 (4), 1901148

Prati E., 2006. Microwave propagation in round guiding structures based on double negative metamaterials, *International Journal of Infrared and Millimeter Waves* 27 (9), 1227

Shelar A., Thaker, M. 2019. Earthquake resisting structure using seismic cloaked foundation, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 06 (02), 2280-2285

Shelby R.A., Smith D.R., Schultz S., 2001. Experimental verification of a negative index of refraction, *Science* 292 (5514), 77-79

Veselago V.G., 2009. Energy, linear momentum and mass transfer by an electromagnetic wave in a negative-refraction medium, *Physics-Uspekhi* 52 (6), 649

Wagner P.R., Dertimanis V.K., Chatzi E.N., Antoniadis I.A., 2016. Design of metamaterials for seismic isolation, *In Dynamics of Civil Structures* 2, 275-287

Wagner P.R., Dertimanis V.K., Chatzi E.N., Beck J.L., 2018. Robust-to-uncertainties optimal design of seismic metamaterials, *Journal of Engineering Mechanics* 144 (3), 04017181

Yamamoto S., Kikuchi M., Ueda M., Aiken I.D., 2009. A mechanical model for elastomeric seismic isolation bearings including the influence of axial load, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 38 (2), 157-180