

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DEPREM MÜHENDİSLİĞİNDE SİSMİK META-MALZEMELER İLE
İZOLASYONLU BETONARME YAPILARIN SİSMİK DAVRANIŞLARININ
ARAŞTIRILMASI

Mehmet Furkan ÖZ

Danışman: Doç. Dr. Atila KUMBASAROĞLU

TEZ JÜRİ ÜYELERİ
Prof. Dr. Hakan YALÇINER
Doç. Dr. Atila KUMBASAROĞLU
Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ERZİNCAN, 2025

© 2025 [Mehmet Furkan ÖZ]. Tüm hakları saklıdır.

Kabul ve Onay Sayfası

Doç. Dr. Atila KUMBASAROĞLU danışmanlığında, Mehmet Furkan ÖZ tarafından hazırlanan bu çalışma 18/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Bilim Dalı'nda **Yüksek Lisans/Doktora Tezi** olarak kabul **oybirliği**/oy çokluğu (.../...) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU

İmza:

Üye : Prof. Dr. Hakan YALÇINER

İmza:

Üye : Doç. Dr. Atila KUMBASAROĞLU

İmza:

Yukarıdaki sonuç Enstitü Yönetim Kurulunun / / 20.... tarih ve/..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. Kemal Volkan ÖZDOKUR

Enstitü Müdür V.

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, şekil ve tabloların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

Bilimsel Etięe Uygunluk Sayfası

“Deprem mühendisliğinde sismik meta-malzemeler ile izolasyonlu betonarme yapıların sismik davranışlarının araştırılması” isimli “Yüksek Lisans” tezım tarafımca intihal tespit programı ile incelenmiştir. Buna göre tezimde bilimsel etik ihlali ve intihal olarak nitelendirilebilecek herhangi bir durum olmadığını taahhüt ederim.

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir biçimde elde edildiğini; aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiğı gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi beyan ederim. 18/06/2025

(İmza)

Mehmet Furkan ÖZ

ÖZET

DEPREM MÜHENDİSLİĞİNDE SİSMİK META-MALZEMELER İLE İZOLASYONLU BETONARME YAPILARIN SİSMİK DAVRANIŞLARININ ARAŞTIRILMASI

Mehmet Furkan Öz

**Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Atila KUMBASAROĞLU

2025, 47 sayfa

Türkiye, aktif fay hatlarının çevrelediği ve düzenli aralıklarla yıkıcı depremlerin yaşandığı bir deprem kuşağında yer almaktadır. Son yıllarda, belirli frekans aralıklarında sismik dalga yayılımını engelleyebilen sismik meta-malzeme sistemleri, deprem mühendisliğinde yenilikçi bir sismik izolasyon yaklaşımı olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada, meta-malzeme katkılı periyodik temellerin sismik enerjiyi sönmüleme performansı deneysel olarak araştırılmıştır. Deneysel sistemde, yatay doğrultuda 7.5 cm deplasman yapabilen, 0.75 kW gücünde servo motorla çalışan ve Arduino IDE yazılımı üzerinden programlanabilen bir sarsma masası kullanılmıştır. Titreşim hareketleri üç farklı adım sayısında (3000, 4000, 5000) oluşturulmuş ve her biri 20,667 saniye süresince test numunelerine uygulanmıştır. Üç farklı temel tipi oluşturulmuştur: (i) yalnızca betonarme plakalardan oluşan geleneksel temel, (ii) betonarme ve kauçuk plakalardan oluşan bir boyutlu periyodik temel ve (iii) piezoelektrik sensörlerle donatılmış bir boyutlu periyodik temel. Test numunelerinin üst yüzeylerine yerleştirilen ivmeölçerlerle 80 ms aralıklarla ivme verileri kaydedilmiştir. Kaydedilen veriler hem zaman (ivme-zaman) hem de frekans (Fourier dönüşümü) düzleminde analiz edilmiştir. Deneysel bulgular, meta-malzeme içeren periyodik temellerin geleneksel temellere kıyasla titreşim enerjisini daha etkili bir şekilde sönmlediğini ortaya koymuştur. Ayrıca piezo destekli sistemde titreşim etkisiyle 1.64 V düzeyine ulaşan elektriksel çıktı elde edilmiş, bu sayede enerji dönüşüm potansiyeli gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar, bu tür yapıların çok işlevli sismik izolasyon sistemlerine dönüştürülebileceğini ve düşük frekanslı titreşimlere karşı yüksek performans sunabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Deprem mühendisliği, Dinamik analiz, Meta-malzeme, Sarsma masası, Titreşim sönümleme.



ABSTRACT

INVESTIGATION OF SEISMIC BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES INSULATED WITH SEISMIC META-MATERIALS IN EARTHQUAKE ENGINEERING

Mehmet Furkan ÖZ

**Master's Thesis, Erzincan Binali Yıldırım University, Institute of Science and
Technology, Department of Civil Engineering**

Advisor: Doç. Dr. Atila KUMBASAROĞLU

2025, 47 pages

Turkey is located in an active seismic zone surrounded by fault lines and frequently experiences destructive earthquakes. In recent years, seismic meta-materials have emerged as an innovative isolation technique in earthquake engineering due to their ability to create frequency band gaps that block the propagation of seismic waves. In this study, the damping performance of periodic foundations incorporating meta-materials was experimentally investigated. A shaking table driven by a 0.75 kW servo motor capable of 7.5 cm horizontal displacement was used as the vibration source. The motion was controlled using Arduino IDE software. Three vibration profiles with step counts of 3000, 4000, and 5000 were applied to the test specimens, each for a duration of 20.667 seconds. Three types of foundations were tested: (i) a conventional foundation made of reinforced concrete plates, (ii) a one-dimensional periodic foundation composed of alternating rubber and concrete plates, and (iii) a piezoelectric sensor-integrated periodic foundation. Accelerometers placed on the upper surfaces of the specimens recorded acceleration data at 80-millisecond intervals. The recorded data were analyzed in both time (acceleration-time) and frequency (via Fourier Transform) domains. Experimental results revealed that the periodic foundations containing meta-materials significantly reduced vibration energy compared to the conventional system. Moreover, the piezo-supported system produced an electrical output of up to 1.64 V during vibration, indicating energy harvesting capability. These findings suggest that such systems can serve as multifunctional seismic isolation solutions and provide enhanced performance, particularly under low-frequency ground motions.

Keywords: Earthquake engineering, Dynamic analysis, Meta-material, Shaking table, Vibration attenuation.



TEŞEKKÜR

Tez süresince teknik bilgi ve tecrübelerini esirgemedi paylaşan danışman hocam sayın Atila KUMBASAROĞLU hocama, tez süresince yardımlarını esirgemeyen Ahmet Emre ÖZ hocama, tez süresince yardımlarını esirgemeyen sevgili aileme ve deneysel çalışmalar süresince yardımlarını esirgemeyen elektrik-elektronik Mühendisi Ahmet Mücahit SÜLÜK'E teşekkürü borç bilirim.

Mehmet Furkan ÖZ

HAZİRAN, 2025



İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tez Çalışmasının Amacı.....	2
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR.....	4
2.1. Sismik Meta-Malzemeler ve Fononik Kristaller.....	4
2.2. Piezoelektrik Malzemeler.....	5
2.3. Periyodik Yapı ve İzolasyon.....	6
2.3.1. Şehir ölçeğinde uygulanması.....	6
2.3.2. Bariyer olarak kullanım.....	7
2.3.4. Temel olarak uygulama.....	8
3. YÖNTEM.....	10
3.1. Deney Düzeneklerinin Genel Tanıtımı.....	10
3.2. Titreşim Kaynağı ve Sarsma Masası Tasarımı.....	12
3.3. Numune Hazırlıkları.....	15
3.4. DeneySEL Düzenek Konfigürasyonları.....	17
3.4.1. 1D Periyodik Temel.....	18
3.4.2. Geleneksel Temel.....	20
3.4.3. Piezo 1D Temel.....	21
3.5. Sensör Yerleşimi ve Veri Toplama Sistemi.....	23
3.6. Uygulanan Titreşim Protokolleri.....	25
3.7. Değerlendirme Metodolojisi.....	27
4. BULGULAR.....	29
4.1. Giriş.....	29
4.2. Periyodik Temel ve Geleneksel Temelin Karşılaştırılması.....	30
4.3. Piezoelektrik Etkinliği ve Voltaj Gözlemleri.....	36
4.4. Genel Yorum ve Değerlendirme.....	40

5. TARTIŞMA VE SONUÇ	42
5.1. Tartışma.....	42
5.2. Sonuç	43
KAYNAKÇA.....	44
ÖZGEÇMİŞ	47



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Beton ve kauçuk numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri	16
Tablo 2. Numunelere ait toplam katman yükseklikleri ve dinamik ölçüm parametreleri	18
Tablo 3. Piezoelektrik sensörlerin teknik özellikleri ve yerleşim detayları.	24
Tablo 4. Deney numunelerine uygulanan farklı temel türleri için titreşim parametreleri özeti	26
Tablo 5. 4000 adım sayısı ile elde edilen ivme karşılaştırması	33
Tablo 6. 3000 adım sayısı ile elde edilen ivme karşılaştırması	35
Tablo 7. Piezo Periyodik Temel ve Geleneksel Temel Sistemlerinin Maksimum ve Ortalama İvme (RMS) Değerlerinin Karşılaştırılması	39



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Periyodik temel sisteminin prensip şeması. Soldaki modelde geleneksel temele sahip yapılarda deprem dalgalarının doğrudan yapı tabanına iletildiği görülmektedir. Sağda ise periyodik temel sisteminde, fononik kristaller aracılığıyla oluşturulan bant boşlukları sayesinde belirli frekanslardaki dalgaların yayılımı engellenerek yapı içerisine iletilmeden sönümlendiği ifade edilmektedir.	2
Şekil 2. Xiang vd. (2012) tarafından gösterilen periyodik ve periyodik olmayan ortamlardaki dalga yayılım farkı.....	4
Şekil 3. Deney düzeneğindeki titreşim hareketini sağlamak amacıyla kullanılan 0,75 kW gücündeki servo motor ve sürücü sistemi.....	10
Şekil 4. Deney düzeneğinde titreşim tepkilerini ölçmek amacıyla kullanılan ADXL345 model üç eksenli ivmeölçer.	11
Şekil 5. İvmeölçer sensörlerden alınan verilerin işlenmesini ve kayıt altına alınmasını sağlayan Arduino Mega 2560 mikrodenetleyici kart.	11
Şekil 6. Deney sistemini oluşturan temel bileşenler ile Arduino-IDE tabanlı kontrol sisteminin şematik akış diyagramı.	13
Şekil 7. Titreşim kaynağı olarak kullanılan servo motor, lineer hareket modülü, çelik tabla ve test numunesi ile birlikte sarsma masası sisteminin şematik gösterimi.	14
Şekil 8. a) Deney düzeneğinde kullanılan sarsma masasının genel bağlantıları ve donatı görünümü, b) Sarsma masasına yerleştirilmiş test numunesinin deney öncesi görünümü.	14
Şekil 9. Deney numuneleri, a.) ve d.) beton dökümü kür aşaması b.) kür sonrası test numune hazırlama öncesi c.) kauçuk istenilen boyutta kesim sonrası	16
Şekil 10. Bir boyutlu (1D) sistemin temsili şematik gösterimi	18
Şekil 11. 1D periyodik temel, geleneksel temel ve piezoelektrik donatılı periyodik temelin şematik yerleşimleri.....	18
Şekil 12. 1D Meta-Malzeme periyodik temel, kauçuk ve beton katmanlarından oluşmaktadır. Servo motor, kontrol ünitesi ve ivmeölçerin bilgisayara bağlantı düzeneği	19
Şekil 13. Geleneksel temel, beton bloktan oluşmaktadır. Servo motor, kontrol ünitesi ve ivmeölçerin bilgisayara bağlantı düzeneği	21
Şekil 14. Piezoelektrik sensörlerin SBR kauçuk katmanlara gömülü yerleşimi ve harici bağlantı hazırlığı.	22

Şekil 15. a.) kauçuk tabaka içine gömülü piezoelektrik sensörlerin yerleşimi ve kablolaması	
b.) periyodik temel sistemine entegre piezoelektrik sensörlerle donatılmış piezo periyodik temel genel görünümü.	23
Şekil 16. Piezo sensör yerleşimi, iki kauçuk katmana 10 cm aralıklarla yerleştirilmiş, her bir kauçuk katmanda 9 tane olmak üzere test numunesinde toplamda 18 adet sensör kullanılmıştır.....	25
Şekil 17. Deneysel süreçte elde edilen titreşim kaynaklı ivme verilerinin analizine ilişkin genel veri değerlendirme akış şeması.	29
Şekil 18. 1D periyodik temel ve geleneksel temelin ivme tepki çıktılarının karşılaştırılması .	31
Şekil 19. 1D periyodik temel ve geleneksel temelin frekans alanında fourier genlik değerleri karşılaştırma	32
Şekil 20. Enerji akış karşılaştırma	33
Şekil 21. 1D periyodik temel ve geleneksel temelin ivme tepki çıktılarının karşılaştırılması .	34
Şekil 22. 1D periyodik temel ve geleneksel temelin frekans alanında fourier genlik değerleri karşılaştırma	35
Şekil 23. a.) 20 saniye süren titreşim altında piezo sensörlerinden okunan maksimum volt değeri b.) Durgun halde piezo sensörlerinden okunan maksimum milivolt değeri.....	37
Şekil 24. Piezo periyodik temel ve geleneksel temelin ivme tepki çıktılarının karşılaştırılması	38
Şekil 25. Piezo periyodik temel ve geleneksel temelin frekans alanında fourier genlik değerleri karşılaştırma	39

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

TBDY 2018	Türkiye bina deprem yönetmeliği 2018
DD-1	Deprem yer hareketi, spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %2 ve buna karşı gelen tekrarlanma periyodunun 2475 yıl olduğu çok seyrek deprem yer hareketini nitelemektedir.
DD-2	Deprem yer hareketi, spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %10 ve buna karşı gelen tekrarlanma periyodunun 475 yıl olduğu seyrek deprem yer hareketini nitelemektedir.
Piezo	Piezoelektrik sensörlerini
1D Periyodik Temel	Bir boyutlu periyodik temel
Kw	Kilowatt
Kg	Kilogram
Cm	Santimetre
Mm	Milimetre
İDE	Tümleşik geliştirme ortamı
SBR	Stiren bütadien kauçuk
TS EN 206	Türk Standartları 206
TS 500	Türk Standartları 500
f_{ck}	Beton karakteristik basınç dayanımı
Mpa	Megapaskal
G	Yer çekim ivmesi
Ms	Milisaniye
μs	Mikrosaniye
RMS	Karekök ortalama
V	Volt

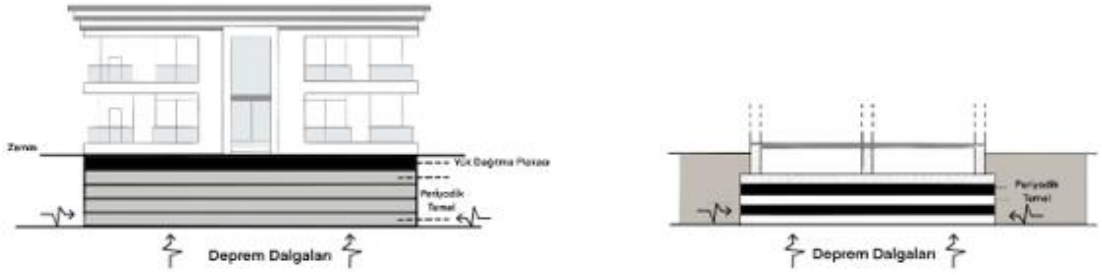
1. GİRİŞ

Türkiye, sismotektonik özellikleri gereği aktif fay hatlarının yoğun olarak bulunduğu, bu nedenle de periyodik aralıklarla yıkıcı depremler yaşama potansiyeli yüksek bir coğrafyada yer almaktadır. Bu durum, yapı güvenliğini sağlamaya yönelik ileri düzey mühendislik çözümlerine olan ihtiyacı sürekli gündemde tutmaktadır. Depremlerin neden olduğu can ve mal kayıplarının önüne geçilmesi için inşaat mühendisliği literatüründe geleneksel yöntemlerin ötesine geçerek yenilikçi ve disiplinler arası çözümlerin geliştirilmesi kaçınılmaz hâle gelmiştir.

TBDY 2018 (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği), deprem yer hareketi düzeylerini tanımlayarak, yapıların kullanım amaçlarına göre kabul edilebilir hasar sınırlarını belirlemektedir. Seyrek gerçekleşen ve büyük etkilere sahip DD-1 düzeyindeki depremlerde, yapının göçmeden önce yüksek hasar almasına izin verilirken, DD-2 düzeyinde daha onarılabilir ve sınırlı düzeyde yapısal hasarlar kabul edilmektedir. Ancak, büyük depremlerin zamanının önceden bilinemez oluşu ve bu tür hasarların yaygın şekilde yaşanması durumunda, şehir planlaması ve yapı güvenliği açısından ciddi yönetimsel ve ekonomik karmaşalar ortaya çıkabilmektedir. Bu bağlamda, yapıların herhangi bir yapısal hasara maruz kalmadan, gelen sismik enerjiyi doğrudan sönmüleyebilecek yeni nesil izolasyon tekniklerinin geliştirilmesi mühendislikte güncel ve öncelikli bir araştırma konusudur.

Bu tez çalışmasında, enerji yayılımını engelleme özelliğine sahip sismik meta-malzemeler, özellikle fononik kristaller, bu yeni nesil yaklaşımların temelini oluşturmaktadır. Bu tür malzemeler, belirli frekans aralıklarında bant boşlukları (band gaps) oluşturarak sismik dalgaların yayılımını fiziksel olarak sınırlandırabilmekte, böylece deprem enerjisi yapıya ulaşmadan önce filtrelenebilmektedir. Bu prensip, yapı temellerine entegre edilebilecek periyodik yapı tasarımları ile fiziksel olarak somutlaştırılabilir.

Şekil 1’de temsili olarak gösterilen periyodik temel sisteminde, geleneksel temel sisteminde olduğu gibi sismik dalgalar doğrudan üst yapıya iletilmemekte, bunun yerine belirli frekans aralığındaki dalgalar, meta-malzeme özellikleri sayesinde yapıya ulaşmadan önce sönmülenmekte veya yön değiştirmeye zorlanmaktadır.



Şekil 1. Periyodik temel sisteminin prensip şeması. Soldaki modelde geleneksel temele sahip yapılarda deprem dalgalarının doğrudan yapı tabanına iletiildiği görülmektedir. Sağda ise periyodik temel sisteminde, fononik kristaller aracılığıyla oluşturulan bant boşlukları sayesinde belirli frekanslardaki dalgaların yayılımı engellenerek yapı içerisine iletilmeden sönümlendiği ifade edilmektedir (Kushwaha ve diğ., 1993; Casablanca ve diğ. 2018).

Tezin ilk kısmında, bu tür periyodik yapıların fiziksel davranışları, frekans bant boşluğu oluşturma kapasitesi ve zemin-yapı etkileşimi üzerindeki etkileri literatür odaklı olarak değerlendirilmiştir. Ardından, piezoelektrik sensörler kullanılarak sismik yükler altındaki titreşimlerin elektriksel sinyallere dönüştürülmesi yoluyla hem izleme hem de enerji geri kazanımı amacıyla kullanılabilirliği deneysel olarak araştırılmıştır. Böylece, metamatzemelere dayalı yeni nesil izolasyon sistemlerinin yalnızca hasar önleme değil, aynı zamanda aktif veri toplama ve sürdürülebilir enerji kullanımı açısından da potansiyeli ortaya konmuştur.

1.1. Tez Çalışmasının Amacı

Klasik mühendislik yaklaşımında, yapıların sünek davranış sergileyerek belirli bölgelerde hasar alması gözetilmekte, bu sayede deprem enerjisinin yapının içinde sönümlenmesi hedeflenmektedir (Blandon vd., 2005). Bu yaklaşım, yapının tamamen göçmesini önlemeye yönelik olsa da, yapıların onarılamaz hasar alması durumunda ekonomik ve sosyal yük oluşturmaktadır.

Bu çalışma kapsamında ise, sünek davranış yerine yıkıcı etkilerin tamamen ortadan kaldırılması hedeflenmiştir. Özellikle periyodik yapılarla tasarlanan temellerin, belirli frekans aralığındaki sismik dalgaları bant boşlukları içerisinde engelleyerek yapıların daha düşük ivme ve yer değiştirme değerleriyle karşılaşmasını sağladığı birçok deneysel ve analitik çalışmada doğrulanmıştır (Witarto vd., 2019; Yan vd., 2013; Brule vd., 2014; Miniaci vd.,

2016). Bu düşük dinamik tepkiler, yapıdaki potansiyel hasarın en aza indirgenmesini mümkün kılmaktadır (Chopra, 2015).

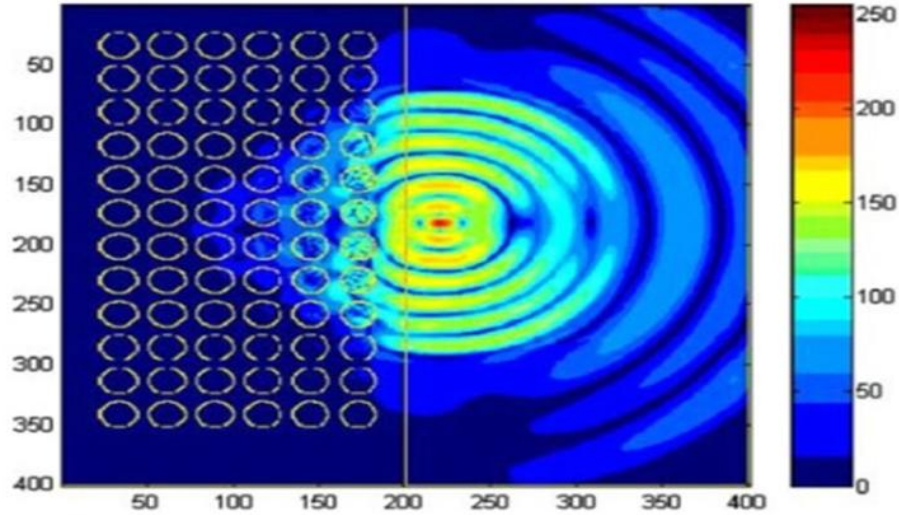
Tezin temel amacı, meta-malzemelere dayalı periyodik temel modelleri geliştirerek yapıların yapısal ve yapısal olmayan elemanlarının zarar görmeden deprem enerjisini sönümlemesini sağlamaktır. Bununla birlikte, piezoelektrik sensörler aracılığıyla titreşimlerin elektriksel sinyallere dönüştürülmesi yoluyla, sistemin pasif bir izolasyon sisteminden öteye geçerek aktif izleme ve enerji toplama mekanizmalarına da hizmet edebileceği gösterilmiştir. Böylece, bu tez çalışması ile deprem mühendisliğine yönelik yeni birçok işlevli izolasyon yaklaşımı önerilmektedir.



2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

2.1. Sismik Meta-Malzemeler ve Fononik Kristaller

Meta-malzemeler geleneksel malzemelerin sahip olduğu fiziksel özelliklerin ötesinde, negatif etkin Bulk modülüne sahip olmasıdır (Seçgin, Baygün (2019)). Meta-malzemelerin alt sınıfı olan fononik kristaller, periyodik olarak tekrarlanan, fiziksel ve elastik özellikleri farklılık gösteren malzemelerden oluşan yapılardır. Kullanılan malzemelerin elastiklik farklılıkları ve periyodik yapıları dolayısı ile dalgaların yapı içerisinde ilerlemesine izin vermeyen bant boşlukları oluşturmaktadır (Atasever (2019)). Xiang vd. (2012) yaptıkları çalışmada periyodik yapıların frekans bant boşlukları sayesinde dalga iletimini engellediği görsel Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Xiang vd. (2012) tarafından gösterilen periyodik ve periyodik olmayan ortamlardaki dalga yayılım farkı

Meta-malzemelerin dalga yayılımını kontrol etme potansiyeli, ilk olarak Sigalas vd. (1992) tarafından katı malzemeye periyodik olarak yerleştirilen küre dizileri üzerinde yapılan çalışmayla ortaya konmuştur. Bu çalışmada, malzeme yoğunluğuna bağlı olarak elektromanyetik dalgaların belirli frekans bantlarında iletilemediği gösterilmiş ve bu bulgu, yalnızca elektromanyetik değil, akustik ve elastik dalgalar için de benzer bant boşluğu etkilerinin araştırılmasına öncülük etmiştir. Ardından, Kushwaha vd. (1993) tarafından farklı elastik özelliklere sahip iki malzeme ile oluşturulan periyodik kompozit yapılar üzerinde

yapılan çalışmada, akustik bant boşluklarının oluşabileceği deneysel ve teorik olarak gösterilmiştir. Benchabane vd. (2005) ise fononik kristallerde oluşturulan dalga kılavuzu aracılığıyla, gelen akustik dalgaların yönünün değiştirilebildiğini ve geri yansıtılabildiğini deneysel olarak ortaya koymuştur. Bu kapsamda, akustik ve ses dalgalarının iletimini sınırlayan veya yönlendiren sistemlerin temelleri atılmıştır.

Ses dalgalarının zayıflatılması üzerine yapılan çalışmalar arasında, Sanchez-Perez vd. (1998) rijit silindirlerin iki boyutlu ve farklı geometrik dizilimler altında ses dalgalarını nasıl zayıflatıldığını deneysel olarak göstermiştir. Benzer şekilde, Montero vd. (1998) tarafından yürütülen araştırmalarda, iki boyutlu kompozit yapılar kullanılarak yüksek frekanslı (ultrasonik) bant aralıklarının varlığı kanıtlanmıştır. Bu çalışmaların ardından, Pennec vd. (2010) yoğunluk, elastisite modülü, geometrik dizilim ve doldurma oranları gibi fiziksel ve yapısal parametrelerin fononik kristallerin bant yapısı üzerindeki etkisini detaylı biçimde incelemiş; ses kontrolü, negatif kırılma ve enerji odaklama gibi mühendislik uygulamaları için temel oluşturacak sonuçlara ulaşmıştır. Daha ileri düzeyde, Khelif vd. (2015) belirli geometrik alanlarda ve sınır koşullarında desteklenen fononik kristallerin farklı kombinasyonlarla oluşturduğu bant boşluklarının genişliği ve frekans aralıklarını etkileyen temel faktörleri incelemiştir. Son olarak, Chen vd. (2019) düzenli olmayan (düzensiz) ve yarı periyodik yapıya sahip tek boyutlu fononik kristallerin dahi bant boşlukları oluşturabileceğini deneysel olarak ortaya koymuş; bu da karmaşık yapıli sistemlerin de fononik performans gösterebileceğini kanıtlamıştır.

2.2. Piezoelektrik Malzemeler

Piezoelektrik malzemeler kullanılarak oluşturulan periyodik yapıların frekans bant boşlukları oluşturdukları yapılan çalışmalarda gösterilmiştir. Hou vd. (2004) iki boyutlu piezoelektrik malzeme ile oluşturulan fononik kristallerin elastik özellikleri ve bant yapısı üzerinde piezoelektrik etkisini göstermişlerdir. Zou vd. (2008) iki boyutlu piezoelektrik periyodik yapının frekans bant aralıklarını etkileyen faktörleri incelemişlerdir. Robillard vd. (2009) manyetoelastik bileşenlerden oluşan fononik kristallerin harici manyetik alan uygulayarak fononik kristallerin özelliklerinin, bant yapısının, değişebildiğini göstermişlerdir.

2.3. Periyodik Yapı ve İzolasyon

Periyodik yapıların frekans bant boşluğu (band gap) oluşturma özellikleri başlangıçta elektromanyetik, akustik ve ses dalgaları üzerinde test edilmiş ve bu alanlarda başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen bu bulgular, benzer fiziksel prensiplerin sismik dalgalar için de geçerli olabileceği fikrini doğurmuş ve bu doğrultuda yeni nesil sismik izolasyon yöntemlerinin geliştirilmesine öncülük etmiştir. Özellikle belirli frekans aralıklarında dalga yayılımını engelleyebilen bu yapılar, geleneksel sismik yalıtım sistemlerine alternatif olarak değerlendirilmekte ve düşük frekanslı yüzey dalgaları üzerinde yüksek sönümlerle performansı göstermektedir.

Bu bağlamda, sismik meta-malzeme temelli periyodik yapıların izolasyon uygulamaları literatürde genellikle üç ana strateji altında sınıflandırılmaktadır:

- (i) şehir ölçeğinde, toprağın geniş bir bölümüne yerleştirilen sistemlerle bölgesel izolasyon sağlanması,
- (ii) yapı çevresine entegre edilen dalga bariyerleri ile lokal koruma elde edilmesi,
- (iii) yapı temeline entegre edilen periyodik katmanlar ile doğrudan taşıyıcı sistem düzeyinde sismik yalıtım sağlanması.

Bu alt yaklaşımlar, sismik dalgaların hem yayılmadan önce bastırılması hem de yapıya ulaşsa dahi etkisinin azaltılması gibi çok yönlü avantajlar sunmakta olup, izleyen alt başlıklarda detaylı olarak ele alınmıştır.

2.3.1. Şehir ölçeğinde uygulanması

Sismik meta-malzeme temelli izolasyon sistemlerinin şehir ölçeğinde uygulanması, yapı bazlı yalıtımın ötesine geçerek bölgesel sismik koruma sağlamayı hedefleyen yenilikçi bir yaklaşımdır. Bu yaklaşımda, toprağın üst katmanlarına yerleştirilen geniş alanlı periyodik yapılar veya rezonatör dizileri ile sismik dalgaların yayılımı, yapılaşma bölgesine ulaşmadan önce bastırılmaya çalışılmaktadır. Özellikle S-dalgaları gibi kayma dalgalarının frekans bandında oluşturulan durdurma bölgeleri sayesinde, bu dalgaların şehir dokusuna nüfuz etmesi engellenebilir.

Bu kapsamda Finocchio vd. (2014) tarafından önerilen izokron osilatör tabanlı sistem, yuvarlanabilen kürelerden oluşan matris yapıların toprağın son katmanına yerleştirilmesini esas almaktadır. Bu modelde, kürelerin rezonans özellikleri sayesinde belirli frekanslardaki dalga bileşenleri filtrelenebilmekte ve böylece zemin amplifikasyonunun önemli ölçüde azaltılabileceği gösterilmektedir. Söz konusu osilatör dizisi, geniş bir bölgeye entegre edilerek, şehir ölçeğinde pasif bir sismik izolasyon katmanı oluşturma potansiyeli sunmaktadır.

Benzer şekilde, Achaoui vd. (2016) tarafından geliştirilen bir diğer modelde, demir kürelerden oluşan periyodik diziler, elastomer (kauçuk) bağlantılarla birbirlerine bağlanmış ve bu yapıların sismik izolasyon üzerindeki etkileri analitik olarak değerlendirilmiştir. Yapılan analizler, bu dizilerin belirli frekans bantlarında dalga yayılımını büyük ölçüde sınırlandırabildiğini ortaya koymuştur. Ancak çalışmanın yazarları, bu tür sistemlerin yüksek maliyet, karmaşık montaj süreçleri ve yeraltı altyapılarla çakışma riski gibi pratik sınırlamaları nedeniyle, mevcut inşaat mühendisliği uygulamalarında doğrudan kullanılabilirliğinin kısıtlı olabileceğini de ifade etmiştir.

2.3.2. Bariyer olarak kullanım

Deprem mühendisliğinde yapı temellerinden önce dış ortamda sismik dalgaların zayıflatılması amacıyla geliştirilen bariyer temelli uygulamalar, özellikle yüzey dalgalarının yayılımını sınırlayan fiziksel düzeneklerin kullanımına dayanmaktadır. Çelebi vd. (2009) tarafından yürütülen öncü çalışmalarda, dalga bariyerlerinin zemin-yapı etkileşimi üzerindeki etkisi deneysel olarak analiz edilmiş; içi boş, su ile dolu, betonla dolu ve bentonit dolgu dört farklı bariyer tipi yatay ve düşey yer değiştirme bileşenleri üzerinden karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, dolgu türüne göre zemin tepkisinin değiştiği, özellikle bentonit gibi viskoelastik malzemelerin sönüm kapasitesinin daha yüksek olduğu gösterilmiştir. Bu yaklaşım, klasik toprak dolgu bariyerlerinden farklı olarak malzeme türü ve düzeninin sismik performansı doğrudan etkileyebileceğini göstermesi açısından önemlidir.

Bariyerlerin geometrik tasarımı ve dizilim düzeni üzerine yapılan daha ileri çalışmalar, sismik meta-malzeme mantığının doğrudan uygulandığını göstermektedir. Örneğin, Kaçın vd. (2021), üçgen örgü yapısında düzenlenmiş silindirik deliklerin analitik ve deneysel olarak zemin ile meta-malzeme arasındaki etkileşimi nasıl değiştirdiğini incelemiş; bu yapıların

belirli frekans bantlarında gelen titreşim dalgalarını bastırabildiğini göstermiştir. Miniaci vd. (2016) ise fononik kristallerin mekanik özelliklerini esas alarak, toprak ortamla birlikte çalışan dikey boşluklardan oluşan bir sistem geliştirmiştir. Bu sistem, yapı etrafında belirli bir mesafeye yerleştirilen dikdörtgen kesitli boşluk dizileriyle düşük frekanslı sismik dalgaların yön değiştirmesini ve zayıflamasını sağlamıştır. Bu iki çalışmanın ortak noktası, bariyerlerin geometrik rezonans ilkesiyle çalıştığını ve yapıdan uzakta bile sismik izolasyon etkisi oluşturabildiğini göstermesidir.

Saha uygulamaları ve doğal ortamlarda gözlenen zayıflama fenomeni üzerine yapılan çalışmalar da literatüre önemli katkılar sunmaktadır. Brule vd. (2014), Fransa'da yerinde yürüttükleri saha deneyinde, sismik meta-malzemelerden oluşan dikey delik dizileriyle yapay sarsıntılar oluşturarak öncesi-sonrası zemin tepkilerini kıyaslamış ve enerji haritalarıyla sönüm etkinliğini doğrudan ölçmüştür. Achaoui vd. (2017) tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada ise, sıkıştırılmış dairelerden oluşan periyodik diziler ile elastik tabaka modellenmiş ve Rayleigh dalgalarının bu bariyerlerde yansıtıldığı gösterilmiştir. Özellikle kaya tabanına ankrajlı beton kolonların oluşturduğu sınır koşullarında sıfır frekanslı durdurma bantlarının oluştuğu belirtilmiştir. Colombi vd. (2016), bu konsepti doğaya taşıyarak ormanlık alanlardaki ağaçların alt dalga boylarında rezonatör gibi davranabileceğini deneysel olarak göstermiş, Krödel vd. (2015) ise rezonatör içeren silindirik tüplerin öz-frekanslarının ayarlanmasıyla geniş bantlı sönüm sağlanabileceğini önermiştir. Son olarak, Finocchio vd. (2014), yuvarlanan kürelere dayalı izokron osilatörlerden oluşan bir matris yapı ile toprağın üst katmanındaki dalga amplifikasyonunu kontrol altına alarak, özellikle S-dalgalarının yayılımını bastırabilecek alternatif bir sismik filtreleme yaklaşımı sunmuştur.

2.3.4. Temel olarak uygulama

Taşıyıcı sistem düzeyinde sismik yalıtım sağlayan periyodik temel uygulamaları, meta-malzemelerin dalga saçılımı (Bragg) ve/veya lokal rezonans prensiplerini doğrudan yapı temeline entegre ederek düşük frekanslı yer hareketlerini bastırmayı amaçlar. Güncel literatür bu konsepti, tek boyutlu (1D), iki boyutlu (2D) ve üç boyutlu (3D) düzenekler üzerinden deneysel, analitik ve sayısal çalışmalarla incelemiştir.

Xiang vd. (2012), yoğunlukları farklı beton-kauçuk katmanlardan oluşan 1D periyodik bir temel tasarlayarak laboratuvar ölçekli sarsma masası testlerinde dinamik tepkide $\approx$ %50

sönümleme elde etmiş ve malzeme erişilebilirliği açısından konseptin inşaat pratiğine uyarlanabilirliğini vurgulamıştır. Benzer bir yaklaşımı daha karmaşık birim hücre ile genişleten Yan vd. (2013), çekirdeği sünek dökme demir, ara katmanı kauçuk ve dış çeperi beton olan 2D periyodik temelleri hem yatay (x) hem düşey (z) yönde tekrarlamış; uygulanan üç farklı titreşim profilinde sönüm oranlarının frekans içeriğine bağlı olarak %30–60 aralığında değiştiğini göstermiştir. Aynı araştırma grubu, Yan vd. (2015) çalışmasında bu konsepti 3D geometriye taşıyarak daha büyük dalga boylarını hedeflemiş ve çok eksenli sarsma testleriyle etkinliğin hacimsel periyodisiteye de taşınabileceğini kanıtlamıştır.

Sistem davranışının reaktör benzeri kritik yapılarda da geçerli olabileceğini göstermek üzere, Witarto vd. (2018) küçük ölçekli bir nükleer reaktör modeline 1D periyodik temel entegre etmiş ve ivme-zaman ölçümlerinde belirgin sönümleme etkisi rapor etmiştir. Ardından Witarto vd. (2019), lokal rezonans ile Bragg saçılmasını aynı analitik çerçevede karşılaştırmış; Bragg esaslı 3D periyodik temel tasarımının ivme ve yer değiştirme talebini her iki ekseninde de bastırmada daha verimli olduğunu deneysel olarak doğrulamıştır. Casablanca vd. (2018) ise periyodik temelli prototip konstrüksiyonlarda deplasman kontrolü odaklı testler gerçekleştirmiş; zemin-yapı ara yüzünde kayma ve dönme bileşenlerinin belirgin şekilde azaldığını ortaya koymuştur.

Yapısal parametrelerin bant boşluğu karakteristikleri üzerindeki etkisine ilişkin kapsamlı analitik çalışmalar da konuya ışık tutmaktadır. Jia ve Shi (2010), 2D periyodik temellerde elastisite modülü, yoğunluk kontrastı ve doldurma oranının bant boşluğu genişliği ile merkezi frekansı nasıl etkilediğini parametrik olarak incelemiştir. Bao vd. (2012) ise 1D sistemlerde katman kalınlığı ve dalga geliş açısının bant yapısına duyarlılığını araştırmış; katman kalınlığının artırılmasının düşük frekans bandının genişlemesine, geliş açısındaki artışın ise bant konumunun kaymasına neden olduğunu göstermiştir.

Bu çalışmaların ortak sonucu, periyodik temellerin malzeme kontrastı, geometrik ölçek ve dizilim düzenine bağlı olarak yer hareketinin baskın frekans bileşenlerini filtreleyebildiği ve yapı tepkisini anlamlı ölçüde azaltabildiğidir. Tez kapsamında gerçekleştirilen küçük ölçekli deneyler de bu bulguları doğrulayarak, periyodik temelli izolasyonun pratik ve etkili bir alternatif olabileceğini ortaya koymuştur.

3. YÖNTEM

Bu bölümde, deprem mühendisliği kapsamında sismik meta-malzemeler ile izole edilmiş betonarme yapı elemanlarının dinamik davranışlarını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışmanın yöntemsel detayları sunulmaktadır. Çalışma kapsamında, farklı temel sistemlerine (geleneksel, 1D periyodik ve piezo-destekli periyodik temel) sahip yapı elemanları, sarsma masası üzerinde dinamik yükler altında gösterdiği performans bakımından karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu doğrultuda deney düzeneği, titreşim kaynağı, numune hazırlıkları, sensör yerleşimi ve veri toplama sistemi detaylı biçimde açıklanmış; elde edilen verilerin değerlendirilme yaklaşımı ayrıca sunulmuştur.

3.1. Deney Düzeneğinin Genel Tanıtımı

Bu çalışmada, sismik meta-malzemelerin betonarme yapılarda sismik izolasyon potansiyelini değerlendirebilmek amacıyla, farklı temel sistemleri laboratuvar ortamında test edilmiştir. Deney düzeneği, yapay olarak oluşturulan yer hareketlerinin yapı elemanlarına aktarılabilmesi için bir sarsma masası üzerine kurulmuştur. Sistem, tek eksenli (x doğrultulu) titreşim üretebilecek şekilde tasarlanmış ve servo motorla tahrik edilen bir lineer hareket modülü ile donatılmıştır. Bu yapı, farklı frekans ve genlik değerlerinde deprem etkisini simüle etme yeteneğine sahiptir. Şekil 3’de görülen 0,75 kW gücündeki servo motor, deneylerde tahrik kuvvetini sağlayan ana birimdir.

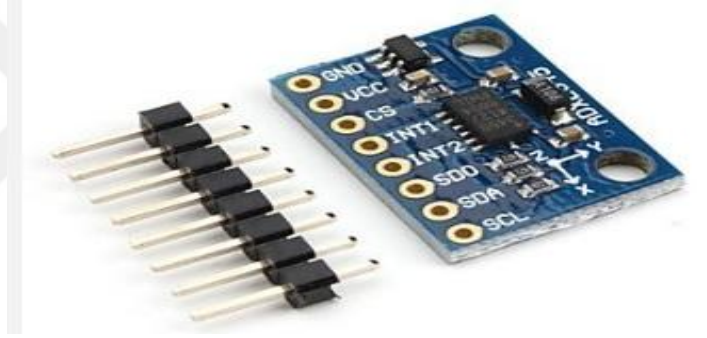


Şekil 3. Deney düzeneğindeki titreşim hareketini sağlamak amacıyla kullanılan 0,75 kW gücündeki servo motor ve sürücü sistemi.

Test düzeneğinde aşağıdaki temel sistem varyantları değerlendirilmiştir;

- Geleneksel betonarme temel,
- SBR kauçuk kullanılarak oluşturulmuş geleneksel izolatörlü temel,
- Meta-malzeme niteliği taşıyan piezoelektrik tabakalı periyodik temel olmak üzere üç farklı yapı sistemi karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Titreşim masasının mekanik tasarımı ve kontrol sistemi, Arduino tabanlı yazılım ile gerçekleştirilmiş olup, hareket parametreleri (frekans, süre, deplasman) kullanıcı tarafından ayarlanabilir yapıdadır. İvme ölçümleri, belirlenen noktalara yerleştirilen ADXL345 üç eksenli ivmeölçer sensörler ve Arduino Mega 2560 mikrodenetleyici kartı aracılığıyla alınmıştır. Bu sistem, sarsma masası kontrol paneliyle entegre bir şekilde çalışarak elde edilen ivme verilerini kaydetmiş; veriler frekans çözümlemesi ve tepe ivme değerlendirmesi ile analiz edilmiştir.



Şekil 4. Deney düzeneğinde titreşim tepkilerini ölçmek amacıyla kullanılan ADXL345 model üç eksenli ivmeölçer.



Şekil 5. İvmeölçer sensörlerden alınan verilerin işlenmesini ve kayıt altına alınmasını sağlayan Arduino Mega 2560 mikrodenetleyici kart.

Deney düzeneği tasarlanırken, sarsma masası sistemine ilişkin ISO 22166-1:2021 ve ASTM E2126 gibi uluslararası standartlar temel alınarak, benzer parametreler doğrultusunda bir sistem kurgulanmıştır.

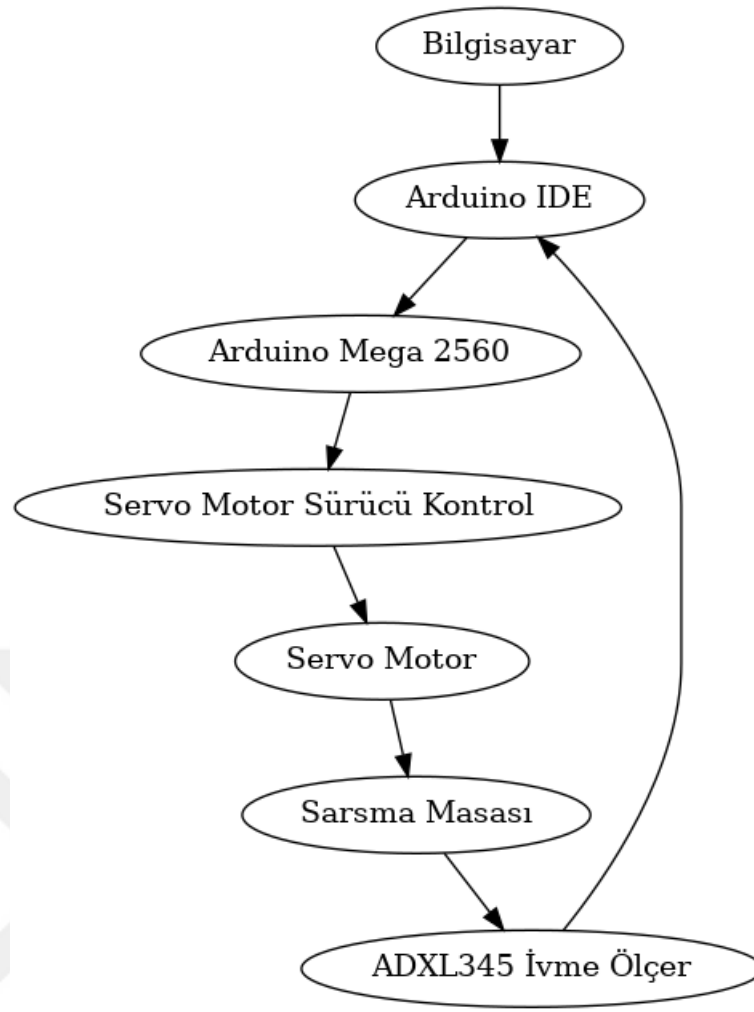
3.2. Titreşim Kaynağı ve Sarsma Masası Tasarımı

Bu çalışmada kullanılan titreşim kaynağı, yapıların deprem sırasında en fazla hasar aldığı yön olan yatay (x-yönü) doğrultusunda tek eksenli hareket üretebilen bir sarsma masası sistemidir. Sistem temel bileşeni, 0,75 kW gücünde bir servo motor olup, bu motor yüksek hassasiyette kontrol edilebilir tahrik sistemi ile çalışmakta ve farklı frekans ile genlik değerlerinde istenen hareketlerin güvenli bir şekilde üretilmesini sağlamaktadır.

Titreşim üretimi için kullanılan lineer hareket modülü, servo motorla entegre çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Modül, yaklaşık 80 kg'lık taşıma kapasitesine sahip olup, 40 cm × 40 cm boyutlarında ST35 çeliğinden imal edilen bir tablanın hareketini sağlamaktadır. Sarsma masasının yatay düzlemde sağladığı maksimum deplasman yaklaşık 7,5 cm²'dir. Bu yapı, test numunesinin altına konumlandırılarak, zemin hareketlerinin laboratuvar ortamında simülasyonu amacıyla kullanılmaktadır.

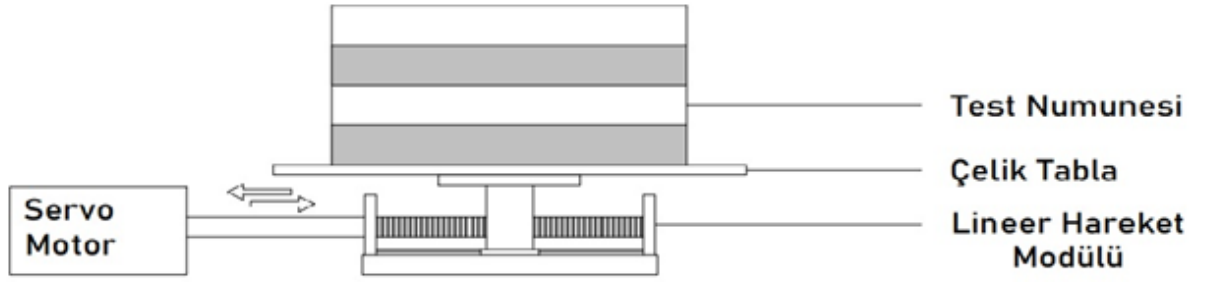
Servo motorun hareketi, Arduino tabanlı bir yazılım aracılığıyla kontrol edilmiştir. Kullanıcı tarafından tanımlanan frekans ve süneklilik (genlik) değerleri, yazılım arayüzü üzerinden servo motor kontrol ünitesine aktarılmakta ve bu sayede farklı titreşim senaryoları test edilebilmektedir. Uygulanan bu titreşim protokolleri, yapı davranışlarının frekans temelli analizine imkân tanıyacak şekilde tasarlanmıştır.

Sistemin genel bileşenleri ve Arduino-IDE tabanlı kontrol sistemi, Şekil 6'da akış diyagramı ile sunulmuştur. Şematik yerleşimi Şekil 7'de; deney düzeneğinin laboratuvar ortamındaki gerçek görüntüsü ise Şekil 8'de verilmiştir.



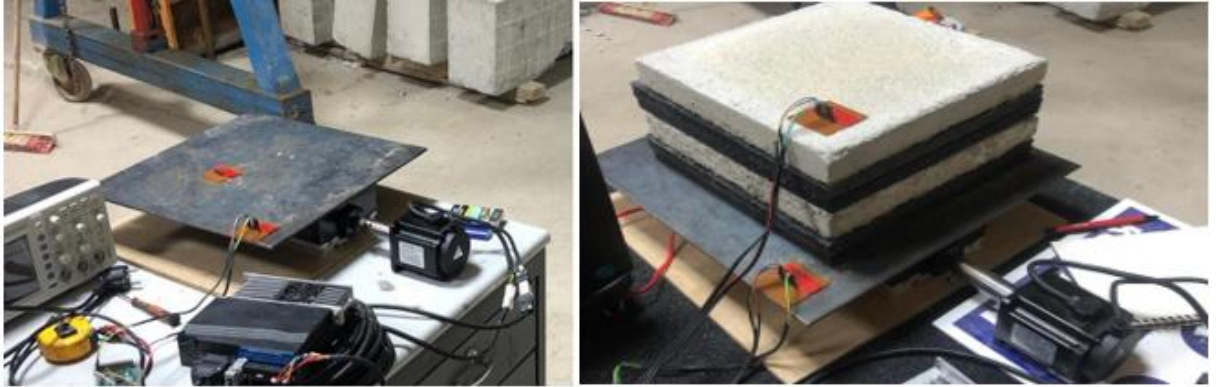
Şekil 6. Deney sistemini oluşturan temel bileşenler ile Arduino-IDE tabanlı kontrol sisteminin şematik akış diyagramı.

Şekil 6’da sunulan diyagramda, deney sisteminin tüm bileşenleri birbirleriyle olan veri ve güç bağlantıları açısından gösterilmiştir. Arduino IDE yazılım arayüzünden başlayan komut zinciri, sırasıyla Arduino Mega kartına, motor sürücüyü ve servo motora yönlendirilmekte; ardından ADXL345 ivmeölçerler ile geri besleme sağlanarak sarsma masası üzerinden titreşimli hareket gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7. Titreşim kaynağı olarak kullanılan servo motor, lineer hareket modülü, çelik tabla ve test numunesi ile birlikte sarsma masası sisteminin şematik gösterimi.

Şekil 7, servo motorun doğrusal hareket modülü ile bütünleşik olarak çalıştığı ve test numunesinin çelik tabla üzerinde konumlandırıldığı deney düzeneğini şematik olarak göstermektedir. Bu çizim, sarsma masası sisteminin mekânsal yerleşimini sade bir bakış açısıyla aktarmakta ve deneysel tasarımın temel bileşenlerini anlaşılır şekilde ortaya koymaktadır.



Şekil 8. a) Deney düzeneğinde kullanılan sarsma masasının genel bağlantıları ve donatı görünümü, b) Sarsma masasına yerleştirilmiş test numunesinin deney öncesi görünümü.

Şekil 8’de ise sistemin laboratuvar ortamında kurulan gerçek hali iki ayrı fotoğraf ile sunulmuştur. İlk görselde, servo motorun masa bağlantısı ve güç-elektronik donatılarıyla genel sistem yerleşimi görülmekte; ikinci görselde ise test numunesinin çelik tabla üzerine konumlandırılması ve ivmeölçer yerleşimleri net bir şekilde gözlemlenebilmektedir.

3.3. Numune Hazırlıkları

Bu çalışmada gerçekleştirilen deneylerde, farklı sismik izolasyon sistemlerine sahip temellerin dinamik davranışlarını karşılaştırmak amacıyla çeşitli tiplerde test numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler üç temel gruba ayrılmıştır:

- Geleneksel betonarme temeller (referans sistem),
- SBR (Styrene-Butadiene Rubber) esaslı kauçuk katmanlar ile oluşturulmuş periyodik yapıya sahip 1D meta-malzeme temeller,
- Piezoelektrik sensörler içeren periyodik yapıya sahip 1D meta-malzeme temeller.

Bu sınıflandırmaya ait temsili görseller Şekil 11’de sunulmuştur.

Numuneler, zemin-yapı etkileşimini temsil edebilecek şekilde ölçeklendirilmiş ve laboratuvar testlerine uygun biçimde hazırlanmıştır. Her bir beton temel numunesi 30×30 cm taban alanına ve 4 cm yüksekliğe sahip olacak şekilde, geleneksel temeli temsil eden numune için ise 30x30 cm taban alanı ve 16 cm yükseklik tasarlanmıştır; laboratuvar ortamında kalıplama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Beton dökümünün ardından nemli bezle üzeri örtülerek su kaybı önlenmiş ve kür süreci başlatılmıştır. Kür işlemi tamamlanan numuneler, istenilen test boyutlarına uygun olarak kesilmiştir. Bu üretim sürecinin görsel aşamaları Şekil 9’da detaylı biçimde sunulmuştur.



Şekil 9. Deney numuneleri, a.) ve d.) beton dökümü kür aşaması b.) kür sonrası test numune hazırlama öncesi c.) kauçuk istenilen boyutta kesim sonrası

Numune üretiminde kullanılan beton karışımı, düşük dayanımlı beton davranışlarını test etmeye olanak tanıyan C14 sınıfında olacak şekilde seçilmiştir. Karışımda kullanılan çimento, agrega ve su oranları; literatürde yaygın olarak kabul gören oranlar referans alınarak belirlenmiştir.

Betonun elastisite modülü, TS 500 standardında verilen aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanmıştır (Denklem 1). Bu bağıntı kullanılarak elde edilen değerler ile üretici teknik dokümantasyonları dikkate alınarak, beton ve kauçuk numunelere ait temel fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 1’de özetlenmiştir.

$$E = 3250 \cdot \sqrt{f_{ck}} + 14000 \text{ mpa}$$

Denklem 1

Tablo 1. Beton ve kauçuk numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri

	Beton	Kauçuk
Yoğunluk (kg/m ³)	2400	915
Elastisite Modülü (Mpa)	24392	0,15
Poisson oranı	0,2	0,4

Kauçuk özellikleri, ilgili üretici firmanın sağladığı teknik veriler temel alınarak değerlendirilmiştir. 1D periyodik temel numunesi, SBR esaslı kauçuk levhaların farklı düzeneklerle beton katmanlar arasında entegre edilmesiyle elde edilmiştir. Katmanlar arasına poliüretan esaslı (Dowson Extra PU) yapıştırıcı uygulanarak kayma davranışı minimize edilmiş, aynı zamanda rijitlik sağlanmıştır.

Piezoelektrik sensörler ise 10 cm aralıklarla bu katmanlar arasına yerleştirilmiş, poliüretan yapıştırıcı ile sabitlenmiş ve sensör çıkış kabloları dışı alınarak lehimlenmiştir (bkz. Şekil 14). Böylece, titreşim anında sensörlerden gelen sinyallerin etkin biçimde izlenmesi sağlanmıştır.

Kür süreci tamamlanan tüm numuneler, sarsma masası üzerine yerleştirilerek sırasıyla titreşim testlerine tabi tutulmuştur.

3.4. DeneySEL Düzenek Konfigürasyonları

Bu çalışmada, yapı-temel sistemi etkileşimini değerlendirmek amacıyla üç farklı deneySEL konfigürasyon tasarlanmış ve karşılaştırmalı analizler gerçekleştirilmiştir. Her bir konfigürasyon, aynı yükleme koşulları altında test edilerek elde edilen bulgular üzerinden sismik izolasyon sistemlerinin etkinliği ortaya konmuştur.

Çalışmada incelenen deneySEL konfigürasyonlar aşağıdaki şekilde sınıflandırılmıştır:

- **1D Periyodik Temel:** Kauçuk ve betonarme blokların bir araya gelmesiyle oluşturulan ve yalnızca z doğrultusunda frekans bant boşlukları sayesinde titreşim enerjisinin sönümlenmesini hedefleyen bir boyutlu (1D) meta-malzeme yapısıdır. Bu yapı, Şekil 10'da şematik olarak sunulmuştur.
- **Geleneksel Temel:** Betonarme bloktan oluşan, herhangi bir izolasyon malzemesi içermeyen referans yapı niteliğindedir.
- **Piezo 1D Temel:** 1D periyodik temel yapısına entegre edilen piezoelektrik sensörler ile enerji geri kazanımı ve gelişmiş sönümleme özellikleri sunan konfigürasyondur.

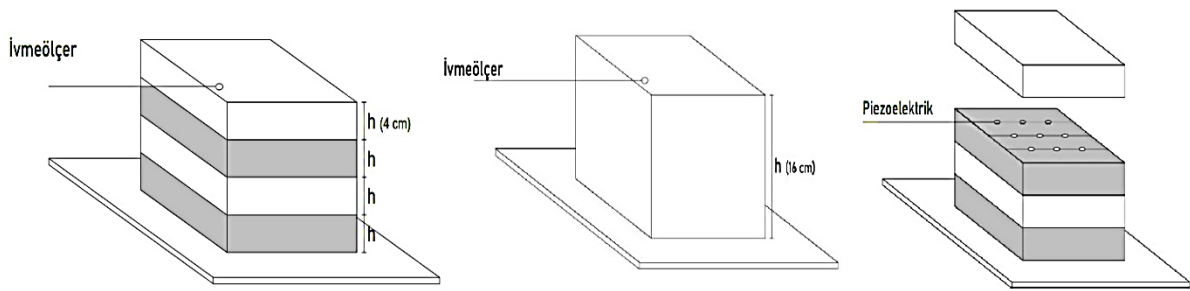
Her bir konfigürasyon, sabit tabla üzerine aynı sınır koşulları altında yerleştirilmiş ve yalnızca x-yönünde sarsıntı uygulanmıştır. Dinamik davranışların izlenebilmesi amacıyla, her

numunenin en üst katmanına yerleştirilen ivmeölçerler aracılığıyla titreşim testleri sırasında ivme verileri toplanmıştır.

Numuneler, her biri 4 cm yüksekliğinde dört katmandan oluşacak şekilde toplamda 16 cm yüksekliğinde olacak biçimde imal edilmiştir. Deney numunelerinin genel yerleşim şeması Şekil 11’de sunulmakta olup, katman yükseklikleri ve ölçüm parametreleri ise Tablo 2’de özetlenmiştir.



Şekil 10. Bir boyutlu (1D) sistemin temsili şematik gösterimi



Şekil 11. 1D periyodik temel, geleneksel temel ve piezoelektrik donatılı periyodik temelin şematik yerleşimleri

Tablo 1. Numunelere ait toplam katman yükseklikleri ve dinamik ölçüm parametreleri

	1D Periyodik Temel	Geleneksel Temel	Piezo Periyodik Temel
Katman Yüksekliği	16 cm	16 cm	16 cm
Ölçüm Parametresi	İvme (g)	İvme (g)	İvme (g)

3.4.1. 1D Periyodik Temel

Bu konfigürasyon, sismik meta-malzeme ilkelerine dayalı olarak tasarlanmış tek boyutlu (1D) periyodik temel sistemini kapsamaktadır. Sistem, ardışık olarak yerleştirilen farklı elastisite modülüne ve yoğunluğa sahip betonarme ve kauçuk katmanlardan oluşmaktadır. Bu yapı

sayesinde, gelen sismik dalgaların belirli frekans bantlarında yayılması engellenmekte ve titreşim enerjisinin yerel olarak sönümlenmesi sağlanmaktadır.

Periyodik yapı, tabakalı bir sistem olarak tasarlanmış olup, her biri 4 cm yüksekliğe sahip toplam dört katmandan oluşmaktadır. Kauçuk plakalar, üretici firmadan 2 cm kalınlığında temin edilmiş olup, bu plakalar poliüretan esaslı yapıştırıcı ile birleştirilerek 4 cm yüksekliğinde kauçuk katmanlar elde edilmiştir. Betonarme katmanlar ise doğrudan 4 cm kalınlığında dökülerek hazırlanmıştır. Her iki malzeme katmanı arasında kayma oluşumunu engellemek amacıyla katmanlar, yüksek yapışma mukavemetine sahip poliüretan bazlı yapıştırıcı ile birbirine bağlanmıştır.

Bu sistemde piezoelektrik sensör bulunmamakta olup, yalnızca fononik yapıdaki bant boşlukları aracılığıyla sönümlenme sağlanması hedeflenmiştir. Hazırlanan numune, sarsma masası üzerine merkezlenerek sabit tabla ile sıkı temas hâlinde yerleştirilmiş ve uygulanan yatay titreşim yükleri altındaki tepkileri değerlendirilmiştir.

Şekil 11’de 1D periyodik temel numunesinin katmanlı yapısı şematik olarak gösterilmiş; Şekil 12’de ise deney düzeneği üzerindeki yerleşimi sunulmuştur.



Şekil 12. 1D Meta-Malzeme periyodik temel, kauçuk ve beton katmanlarından oluşmaktadır.
Servo motor, kontrol ünitesi ve ivmeölçerin bilgisayara bağlantı düzeneği

Şekil 12’de, beton ve kauçuk katmanlardan oluşan çok katmanlı yapı net biçimde gösterilmekte olup; deney düzeneği içinde numunenin konumlandırılması, servo motor ve

kontrol ünitesi ile ivmeölçerin bilgisayar bağlantısı bütüncül bir şekilde tanımlanmaktadır. Bu yerleşim sayesinde sistemin titreşim yükleri altındaki davranışı doğrudan izlenebilmiştir.

3.4.2. Geleneksel Temel

Bu düzenek, karşılaştırmalı analizlerde referans sistem olarak kullanılan ve herhangi bir sismik izolasyon ya da sönümleme mekanizması içermeyen geleneksel betonarme temel sistemidir. C14 sınıfı beton ile üretilmiş olan temel, ara katman veya piezoelektrik sensör içermeyen tekil bir betonarme numune olarak hazırlanmıştır.

Numune, 30×30 cm taban alanına ve 16 cm yüksekliğe sahip olacak şekilde dökülmüş, diğer konfigürasyonlarla aynı geometriye sahip olması sağlanarak karşılaştırmalı analizlerin güvenilirliği artırılmıştır. Betonun kür süreci tamamlandıktan sonra numune, doğrudan sarsma masası üzerine yerleştirilmiştir. Bu yerleşimde elastik veya sönümleyici bir arayüz kullanılmamış, yüklerin sarsma masasından numuneye doğrudan iletilmesi amaçlanmıştır.

Titreşim yüklemeleri sırasında, bu sistemin gösterdiği ivme-tepki karakteristikleri kaydedilmiş ve periyodik temellerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Referans sistemin düşük sönümleme kapasitesi sayesinde, diğer izolasyonlu sistemlerin performans avantajları belirgin şekilde ortaya konmuştur.

Geleneksel temel sistemine ait katman yapısı Şekil 11’de şematik olarak sunulmuştur. Ayrıca, bu sistemin deney düzeneği üzerindeki yerleşimi, servo motor ve ivmeölçer bağlantı düzenekleriyle birlikte Şekil 13’de görsel olarak verilmektedir.



Şekil 13. Geleneksel temel, beton bloktan oluşmaktadır. Servo motor, kontrol ünitesi ve ivmeölçerin bilgisayara bağlantı düzeneği

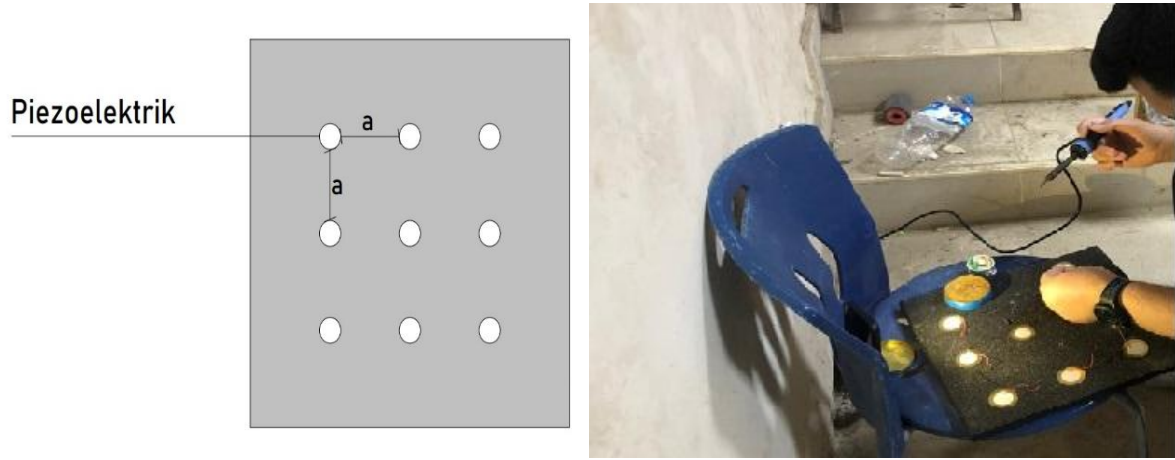
Şekil 13, referans yapı olarak kullanılan geleneksel betonarme temele ait deney düzeneğini göstermektedir. Görselde, herhangi bir izolasyon veya sönümlleme elemanı içermeyen betonarme blok numunenin sarsma masası üzerindeki yerleşimi, servo motor kontrol ünitesi ve ivmeölçer bağlantı noktalarıyla birlikte detaylı olarak sunulmaktadır. Bu düzenek, diğer izolasyonlu sistemlere kıyasla doğrudan yük aktarım karakteristiğini temsil etmektedir.

3.4.3. Piezo 1D Temel

Bu konfigürasyon, 1D periyodik temel yapısının piezoelektrik sensörlerle desteklenmiş bir versiyonudur. Temel amacı, yalnızca fononik bant boşlukları prensibine dayalı pasif sönümlleme yerine, aynı zamanda aktif enerji algılama ve potansiyel enerji geri kazanımı kabiliyetlerini değerlendirmektir. Bu yapı, deneysel veri toplama kapasitesini artırmakla birlikte, sistemin dinamik tepkisinin gerçek zamanlı olarak izlenmesine de olanak tanımaktadır.

Piezo 1D temel numunesi, ardışık biçimde yerleştirilmiş beton ve SBR kauçuk katmanlarından oluşmaktadır. Bu katmanlar arasına, belirli aralıklarla (10 cm) piezoelektrik diskler entegre edilmiştir. Her bir piezoelektrik eleman, sandviç yapı içerisinde hem mekanik teması hem de elektriksel iletkenliği sağlayacak şekilde sabitlenmiş ve dış bağlantıları lehimlenerek veri toplama sistemine bağlanmıştır.

Şekil 14’de, piezoelektrik disklerin sistem içerisindeki konumları, yerleşim düzeni ve katman içi yerleşimi şematik olarak sunulmaktadır.

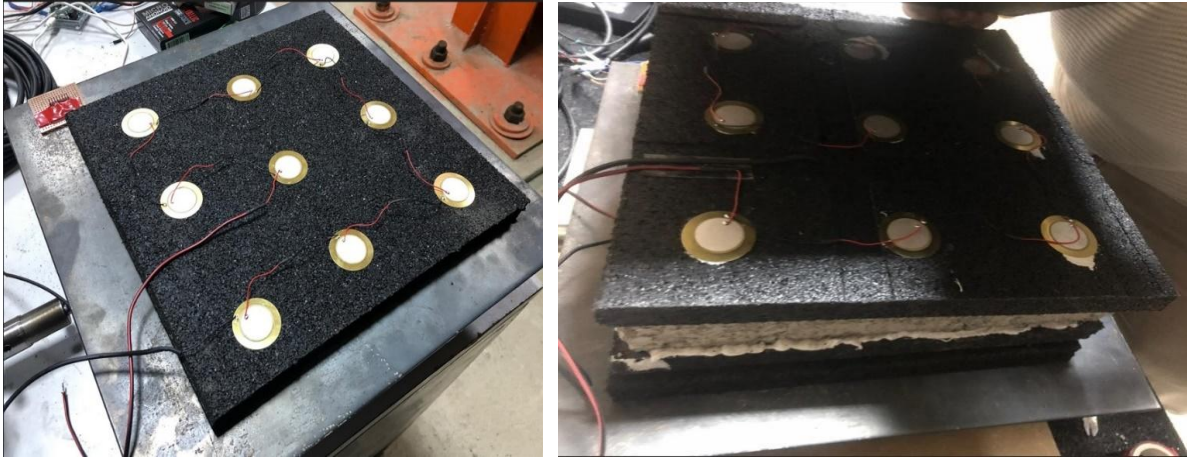


Şekil 14. Piezoelektrik sensörlerin SBR kauçuk katmanlara gömülü yerleşimi ve haricî bağlantı hazırlığı.

Her bir piezoelektrik sensör, uygulanan titreşim dalgaları sonucunda elektriksel sinyal üretmekte ve bu sinyaller harici veri toplama sistemine iletilmektedir. Bu sayede sistemin belirli frekanslardaki dinamik davranışı, hem mekanik tepki hem de elektriksel çıktı açısından izlenebilir hale gelmektedir. Sensörlerin yerleştirilme pozisyonları, sistemin titreşim altında en büyük gerilme etkilerine maruz kalan bölgeleri esas alınarak belirlenmiştir.

Deneysel çalışmalar sırasında Piezo 1D temel numunesi, diğer konfigürasyonlarla aynı sınır koşullarında sarsma masasına yerleştirilmiş; dış kaynaklı kablo bağlantıları sayesinde piezoelektrik sinyaller kaydedilmiştir.

Şekil 15’de, (a) kauçuk tabaka içine gömülü sensörlerin yerleşimi ve kablolaması, (b) ise piezoelektrik sensörlerle donatılmış periyodik temel sisteminin genel görünümü sunulmaktadır.



Şekil 15. a.) kauçuk tabaka içine gömülü piezoelektrik sensörlerin yerleşimi ve kabloları
b.) periyodik temel sistemine entegre piezoelektrik sensörlerle donatılmış piezo periyodik temel genel görünümü.

Bu üç temel konfigürasyonun her biri, yapı-zemin etkileşimi sırasında sismik dalgaların iletim karakteristiklerine ilişkin farklı çözümler sunmaktadır. Özellikle piezoelektrik sensör destekli periyodik temel, hem titreşim sönümleme hem de enerji kazanımı açısından geleneksel betonarme sistemlere kıyasla önemli avantajlar taşımaktadır. Numunelerin aynı sınır koşulları altında test edilmesi, karşılaştırmalı analizlerin sistematik şekilde yürütülmesine olanak sağlamakta; seçilen geometri ve parametre setiyle deneysel güvenilirlik temin edilmektedir.

3.5. Sensör Yerleşimi ve Veri Toplama Sistemi

3.5.1 Genel yaklaşım

Deneysel temellerin sismik etkiler altındaki dinamik davranışlarını yüksek doğrulukla izleyebilmek amacıyla iki farklı sensör tipi kullanılmıştır:

1. İvmeölçerler (ADXL345) – yapısal ivme tepkisini üç eksenle kaydetmek için,
2. Piezoelektrik disk sensörler – titreşime bağlı mekanik gerilmeleri elektrik sinyaline dönüştürerek enerji-hasadı ve yerel gerilme dağılımını izlemek için.

Her sensör, sinyal kaybını en aza indirmek üzere lehimlenmiş kablo uçlarıyla Arduino-tabanlı veri toplama sistemine entegre edilmiştir.

3.5.2 İvmeölçer (ADXL345) yerleşimi

- Kullanılan ADXL345 sensörler ± 4 g ölçüm aralığına ve yüksek örnekleme hassasiyetine sahiptir.
- Örnekleme aralığı **80 ms** olacak biçimde Arduino IDE üzerinde programlanmıştır (≈ 12.5 Hz).
- Deprem yer ivmesinin yapı yüksekliği boyunca artacağını öngörerek, her numunenin **en üst katmanına** birer ivmeölçer yerleştirilmiştir.
- Okunan ivme değerleri g biriminde kaydedilmiş; böylelikle farklı temel konfigürasyonlarının **ivme azaltıcı** (izolasyon) etkisi doğrudan karşılaştırılmıştır.

3.5.3 Piezoelektrik sensör yerleşimi

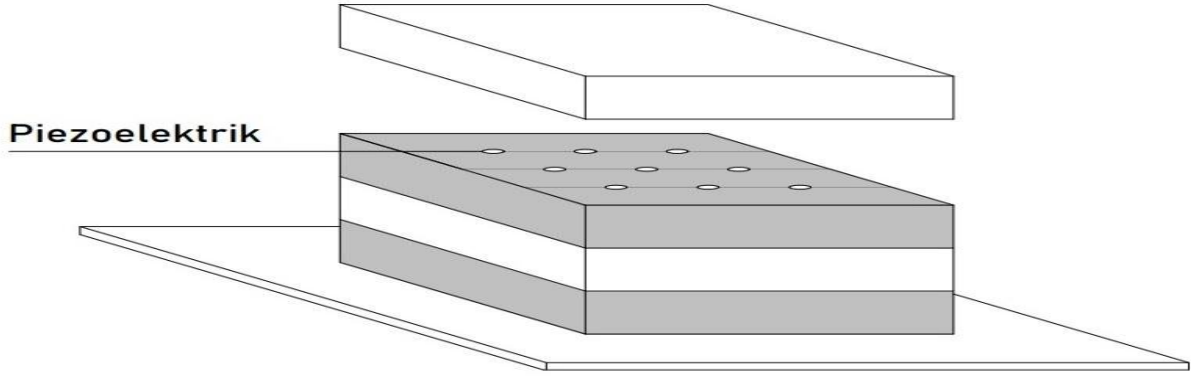
Sadece Piezo 1D konfigürasyonunda kullanılan piezo sensörlerin teknik ve geometrik özellikleri:

Tablo 2. Piezoelektrik sensörlerin teknik özellikleri ve yerleşim detayları.

Özellik	Değer / Açıklama
Disk çapı	35 mm
Yerleşim aralığı	10 cm
Katman sayısı	2 kauçuk levha (üst & alt)
Sensör adedi	9 sensör $\times$ 2 katman = 18

Piezo diskler kauçuk katmanlara **poliüretan bazlı** yapıştırıcı ile sabitlenmiştir. Bu sensörler darbe veya sürekli titreşim altında ortaya çıkan gerilmeleri elektrik sinyaline dönüştürerek hem enerji geri-kazanım potansiyelini hem de yerel gerilme dağılımını değerlendirmede kullanılmıştır.

Şekil 16 piezo sensör diziliminin şematik görünümünü sunmaktadır.



Şekil 16. Piezo sensör yerleşimi, iki kauçuk katmana 10 cm aralıklarla yerleştirilmiş, her bir kauçuk katmanda 9 tane olmak üzere test numunesinde toplamda 18 adet sensör kullanılmıştır.

3.5.4 Veri toplama ve işleme

- Tüm sensör sinyalleri Arduino Mega 2560 kartına iletilmiş, analog sinyaller ADC modülüyle dijitale dönüştürülmüştür.
- İvmeölçer verileri seri port üzerinden doğrudan bilgisayara, piezo sensör sinyalleri ise osiloskopa yönlendirilmiş ve aynı anda kaydedilmiştir.
- Piezo sensörlerde durgun hâl ve 20 s süren rastgele titreşim senaryoları için maksimum gerilim değerleri ölçülmüştür.
- Elde edilen tüm zaman serileri SeismoSignal yazılımında işlenmiş; ivme-zaman, Fourier dizilimi (FFT) ve RMS ivme değerleri çıkarılmıştır.

3.6. Uygulanan Titreşim Protokolleri

Bu çalışmada, deney numunelerinin sismik yükler altındaki dinamik tepkilerini analiz edebilmek amacıyla farklı rastgele ve periyodik titreşim protokolleri uygulanmıştır. Titreşimler, x-yönü boyunca yatay düzlemde çalışan bir sarsma masası aracılığıyla üretilmiştir.

Servo motorun hareketi Arduino IDE yazılımı ile kontrol edilmiş ve motorun adım sayısı değiştirilerek farklı titreşim hareketleri oluşturulmuştur. Sarsma masası üzerindeki numunelere bu titreşimler, 20.667 saniye süresince uygulanmış ve sistemin sönüm davranışı analiz edilmiştir. 1D periyodik temel ile geleneksel temel karşılaştırmalı olarak test edilmiş ve en üst katmana yerleştirilen ivmeölçerler ile 80 ms aralıklarla ivme verileri kaydedilmiştir.

Piezo destekli periyodik temel ve geleneksel temele yalnızca tek bir titreşim tipi uygulanmış, ivme verileri yine 80 ms aralıklarla toplanmıştır. Piezo destekli yapıların elektrik üretme potansiyelini analiz edebilmek için, yapıya 20 saniye süreyle random (rastgele) titreşim etkisi uygulanmış; bu esnada piezo sensörlerden elde edilen voltaj verileri osiloskop aracılığıyla ölçülmüştür.

Servo motorun dönme hareketi, lineer harekete vidalı mil yardımıyla aktarılmıştır. Pulse frekansı bazlı kontrol sistemi kullanılarak, Arduino yazılımında belirlenen frekans değerleriyle servo motor titreşim üretmeye başlamıştır. Ancak pulse frekansı ile mekanik frekans değerlerinin farklılık gösterdiği göz önünde bulundurulmuştur. Bu farkı ortaya koymak amacıyla Denklem (2), (3) ve (4) kullanılmıştır:

$$\text{Motor adım süresi} = 2 \times \text{Pulse genişliği} \quad \text{Denklem 2}$$

$$\text{Dönüş süresi} = \text{Motor adım sayısı} \times \text{Adım süresi} \quad \text{Denklem 3}$$

$$\text{Dönüş frekansı} = 1 / \text{Dönüş süresi} \quad \text{Denklem 4}$$

Bu hesaplamalarda 5 µs'lik bir pulse genişliği ve toplamda 10 µs'lik adım süresi kullanılmıştır. 3000, 4000 ve 5000 adım sayısı için karşılık gelen dönüş frekansları sırasıyla 33 Hz, 25 Hz ve 20 Hz olarak hesaplanmıştır. Artan adım sayısı ile birlikte frekans değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir.

Yukarıda sunulan denklemler motorun dönüş frekansının belirlenmesine yöneliktir. Bu hesaplamalar doğrultusunda, farklı adım sayılarıyla motorun frekans içeriği değiştirilmiş ve deney numunelerine çeşitli titreşimler uygulanmıştır. Numunelerin en üst katmanından elde edilen ivme verilerine Fourier dönüşümleri uygulanarak baskın frekans bileşenleri belirlenmiş; bu değerlere ilişkin analizler bulgular kısmında detaylı şekilde ele alınmıştır. Aşağıda, farklı temel türleri için uygulanan titreşim parametreleri Tablo 4'de özetlenmiştir.

Tablo 3. Deney numunelerine uygulanan farklı temel türleri için titreşim parametreleri özeti.

	1D periyodik temel	Geleneksel temel	Piezo periyodik temel
Pulse genişliği	5µs	5µs	5µs
Motor adım sayısı	3000;4000	3000;4000;5000	5000
Ölçüm parametresi	İvme (g)	İvme (g)	İvme (g)

3.7. Değerlendirme Metodolojisi

Bu çalışmada, sarsma masası aracılığıyla uygulanan farklı titreşim protokolleri altında elde edilen deneysel veriler, üç farklı temel sistemin (geleneksel betonarme, 1D periyodik meta-malzeme destekli ve piezoelektrik sensörlü sistem) dinamik davranışlarının karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Analiz süreci, ivme ölçümleri ve piezoelektrik sinyaller üzerinden yürütülmüş ve hem zaman hem frekans düzleminde değerlendirmeler yapılmıştır.

İvme Verilerinin İşlenmesi

- Yapıların dinamik davranışlarını temsil eden ivme-zaman verileri, ADXL345 ivmeölçerler aracılığıyla toplanmıştır.
- Bu veriler, **Arduino IDE** ve **SeismoSignal** yazılımları yardımıyla 80 milisaniyelik örnekleme aralıklarıyla kaydedilmiştir.
- Her yapı konfigürasyonu için testlerin tekrarlanabilirliğini sağlamak üzere en az üç ayrı deney yapılmıştır.

Piezoelektrik Sinyal Değerlendirmesi

- Piezo 1D temel konfigürasyonunda yer alan piezo diskler titreşim altındaki yapısal gerilmeleri elektrik sinyali olarak üretmiştir.
- Bu sinyaller, **ADC modülüyle dijitalle dönüştürülerek** yazılıma aktarılmış ve **osiloskop yardımıyla** kayıt altına alınmıştır.
- Piezoelektrik çıktılar, hem voltaj-zaman grafikleri hem de sinyal yoğunluğu üzerinden değerlendirilmiştir.

Frekans Tabanlı Analiz

- İvme verileri üzerinde hızlı Fourier dönüşümü (FFT) uygulanarak, baskın frekans bileşenleri belirlenmiş ve sönüm performansı frekans spektrumları ile karşılaştırılmıştır.
- Böylece periyodik yapıların belirli frekans bantlarında enerji yayılımını sınırlama etkisi analiz edilmiştir.

Karşılaştırmalı Değerlendirme Kriterleri

Aşağıdaki performans göstergeleri doğrultusunda kıyaslamalar yapılmıştır:

- Maksimum ivme tepkisi
- RMS (karekök ortalama) ivme değerleri
- Piezoelektrik voltaj çıktısı (yalnızca piezo sistem için)
- Fourier dönüşümü ile elde edilen baskın frekans genlikleri
- Sistemlerin tekrarlayan titreşimler altındaki davranış kararlılığı

Bu metodolojik yaklaşım sayesinde, geleneksel, periyodik ve piezoelektrik destekli sistemlerin sismik dalga altındaki performansları hem zamansal hem de frekans spektrumları açısından nesnel biçimde karşılaştırılmış ve bir referans yapı ile kıyaslanabilir hale getirilmiştir. Elde edilen bulgular, sonraki bölümlerde ayrıntılı olarak sunulacaktır.



4. BULGULAR

Bu bölümde, deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen ivme-zaman verileri, frekans bileşenleri ve piezoelektrik voltaj ölçümleri analiz edilmiştir. Farklı temel tiplerinin (geleneksel, periyodik, piezo-periyodik) sismik davranışları, titreşim etkisi altındaki tepkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş; sistemin performansına ilişkin bulgular hem grafiksel hem de sayısal olarak sunulmuştur. Deney düzeneklerinden elde edilen veriler, ilgili tablolarda ve şekillerde ayrıntılı biçimde gösterilmiş, sistemlerin titreşim iletimi ve sönümleme kapasiteleri tartışılmıştır. Şekil 17’de, veri değerlendirme sürecine ilişkin genel akış diyagramı sunulmuştur.



Şekil 17. Deneysel süreçte elde edilen titreşim kaynaklı ivme verilerinin analizine ilişkin genel veri değerlendirme akış şeması.

4.1. Giriş

Bu bölümde, farklı temel sistemleriyle donatılmış deney numunelerinin sarsma masası üzerinde belirli protokoller altında maruz kaldığı titreşimler sonucunda elde edilen verilerin karşılaştırmalı değerlendirmeleri sunulmaktadır. Çalışmanın temel amacı, sismik metalzeme tabanlı periyodik temel sistemlerinin, geleneksel betonarme temellere kıyasla deprem etkilerine karşı performansını ortaya koymaktır.

Çalışmada değerlendirilen temel sistemler şunlardır:

- Geleneksel betonarme temel,
- SBR esaslı kauçuk ve betonarme etkileşimi oluşturulan periyodik temel,
- Piezoelektrik sensörlerle güçlendirilmiş periyodik temel.

Her sistem, sabit süre ve belirli frekans aralıklarında servo motor kontrollü sarsma masasıyla test edilmiş; testler sonucunda elde edilen ivme-zaman verileri hem zaman hem de frekans domeninde analiz edilmiştir.

Verilerin değerlendirilmesinde aşağıdaki parametreler esas alınmıştır:

- Maksimum ivme değerleri,
- RMS (Root Mean Square) ivme,
- Fourier frekans spektrumları,
- Enerji akış oranları,
- Piezoelektrik sistemlerin gerilim çıktıları, gibi ölçümler dikkate alınmış ve her bir parametre üzerinden karşılaştırmalı grafik ve tablolar ile sunum yapılmıştır.

Her bir parametre üzerinden karşılaştırmalı grafik ve tablo analizleri gerçekleştirilmiştir.

Bu analizler, sismik izolasyonun yalnızca yapısal deformasyon düzeyinde değil; enerji yayılımı, frekans aktarımı ve titreşim şiddeti bağlamında da anlaşılmasını sağlamaktadır. Bulgular, sismik meta-malzemeler ve piezoelektrik destekli sistemlerin gelecekteki deprem yalıtım tasarımlarında potansiyel rolüne dair önemli bilgiler sunmaktadır.

Takip eden alt başlıklarda, her sistemin deneysel verileri detaylı biçimde sunulmuş, karşılaştırmalı analizler aracılığıyla sistemlerin performans farkları sayısal olarak ortaya konulmuştur.

4.2. Periyodik Temel ve Geleneksel Temelin Karşılaştırılması

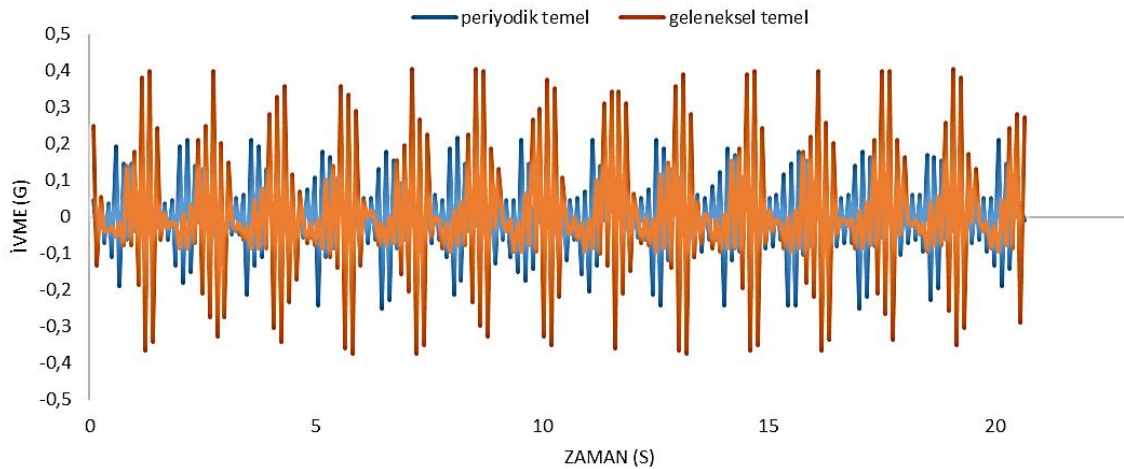
Deneyler iki farklı motor adım sayısı senaryosuyla gerçekleştirilmiştir. İlk senaryoda, servo motorun Arduino yazılımındaki adım sayısı 4000 olarak tanımlanmış ve sistem, sabit 5 milisaniyelik pulse genişliği ile toplamda 20,667 saniye boyunca sürekli titreşime maruz

birakılmıştır. Bu durumda katmanların en üstündeki ivme ölçerlerden elde edilen ivme değerleri, geleneksel ve periyodik temel sistemlerinin dinamik tepki davranışlarını anlamaya yönelik ilk veri setini oluşturmuştur.

Bu ilk senaryoda elde edilen ivme-zaman verileri Şekil 18’de sunulmuştur. Grafiklerden görüldüğü üzere, geleneksel temel sisteminde maksimum tepe ivme değeri daha yüksek olup, sistemin titreşimi daha çok ilettiği anlaşılmaktadır.

Şekil 18’de sunulan ivme-zaman grafikleri, her iki temel sistemin titreşimlere karşı verdiği doğrudan tepkileri görsel olarak ortaya koymaktadır. Geleneksel temel sisteminde ivme değerlerinin daha yüksek genlikli ve düzensiz bir seyir izlediği, buna karşılık periyodik temel sisteminde daha yumuşak ve sönümlü bir davranış sergilendiği gözlemlenmektedir. Bu durum, enerji yutma kapasitesinin periyodik yapı lehine olduğunu ve yapıya iletilen dinamik etkinin azaldığını göstermektedir.

Buna karşılık, periyodik temel sisteminde bu değerler daha düşüktür. Bu durum, katmanlı yapının enerji yutma ve yapılara deprem şiddetini daha az ilettiğine işaret etmektedir.

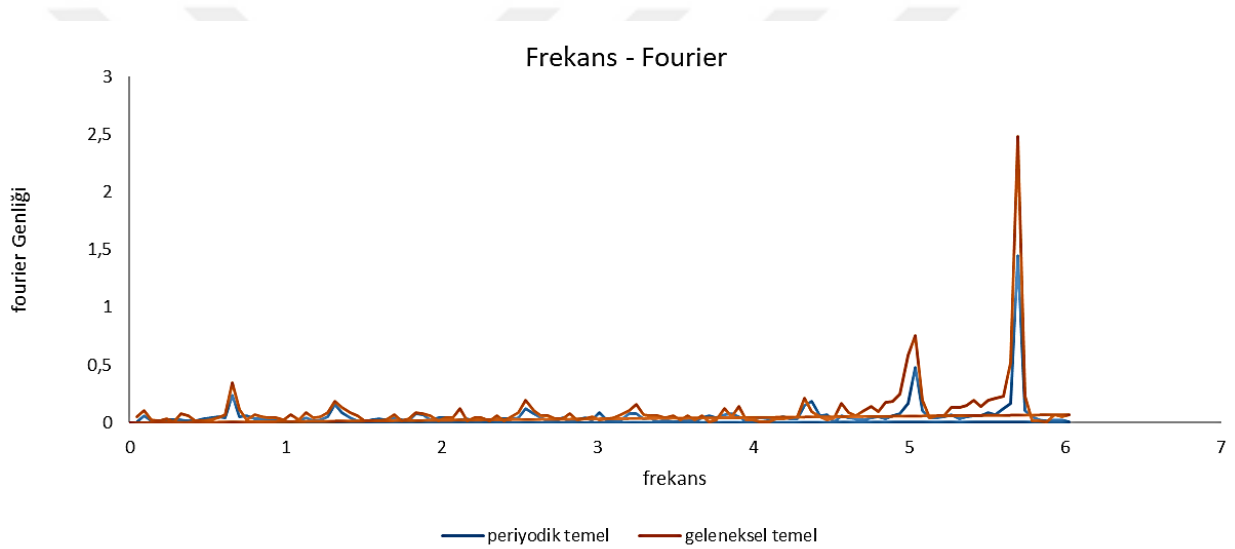


Şekil 18. 1D periyodik temel ve geleneksel temelin ivme tepki çıktılarının karşılaştırılması

Rastgele titreşim protokollerinin baskın frekans içeriğini belirlemek ve frekans bazında sönümü belirlemek amacı ile her iki numuneden elde edilen ivme değerlerinin Fourier analizine dayalı frekans bileşenleri Şekil 4.3’de verilmiştir. Baskın frekans aralığının 5–6 Hz olduğu ve bu frekans değerlerinde 1D periyodik yapının geleneksel temele göre genliklerinin daha düşük olduğu görülerek sönüm etkinliği frekans alanında görülmüştür.

Şekil 19, Fourier dönüşümü ile elde edilen frekans bileşenlerinin karşılaştırmalı analizini sunmaktadır. Grafikler incelendiğinde, geleneksel temel sisteminde belirli frekanslarda genliklerin ani yükselmeler gösterdiği; buna karşın periyodik temel sisteminde bu tepkilerin daha dengeli ve düşük genlikte kaldığı dikkat çekmektedir. Bu fark, sadece zaman domeninde değil, frekans uzayında da periyodik yapıların daha iyi titreşim kontrolü sağladığını göstermektedir. Böylece yapının frekans yönünden seçici davranarak, belirli bantlarda daha fazla enerji sönümlemesi gerçekleştirdiği anlaşılmaktadır.

Bu bulgular, özellikle frekansa duyarlı cihazların bulunduğu yapılarda ya da belirli frekans aralıklarında titreşimlerin kritik olduğu senaryolarda, periyodik temellerin potansiyel avantajlarını ortaya koymaktadır.

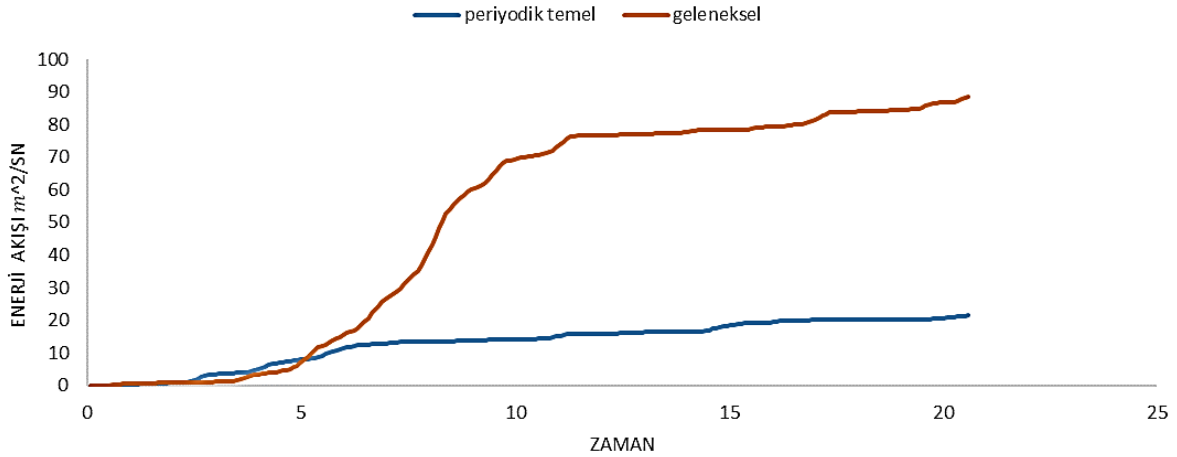


Şekil 19. 1D periyodik temel ve geleneksel temelin frekans alanında fourier genlik değerleri karşılaştırma

Şekil 20'de sunulan enerji akışı grafiği ise, SeismoSignal programı arayüzünde bulunan ve deprem yer kayıtlarının açığa çıkardıkları enerji miktarını gösteren bir özelliktir. Bu grafik, elde edilen ivme değerlerinin bir yer hareketi olarak varsayıldığında açığa çıkardıkları; bir başka deyişle yapılara etki eden deprem enerji oranlarını göstermektedir.

Şekil 20'deki enerji akışı grafiği, zamanla biriken toplam enerji miktarını göstermektedir. Geleneksel temel sisteminde enerji transferi daha hızlı ve süreklilik gösterirken, periyodik temelde bu artış daha kontrollü ve düşük seviyelerde kalmıştır. Bu bulgu, periyodik yapıların

enerji yayılımını sınırlandırarak, yapısal elemanların ani veya tekrarlı yüklemelerle oluşabilecek aşırı gerilmelere karşı daha korunaklı hale geldiğini göstermektedir. Özellikle düşük frekansta tekrarlanan yer hareketleri altında, enerji akışındaki bu fark tasarım güvenliği açısından dikkate değerdir.



Şekil 20. Enerji akış karşılaştırma

Tüm bu veriler ışığında elde edilen sayısal ölçümler Tablo 5'de verilmiştir:

Tablo 5. 4000 adım sayısı ile elde edilen ivme karşılaştırması

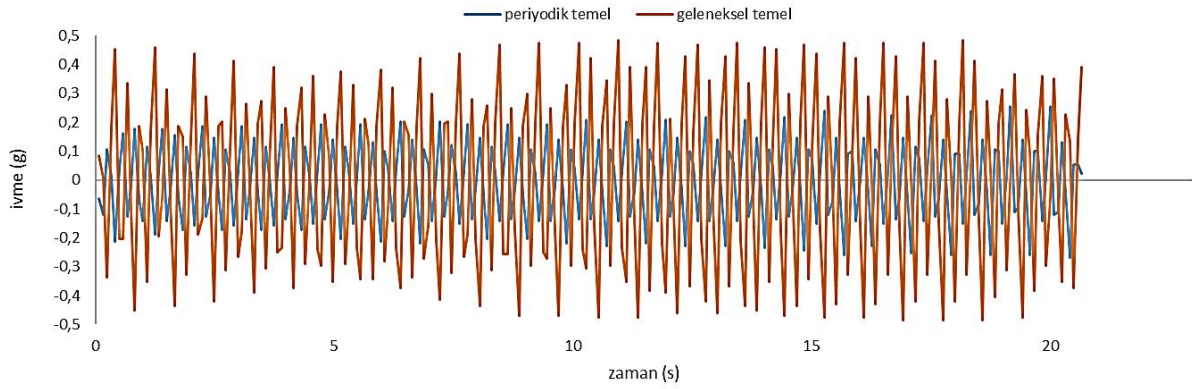
Sistem	Maksimum İvme (g)	RMS İvme (g)
Periyodik Temel	0,25	0,11
Geleneksel Temel	0,40	0,19

Tablo 5 incelendiğinde, periyodik temel sisteminin olduğu numunenin titreşime verdiği dinamik tepki olarak maksimum ivme değerinin %38 daha az olduğu, temellerin tepki ivmelerinin bir zaman periyodu boyunca değerlerin ortalamasını hesapladığımız kök ortalama kare (RMS) ise titreşim süresi boyunca periyodik temelin %43 oranında daha az ivme ortalamasına sahip olduğu görülmüştür. Bu da sistemin depremin sarsıcı etkilerini daha az şiddetle yapıya ilettiğini ortaya koymaktadır.

İkinci senaryoda, servo motor adım sayısı 3000 olarak tanımlanmış ve aynı süre boyunca sabit pulse genişliğiyle çalıştırılmıştır. Bu yüksek enerjili durumda elde edilen ivme-zaman grafikleri Şekil 21'de verilmiştir. Periyodik temel sisteminde ivme tepkilerinin düşük

seyretmeye devam ettiği, geleneksel temelde ise sıçramaların ve frekans çoğaltımlarının arttığı görülmüştür.

Şekil 21’de sunulan ikinci senaryo sonuçları, sistemlerin daha yoğun titreşim enerjisine maruz kaldığında da benzer performans eğilimleri sergilediğini ortaya koymaktadır. Geleneksel temel sisteminde gözlenen artan genlikler, sıçrama noktaları ve frekans çoğaltımları, yapının titreşimi daha az süzerek doğrudan üst yapıya aktardığını göstermektedir. Buna karşın, periyodik temelde elde edilen daha stabil ve düşük genlikli yanıt, enerji yutma ve sönümleme davranışının senaryolar arası tutarlı bir şekilde korunduğunu göstermektedir. Bu bulgular, periyodik yapıların yalnızca düşük enerjili durumlar değil, yüksek enerjili yer hareketleri karşısında da etkili bir izolasyon sağladığını ortaya koymaktadır.

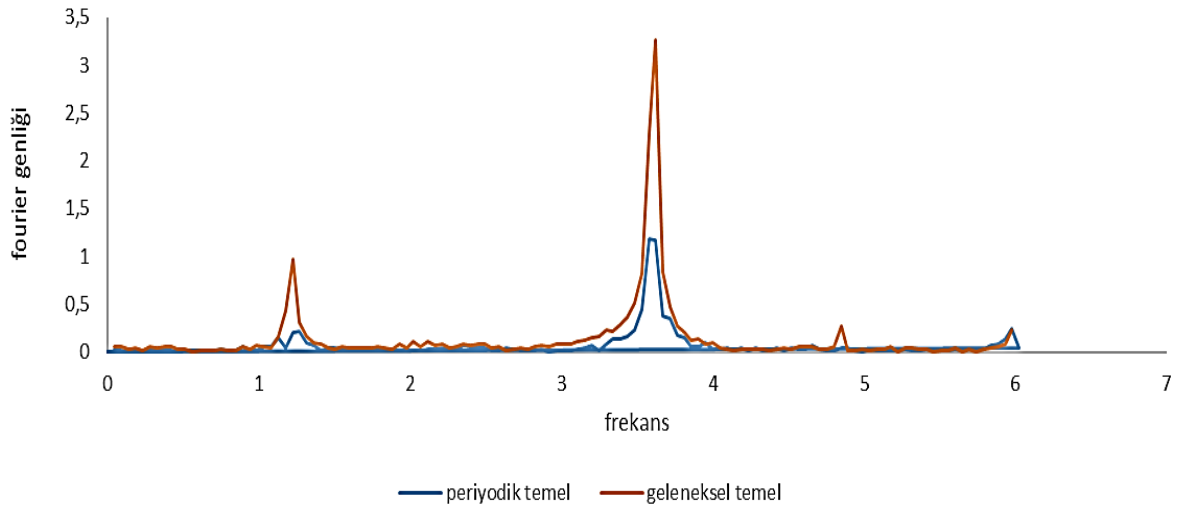


Şekil 21. 1D periyodik temel ve geleneksel temelin ivme tepki çıktılarının karşılaştırılması

Şekil 22’de ikinci titreşim senaryosunun ivme değerlerinin Fourier dönüşümü yapılarak frekans bazlı etkinliği gösterilmektedir. Baskın frekans değerleri 3–4 Hz aralığına düşmekte ve 1D periyodik temelin aynı frekans içeriğinde daha düşük genliklere sahip olması ile sönüm yapabilme etkinliği gösterilmiştir.

Şekil 22 ayrıca, yüksek enerjili test koşullarında bile periyodik temel sisteminin frekans uzayında seçici bir sönümleme yeteneğini koruduğunu ortaya koymaktadır. Grafik incelendiğinde, geleneksel temelin belirgin rezonans tepeleri sergilediği, buna karşılık periyodik temelde frekans spektrumunun düşük genlikli ve daha yumuşak seyrettiği gözlemlenmektedir. Bu durum, periyodik yapının yalın bir bant-boşluğu etkisinin ötesine geçerek, 3–4 Hz bandı dâhil geniş bir frekans aralığında enerjiyi dağıtarak sönümleyebildiğini göstermektedir. Dolayısıyla sistemin performansı belirli bir frekans bandına özgü

kalmamakta; farklı deprem karakteristikleri altında da tutarlı izolasyon potansiyeli sergilemektedir.



Şekil 22. 1D periyodik temel ve geleneksel temelin frekans alanında fourier genlik değerleri karşılaştırma

Sayısal analizler Tablo 6'da sunulmuş olup, ivme değerlerinin ikinci senaryoda arttığı fakat periyodik temelin bu artışa karşı halen baskılayıcı rol oynadığı sonucuna varılmıştır.

Tablo 6. 3000 adım sayısı ile elde edilen ivme karşılaştırması

Sistem	Maksimum İvme (g)	RMS İvme (g)
Periyodik Temel	0,26	0,13
Geleneksel Temel	0,48	0,30

Tablo 6 incelendiğinde, maksimum ivmede periyodik sistemin geleneksele göre %45 daha az ivme tepkisi olduğu, RMS ivmede ise bu farkın %57 olduğu hesaplanmıştır. Bu da enerji şiddeti artmış olmasına rağmen periyodik temelin hala baskılayıcı performans gösterdiğini gözler önüne sermektedir.

Sonuç olarak, elde edilen tüm bu bulgular, periyodik yapı sisteminin geleneksel temele göre belirli frekans bandında enerjiyi hapsedtiği, bu sayede yapı elemanlarına geçen dinamik yüklerin azaldığını ve yapı performansının artabileceğini ortaya koymuştur. Bu durum, sismik meta-malzemelerin sünek olmayan yapı sistemleri için enerjiyi yer değiştirme

yapmadan yutma kabiliyetine dayalı alternatif bir sismik yıkım azaltma stratejisi sunabileceğini göstermektedir.

4.3. Piezoelektrik Etkinliği ve Voltaj Gözlemleri

Bu bölümde, periyodik temelin piezoelektrik sensörlerin entegre edildiği katmanlar aracılığıyla gerilim (voltaj) üretme potansiyeli deneysel olarak incelenmiştir. Piezoelektrik malzemeler, uygulanan mekanik gerilmelere karşılık elektriksel potansiyel oluşturabilen aktif malzeme sınıfında yer almakta olup, sismik izolasyonlu yapı sistemlerinde pasif enerji sönümleyici veya sensör birimi olarak önemli katkılar sağlayabileceği ön görülmektedir.

Bu deneyde, servo motorun Arduino IDE yazılımındaki pulse genişliği 5 birim olarak sabit tutulmuş ve tam dönü adım sayısı 5000 olarak girilerek 20.667 saniyelik titreşim senaryosu uygulanmıştır. Deneysel sistemde, piezoelektrik katmanlar periyodik temel ve geleneksel temel arasında karşılaştırmalı olarak test edilmiştir.

Şekil 23, piezoelektrik disklerin **durgun** (titreşimsiz) ve **uyarılmış** (titreşimli) hâldeki gerilim (voltaj) çıktılarının yan yana karşılaştırmasını vermektedir. Sensörler titreşim uygulanmadığında ≈ 0.30 V düzeyinde sabit bir arka plan potansiyeli üretirken, 20 saniye süren rastgele titreşim protokolü altında bu değer **1.64 V** seviyesine—yaklaşık **beş katına**—kadar yükselmiştir. Ölçeklendirilmiş bir laboratuvar modelinde bile gözlenen bu dramatik artış, piezo tabakaların dış uyarımlara son derece duyarlı olduğunu ve mekanik enerjiyi anlamlı miktarda elektrik potansiyeline dönüştürebildiğini açık biçimde göstermektedir.

Bu bulgu iki kritik noktaya işaret eder:

1. **Sönüm-artı-enerji-kazanımı** - Piezoelektrik katmanlar, titreşim enerjisinin bir kısmını doğrudan elektriksel çıktıya dönüştürerek yapıya iletilen dinamik enerjiyi azaltmakta (sönümleme) ve aynı anda geri kazanılabilir bir voltaj üretmektedir.
2. **Ölçeklenebilir Performans** - Deney düzeneği küçük boyutlarda tasarlanmış olmasına rağmen elde edilen 1.64 V'luk tepe değeri, prototip boyutlarının büyütülmesiyle orantılı olarak daha yüksek gerilimler elde edilebileceğini; dolayısıyla depreme karşı pasif sönüm görevine ek olarak mikro-enerji hasadı amacıyla da kullanılabileceğini göstermektedir.

Bu yönüyle piezo destekli periyodik temel, klasik sismik izolasyonun ötesine geçerek yapısal güvenliği artırırken enerji sürdürülebilirliğine de katkı sunabilecek bütünleşik bir çözüm potansiyeli taşımaktadır.

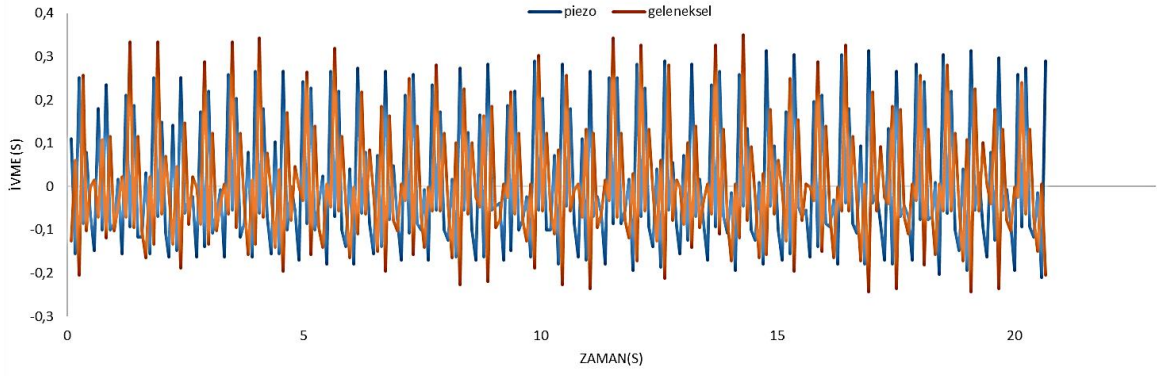


Şekil 23. a.) 20 saniye süren titreşim altında piezo sensörlerinden okunan maksimum volt değeri b.) Durgun halde piezo sensörlerinden okunan maksimum milivolt değeri

Şekil 24, piezo destekli periyodik temel sistemi ile geleneksel temel sistemi altında elde edilen ivme-zaman verilerini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Aynı titreşim protokolü altında elde edilen bu grafikler, piezoelektrik katmanların yapısal davranışa olan doğrudan etkisini görsel olarak ortaya koymaktadır. Grafiklerden açıkça görüldüğü üzere, periyodik temel sisteminde ivme tepkilerinin genlikleri belirgin biçimde daha düşüktür; bu da sisteme aktarılan titreşim enerjisinin piezo tabakalar tarafından kısmen emilerek sönmüldüğünü göstermektedir.

Bu farkın yalnızca enerji dönüşümünden ibaret olmadığı, aynı zamanda piezoelektrik katmanların viskoelastik bir davranış göstererek dinamik enerjiyi dağıtma ve bastırma işlevi gördüğü de anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, piezoelektrik yapıların aktif malzeme sınıfında yer almakla birlikte, pasif sönümleyici katkı sağlayarak titreşim iletim yolunu zayıflattığı ve yapıya iletilen ivmeyi kontrol altına aldığı söylenebilir.

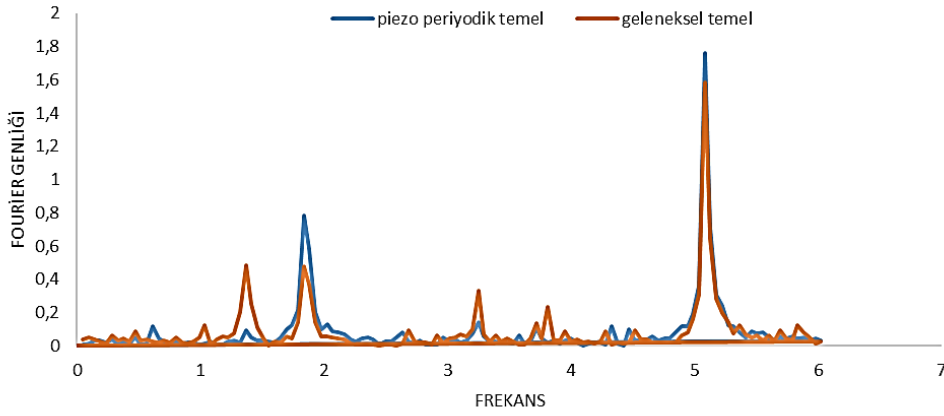
Bu bulgu, sadece laboratuvar düzeyinde bir performans değerlendirmesi olmanın ötesinde, deprem yalıtım sistemlerinde piezo destekli akıllı katmanların çok işlevli bir çözüm bileşeni olarak değerlendirilmesi gerektiğine işaret etmektedir.



Şekil 24. Piezo periyodik temel ve geleneksel temelin ivme tepki çıktılarının karşılaştırılması

Şekil 25’de sunulan Fourier spektrumu, piezo-destekli periyodik temel ile geleneksel temel sistemlerinin frekans alanındaki yanıtlarını karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Analiz, piezoelektrik katmanlı yapının yaklaşık 2 Hz civarında ikincil bir rezonans tepesi ürettiğini, ancak bu tepeye karşılık gelen genliğin düşük seviyede kaldığını ortaya koymaktadır. Buna karşın, her iki sistemde de ana rezonans 4.8 Hz bandında gözlenmiştir; ancak piezo destekli temelde bu baskın frekansın genliği hafifçe baskılanmış, enerji yoğunluğu daha geniş bir banda yayılmıştır. Bu seçici bastırma davranışı, Bölüm 3.6’da teorik olarak hesaplanan (5000 adım sayısına karşılık gelen) düşük frekans içeriğiyle tutarlıdır ve piezo sisteminin zararlı düşük frekans titreşimlerinde ek bir sönüm katmanı işlevi gördüğünü göstermektedir.

Düşük frekans aralıklarının yapılarda katastrofik hasar oluşturmada en kritik bant olduğu (Jia vd., 2010; Chopra, 2005) dikkate alındığında, piezoelektrik destekli periyodik temelin bu bölgede sağladığı ek sönümleme, yalnızca enerji dönüşümü değil aynı zamanda hedefe-yönelik titreşim kontrolü açısından da tasarımcılara önemli bir avantaj sunmaktadır.



Şekil 25. Piezo periyodik temel ve geleneksel temelin frekans alanında fourier genlik değerleri karşılaştırma

Tüm bu analizler Tablo 7 ile sayısallaştırılmıştır. Piezo periyodik temelde maksimum ivme 0.31 g, RMS ivme değeri ise 0.15 g olarak belirlenmiştir. Geleneksel temelde bu değerler sırasıyla 0.34 g ve 0.14 g'dir. RMS ivme değeri piezo sistemde daha yüksek olsa da maksimum ivmenin düşük çıkması, sönüm etkisi ve ivme yayılımının çarpışan yüzeylere aktarımındaki farklılıkları yansıtmaktadır. Maksimum ivme düşük çıkmasına rağmen ortalama ivme değerlerinde az miktarda oluşan fark piezo sensörlerinin geometrik diziliminin değiştirilmesi, piezo sensör malzeme özelliklerinin değiştirilmesi ile değişebileceği ön görülmektedir. Piezo sensörlerinin deprem mühendisliğinde kullanılabilirliğinin deneysel olarak inceleme çalışmalarının olabileceğini göstermesi adına sonuçlar tatmin edicidir.

Tablo 7. Piezo Periyodik Temel ve Geleneksel Temel Sistemlerinin Maksimum ve Ortalama İvme (RMS) Değerlerinin Karşılaştırılması

Sistem	Maksimum İvme (g)	RMS İvme (g)
Piezo Periyodik Temel	0,31	0,15
Geleneksel Temel	0,34	0,14

Sonuç olarak, piezo destekli periyodik temel sistemleri, yapıya aktırılan ivme genliğini azaltabildiği, düşük frekans değerlerinde ve geniş frekans aralıklarında sönüm yapabildiği (jin-chen Hsu vd. 2006; Xin-Ye Zou vd. 2007), aynı zamanda titreşim altında enerji dönüşümü (voltaj çıkışı) üretebilmektedirler. Bu yönüyle sismik enerji geri kazanımı ve sensörleştirme sistemlerinde potansiyel taşıdıkları değerlendirilmektedir ve bu çalışmanın bu alanda yapılacak çalışmaların ilk deneysel adımlarından birini oluşturduğu düşünülmektedir.

4.4. Genel Yorum ve Değerlendirme

Bu çalışma kapsamında yürütülen deneyler, farklı temel sistemlerinin (geleneksel, periyodik ve piezoelektrik tabakalı periyodik temeller) sismik davranışlarını karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Elde edilen veriler hem ivme-zaman hem de frekans alanında değerlendirilmiş ve her bir sistemin dinamik performansı sayısal ve grafiksel olarak analiz edilmiştir.

Geleneksel temel sistemi, tüm senaryolarda yüksek genlikli titreşimleri daha fazla iletmiş ve ivme spektrumunda daha yüksek pikler göstermiştir. Bu durum, enerjinin yapıya doğrudan aktarılması ile açıklanabilir. Oysa periyodik temel sisteminde, titreşim enerjisinin bir kısmı katmanlar tarafından yutulmuş ve yayılmıştır. Bu etki özellikle Fourier frekans spektrumunda düşük genlikli ve daha yayvan tepkiler olarak gözlemlenmiştir. Bu da periyodik yapıların dalga geçirmezliği (band gap) özelliğine sahip olabileceğini göstermektedir. Özellikle 2–4.5 Hz frekans aralığında belirgin bir spektral sönüm gözlenmiş; bu durum yapıların belirli frekans bantlarında sismik yalıtım sağladığına işaret etmektedir.

Piezoelektrik tabakalı periyodik temel ise yalnızca titreşim iletimi açısından değil, aynı zamanda elektriksel çıkış üretimi yönüyle de değerlendirilmiştir. Titreşim etkisi altındaki piezoelektrik malzeme, durgun halde kıyasla anlamlı düzeyde voltaj üretmiştir. Durgun hâlde ölçülen 0.786 V'luk çıkışın, titreşim altında 1.643 V'a yükselmesi; yaklaşık 5 katlık bir artışla yapının elektriksel potansiyel üretebildiğini ortaya koymuştur. Bu durum, piezo destekli yapıların aktif izolasyon sistemi olmasının ötesinde enerji dönüşümü potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Ayrıca yapılan karşılaştırmalar, periyodik sistemlerin RMS ivme değerlerinde genel bir azalma sağladığını, dolayısıyla yapıya aktarılan titreşim enerjisinin hem genlik hem de süre bakımından daha kontrollü hâle geldiğini ortaya koymuştur. Örneğin, 4000 adım senaryosunda geleneksel temelin RMS değeri 0.19 g iken, periyodik temelde bu değer 0.11 g olarak kaydedilmiş; yaklaşık %43'lük bir azalma hesaplanmıştır. Aynı şekilde piezo destekli temelde bu fark %57'ye ulaşmıştır. Bu sonuçlar, yalnızca anlık tepe değerlerini değil, sürekli titreşim etkisinin de periyodik sistemlerce başarıyla sınırlandırıldığını göstermektedir.

Sonuç olarak; piezoelektrik katkılı periyodik tabakalı temellerin, geleneksel temellere kıyasla titreşim enerjisini azaltma, yayma ve kontrol etme potansiyeline sahip olduğu görülmüştür.

Ayrıca, aynı yapıların ek olarak enerji dönüşümü sağlayabildiği de deneysel olarak doğrulanmıştır. Bu bağlamda çalışmada test edilen sistemlerin sismik izolasyonun ötesine geçerek, yapısal dayanım ve enerji sürdürülebilirliği açısından da önemli katkılar sunduğu değerlendirilmiştir.



5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneysel araştırma ile üç farklı temel sistemi (geleneksel betonarme temel, 1D meta-malzeme periyodik temel ve piezoelektrik sensörlerle donatılmış periyodik temel) dinamik performansları açısından değerlendirilmiştir. Uygulanan yatay sarsıntı senaryoları altında elde edilen ivme-zaman verileri, frekans dönüşümleri ve piezoelektrik gerilim ölçümleri doğrultusunda yapılan analizler; her bir sistemin sismik dalga iletimine karşı gösterdiği tepkiyi nicel ve nitel olarak ortaya koymuştur.

5.1. Tartışma

Bu çalışmada elde edilen deneysel bulgular, farklı temel sistemlerinin sismik davranışları üzerindeki etkilerini çok yönlü olarak ortaya koymuştur. Elde edilen ivme-zaman verileri, frekans dönüşümleri ve piezoelektrik gerilim gözlemleri ışığında şu değerlendirmeler yapılmıştır:

- Geleneksel betonarme temel, uygulanan sarsıntı altında yüksek genlikli ivme tepkileri üretmiştir. Frekans spektrum analizleri, bu sistemin baskın frekans içeriklerine yüksek genlikli yanıt verdiğini, bu nedenle enerjiyi doğrudan yapıya aktardığını göstermektedir. Bu durum, sistemin sönümleme kapasitesinin sınırlı olduğunu göstermektedir.
- 1D meta-malzemeli periyodik temel, katmanlı yapısı sayesinde belirli frekans aralıklarında “band gap” (yasak bant) etkisi oluşturarak sismik dalgaların zayıflatılmasını sağlamıştır. Bu yapı, geleneksel temele kıyasla maksimum ivme ve RMS ivme değerlerinde belirgin azalma sağlamış ve bu yönüyle yapısal izolasyon kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca Fourier dönüşümü ile elde edilen frekans spektrumları, düşük genlikli, dağılmış yanıtların sistemin filtreleme özelliğini desteklediğini göstermektedir.
- Piezoelektrik katkılı periyodik temel, yalnızca sönümleme kapasitesi değil, aynı zamanda enerji dönüşümü yeteneğiyle de değerlendirilmiştir. Bu sistem, titreşim altındaki uygulamalarda yaklaşık 1.64 V düzeyinde elektriksel çıkış üretmiş; bu yönüyle yalnızca pasif değil, aktif bir enerji geri kazanım mekanizması sunduğunu ortaya koymuştur.
- Elde edilen RMS ivme değerlerinin düşüklüğü, enerji akış grafikleri ile birlikte değerlendirildiğinde, periyodik yapıların deprem enerjisini zamana yayarak dağıttığını ve yapıya aktarılan ivme yüklerini sınırladığını ortaya koymuştur. Bu durum, periyodik temel

sistemlerinin yalnızca iletimi değil, enerjiyi yayma ve yönlendirme kapasitesi ile öne çıktığını göstermektedir.

5.2. Sonuç

Sonuç olarak;

- 1D periyodik temeller, geleneksel temellere kıyasla sarsıntı altında yapı elemanlarına aktarılan titreşim enerjisini azaltmakta, maksimum ve RMS ivme değerlerinde önemli azalmalar sağlamaktadır.
- Bu sistemler, belirli frekans bantlarında sönümleme yapabilmekte ve enerji aktarımını dağıtarak yapısal kontrol açısından avantaj sunmaktadır.
- Piezoelektrik katkı sayesinde, titreşim altındaki sistemler yalnızca sönümleme değil; aynı zamanda elektriksel gerilim üretimi (enerji geri kazanımı) ve sensörleşme potansiyeli ile çok işlevli hale gelmektedir.
- Bu yönüyle piezo destekli periyodik temeller, ileri mühendislik uygulamalarında aktif izolasyon çözümleri olarak değerlendirilebilecek özgün bir yaklaşıma sahiptir.

KAYNAKÇA

- Achaoui, Y., Ungureanu, B., Enoch, S., Brûlé, S., & Guenneau, S. (2016). Seismic waves damping with arrays of inertial resonators. *Extreme Mechanics Letters*, 8, 30-37.
- Atasever, G. (2019). İki boyutlu katı/katı fononik kristallerde elastik bandyapıları (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Blandon, C. A., & Priestley, M. J. N. (2005). Equivalent viscous damping equations for direct displacement based design. *Journal of earthquake Engineering*, 9(sup2), 257-278.
- Brûlé, S., Javelaud, E. H., Enoch, S., & Guenneau, S. (2014). Experiments on seismic metamaterials: molding surface waves. *Physical Review Letters*, 112(13), 133901.
- 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).
- 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 & Design*, 175, 107813.
- Chopra, A. K., & Dinamiği, Y. (2015). *Teori ve Deprem Mühendisliği Uygulamaları*. Ankara: Palme Yayıncılık, Dördüncü Baskıdan Çeviri.
- Çelebi, E., Fırat, S., Beyhan, G., Çankaya, İ., Vural, İ., & Kırtel, O. (2009). Field experiments on wave propagation and vibration isolation by using wave barriers. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 29(5), 824-833.
- De Espinosa, F. M., Jimenez, E., & Torres, M. (1998). Ultrasonic band gap in a periodic two-dimensional composite. *Physical Review Letters*, 80(6), 1208.
- Finocchio, G., Casablanca, O., Ricciardi, G., Alibrandi, U., Garesci, F., Chiappini, M., & Azzerboni, B. (2014). Seismic metamaterials based on isochronous mechanical oscillators. *Applied Physics Letters*, 104(19).
- Hou, Z., Wu, F., & Liu, Y. (2004). Phononic crystals containing piezoelectric material. *Solid State Communications*, 130(11), 745-749.
- Jia, G., & Shi, Z. (2010). A new seismic isolation system and its feasibility study. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 9(1), 75-82.
- Khelif, A., & Adibi, A. (2015). *Phononic crystals*. Berlin, Germany, Springer, 10, 978-1.
- Krödel, S., Thomé, N., & Daraio, C. (2015). Wide band-gap seismic metastructures. *Extreme Mechanics Letters*, 4, 111-117.

- Kushwaha, M. S., Halevi, P., Dobrzynski, L., & Djafari-Rouhani, B. (1993). Acoustic band structure of periodic elastic composites. *Physical Review Letters*, 71(13), 2022.
- Miniaci, M., Krushynska, A., Bosia, F., & Pugno, N. M. (2016). Large-scale mechanical metamaterials as seismic shields. *New Journal of Physics*, 18(8), 083041.
- Pennec, Y., Vasseur, J. O., Djafari-Rouhani, B., Dobrzyński, L., & Deymier, P. A. (2010). Two-dimensional phononic crystals: Examples and applications. *Surface Science Reports*, 65(8), 229-291.
- Robillard, J. F., Matar, O. B., Vasseur, J. O., Deymier, P. A., Stippinger, M., Hladky-Hennion, A. C., ... & Djafari-Rouhani, B. (2009). Tunable magnetoelastic phononic crystals. *Applied Physics Letters*, 95(12).
- Sánchez-Pérez, J. V., Caballero, D., Martínez-Sala, R., Rubio, C., Sánchez-Dehesa, J., Meseguer, F., ... & Gálvez, F. (1998). Sound attenuation by a two-dimensional array of rigid cylinders. *Physical Review Letters*, 80(24), 5325.
- Seçgin, A., & Baygün, T. (2019). İç Boşluklu Akustik Metamalzemelerin Homojenizasyonu ve İletim Kayıplarının Transfer Matris Metodu ile Belirlenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 21(62), 449-459.
- Sigalas, M. M. (1992). Elastic and acoustic wave band structure. *Journal of sound and vibration*, 158(2), 377-382.
- Yan, Y., Laskar, A., Cheng, Z., Menq, F., Tang, Y., Mo, Y. L., & Shi, Z. (2014). Seismic isolation of two-dimensional periodic foundations. *Journal of Applied Physics*, 116(4).
- Yan, Y., Cheng, Z., Menq, F., Mo, Y. L., Tang, Y., & Shi, Z. (2015). Three-dimensional periodic foundations for base seismic isolation. *Innovative Materials and Structures*, 24(7), 075006.
- Zou, X. Y., Chen, Q., Liang, B., & Cheng, J. C. (2007). Control of the elastic wave bandgaps in two-dimensional piezoelectric periodic structures. *Smart Materials and Structures*, 17(1), 015008.
- Witarto, W., Wang, S. J., Yang, C. Y., Nie, X., Mo, Y. L., Chang, K. C., ... & Kassawara, R. (2018). Seismic isolation of small modular reactors using metamaterials. *AIP Advances*, 8(4).
- Witarto, W., Wang, S. J., Yang, C. Y., Wang, J., Mo, Y. L., Chang, K. C., & Tang, Y. (2019). Three-dimensional periodic materials as seismic base isolators for nuclear infrastructure. *AIP Advances*, 9(4).

Xiang, H. J., Shi, Z. F., Wang, S. J., & Mo, Y. L. (2012). Periodic materials-based vibration attenuation in layered foundations: experimental validation. *Innovative Materials and Structures*, 21(11), 112003.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Mehmet Furkan ÖZ
Eğitim Durumu	
Lise Öğrenimi	Erzincan Fen Lisesi
Lisans Öğrenimi	Yıldız Teknik Üniversitesi
İletişim	
E-Posta Adresi	mfurkan24@gmail.com
Tarih	