

T.C.
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



FARKLI TİP NEGATİF POİSSON ORANINA SAHİP
(AUXETIC) KİRİŞLERİN TİTREŞİM ESASLI ENERJİ
HASADI PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AFİYE SUGEÇ

TEZ DANIŞMANI

Doç. Dr. Fevzi Çakmak BOLAT

BOLU, NİSAN-2022

KABUL VE ONAY SAYFASI

Afiye SUGEÇ tarafından hazırlanan “FARKLI TİP NEGATİF POISSON ORANINA SAHİP (AUXETIC) KİRİŞLERİN TİTREŞİM ESASLI ENERJİ HASADI PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ” adlı tez çalışması jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak oy birliğiyle kabul edilmiştir. 26/04/2022

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Doç. Dr. Fevzi Çakmak BOLAT
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Üye
Prof. Dr. Murat PAKDİL
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Üye
Dr. Öğr. Üyesi Sinan BAŞARAN
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. İbrahim KÜRTÜL
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir,

aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Teze ilişkin 25/05/2022 tarihinde Turnitin adlı intihal tespit programından enstitü müdürlüğünce belirlenen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan benzerlik raporuna göre, tezin benzerlik oranı % 7 olarak tespit edilmiştir.

.....

AFİYE SUGEÇ

ÖZET

**FARKLI TİP NEGATİF POISSON ORANINA SAHİP (AUXETIC)
KİRİŞLERİN TİTREŞİM ESASLI ENERJİ HASADI
PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
AFİYE SUGEÇ
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. FEVZİ ÇAKMAK BOLAT)

**BOLU, NİSAN-2022
XIII+77**

Enerji hasadı, her geçen gün artan enerji ihtiyacı için alternatif bir enerji kazanım yöntemi olarak bilinmektedir. Enerji hasadı çalışmaları, küçük ölçekli sensör, aktivatör ve otonom araçların enerji ihtiyaçlarının karşılanması için son yıllarda yoğun olarak çalışılmaktadır. Enerji hasadını gerçekleştirmek farklı tip akıllı malzemeler ile sağlanmaktadır. Piezoelektrik malzemelerde enerji hasadı uygulamalarında kullanılan malzeme türlerinden birisidir. Kirişler üzerindeki yer değiştirme enerji hasat performansını doğrudan etkileyeceği bilinmektedir. Bu çalışma kapsamında enerji hasadını klasik kirişlere kıyasla arttırmak amacıyla auxetic yapıda yeni tip kirişler tasarlanmıştır. Bu kirişlerde auxetic davranış durumunun ortaya çıkabilmesi için yapısal değişiklikler yapılmıştır. Farklı geometriler ile oluşturulan negatif poisson oranlı auxetic davranışlı kirişler ile düz kiriş yapısının yer değiştirmeleri karşılaştırılmıştır. Piezoelektrik malzemelerden enerji hasadı gerçekleştirilecek malzemenin bulunduğu bölgede şekil değiştirme ne kadar fazla olursa önerilen hasat yapısından o kadar fazla enerji elde edilir.

Bu tez çalışmasında, iki aşamadan oluşan çalışmalar gerçekleştirilmiştir. İlk olarak bilgisayar destekli tasarım (CAD) ile modellenerek tasarlanan auxetic kirişlerin, sonlu elemanlar metodu (FEM) ile statik, modal ve harmonik analizleri yapılmıştır. Sonrasında, malzeme türü Al 6061 seçilerek tasarlanan tüm kirişler lazer kesim metodu ile üretilmiştir. Üretilen kirişlere, titreşim testi yapılarak ivme ölçerler ile tüm kirişlerin sahip olduğu doğal frekanslar elde edilmiştir. Deneysel olarak elde edilen doğal frekanslar ile analiz sonuçları birbiriyle uyumlu çıkmıştır. Auxetic boşaltmalar kirişin katılığını azaltarak doğal frekanslarını düşürmüştür. Statik yük altında, tasarlanan auxetic kirişler daha fazla yer değiştirmeye sahip olarak enerji hasadı için uygundur. Kirişler doğal frekans bölgelerinde zorlanmaya maruz kaldıkları zaman enerji hasadı üretebilmek için piezoelektrik patchlerin yapıştırıldığı bölgelerin yer değiştirme miktarlarındaki artış auxetic kirişlerde düz kirişlere kıyasla ortalama %80 daha fazla olmuştur.

ANAHTAR KELİMELER: Poisson Oranı, Auxetic Malzeme, Piezoelektrik Malzeme, Titreşim Esaslı Enerji Hasadı, Operasyonel Modal Analiz

ABSTRACT

INVESTIGATION OF VIBRATION BASED ENERGY HARVEST PERFORMANCES OF AUXETIC BEAMS WITH DIFFERENT TYPES OF NEGATIVE POISSON RATIO (AUXETIC)

MSC THESIS

AFİYE SUGEÇ

BOLU ABANT İZZET BAYSAL UNIVERSITY

INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: ASSOC. DR. FEVZİ ÇAKMAK BOLAT)

BOLU, APRIL 2022

XIII+77

Energy harvesting is known as an alternative energy recovery method for the ever-increasing energy need. Energy harvesting studies have been intensively studied in recent years to meet the energy needs of small-scale sensors, activators and autonomous vehicles. Energy harvesting is achieved with different types of smart materials. It is one of the material types used in energy harvesting applications in piezoelectric materials. It is known that the displacement on the beams will directly affect the energy harvesting performance. Within the scope of this study, new type beams in auxetic structure were designed in order to increase the energy harvest compared to conventional beams. Structural changes were made in these beams to reveal the auxetic behavior. The displacements of the straight beam structure and the negative poisson ratio auxetic behavior beams created with different geometries were compared. The greater the deformation in the region of the material to be harvested from piezoelectric materials, the more energy is obtained from the proposed harvesting structure.

These theses were carried out in two stages. Firstly, modal analyzes of auxiliary trainings were made with the latest method FEM methods, by modeling them with trained designs (CAD). All types were prepared by laser cutting method by choosing the next material Al 6061. The nails were obtained from the frequencies of all beams with accelerometers from the tests used. It is analyzed with the standard frequencies obtained experimentally and explained with examples. Auxetic discharges have lowered their natural frequency, reducing the stiffness of the projectile. Under static load, auxetic beams have greater displacement, making them suitable for energy harvesting. The beams can be automatically evaluated, made harder and produced, with an average of 80% more than the scores in the greater number of auxetic marks in the displacements of the regions where the piezoelectric patches are attached for energy harvesting.

KEYWORDS: Poisson Ratio, Auxetic Material, Piezoelectric Material, Vibration Based Energy Harvesting, Operational Modal Analysis

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL VE ONAY SAYFASI	iii
ETİK BEYAN.....	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
TABLO LİSTESİ	xi
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ	xii
TEŞEKKÜR	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI.....	2
2.1 Auxetic Yapı Tarihçesi	2
2.2 Auxetic Yapı Üzerinden Enerji Hasadıyla İlgili Yapılan Çalışmalar	6
3. MATERYAL VE YÖNTEM	14
3.1 Tasarım	14
3.2 Kullanılan Malzeme ve Özellikleri.....	15
3.3 Üretim	16
3.4 Nümerik Analiz	17
3.4.1 Analiz Modeli Oluşturma	17
3.4.2 Statik Analiz	19
3.4.3 Modal Analiz	19
3.4.4 Harmonik Analiz	20
3.5 DeneySEL Çalışma	21
3.5.1 Çekiç Tahrikli Titreşim Testi	21
3.5.2 Sarsıcı Tahrikli Titreşim Testi	21
3.5.3 Numunelerin Hazırlanması.....	23
4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR.....	25
4.1 Düz Kiriş Analitik ve Nümerik Şehim Oranı	25
4.2 Statik Yük Altındaki Yer Değiştirmeler	26
4.3 Doğal Frekanslar.....	27
4.4 Harmonik Cevaplar.....	28
4.5 DeneySEL Sonuçlar	34
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	43
5.1 Statik Yük Altındaki Yer Değiştirmeler	43
5.2 Doğal Frekanslar.....	44
5.3 Harmonik Cevaplar.....	44
5.4 DeneySEL Sonuçlar	44
5.5 Daha Sonraki Çalışmalar İçin Öneriler.....	45

6. KAYNAKLAR.....	46
7. EKLER.....	48
1. 1 mm Düz Kiriş Sinüs Tarama Titreşim Test Verileri	48



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Düz ve auxetic yapıların çekme kuvveti altındaki davranışı	2
Şekil 2.2 Yeni oluşturulan sekizgen auxetic re-entrant yapı (S. Wang vd., 2022)	6
Şekil 2.3 Piezoelektrik yama (Gmbh, 2020)	7
Şekil 2.4 Piezoelektrik yama çeşitleri (Gmbh, 2020)	8
Şekil 2.5 Farklı geometride auxetic yapılar ve düz kiriş (Eghbali, Younesian, & Farhangdoust, 2020)	9
Şekil 2.6 Auxetic yapılar ve düz kirişin enerji hasadı verimlilikleri (Eghbali, Younesian, & Farhangdoust, 2020)	9
Şekil 2.7 Düz ve auxetic yapıda konsol kirişten enerji hasadı (Eghbali, Younesian, Moayedizadeh, vd., 2020)	9
Şekil 2.8 Düz ve auxetic yapılardan elde edilen güç (Eghbali, Younesian, Moayedizadeh, vd., 2020)	10
Şekil 2.9 Auxetic enerji hasadı çalışma şeması (K. Chen vd., 2021)	11
Şekil 2.10 Nümerik ve deneysel enerji hasadı grafiği (Ebrahimian vd., 2021)	11
Şekil 2.11 Deneysel ve nümerik olarak enerji verimi kıyaslaması (B. Chen vd., 2022)	13
Şekil 3.1 Düz ankastre kiriş tasarımı	14
Şekil 3.2 Auxetic hücre yapıları	15
Şekil 3.3 Kirişlerin üretimi	16
Şekil 3.4 Zımpara işlemi yapılan numune	16
Şekil 3.5 Analiz şeması	17
Şekil 3.6 Koordinat sistemi	17
Şekil 3.7 Auxetic yüzeylere ağ yapısı ataması	18
Şekil 3.8 Kirişin tamamındaki ağ yapısı ataması	18
Şekil 3.9 Kirişlere uygulanan kuvvet noktası	18
Şekil 3.10 Fixed support noktaları	19
Şekil 3.11 Z yönünde effective mass miktarı	19
Şekil 3.12 Mod şekilleri	20
Şekil 3.13 Harmonik analiz kuvvet noktası	20
Şekil 3.14 Çekiç tahrikli titreşim test düzeneği	21
Şekil 3.15 Sarsıcı (Shaker)	22
Şekil 3.16 İvme ölçer	22
Şekil 3.17 Fikstürün sarsıcı üzerine bağlanması	24
Şekil 3.18 Numune ve ivme ölçer yerleşimi	24
Şekil 4.1 Düz kirişin sehim miktarı	25
Şekil 4.2 Kirişlerin nümerik harmonik cevapları ($t=1$)	28
Şekil 4.3 Kirişlerin ω_1 nümerik harmonik cevapları ($t=1$)	29
Şekil 4.4 Kirişlerin ω_2 nümerik harmonik cevapları ($t=1$)	30
Şekil 4.5 Kirişler için ω_3 nümerik harmonik cevapları ($t=1$)	31
Şekil 4.6 Kirişler için ω_4 nümerik harmonik cevapları ($t=1$)	31
Şekil 4.7 Kirişlerin nümerik harmonik cevapları ($t=2$)	32
Şekil 4.8 Kirişlerin ω_1 nümerik harmonik cevapları ($t=2$)	33
Şekil 4.9 Kirişlerin ω_2 nümerik harmonik cevapları ($t=2$)	33
Şekil 4.10 Kirişlerin ω_3 nümerik harmonik cevapları ($t=2$)	34

Şekil 4.11 Kirişlerin deneysel spektrum sonuçları ($t=1$)	35
Şekil 4.12 Düz kiriş için deneysel ve nümerik doğal frekans karşılaştırması ($t=1$)	36
Şekil 4.13 Re-entrant kiriş için deneysel ve nümerik doğal frekans karşılaştırması ($t=1$).....	36
Şekil 4.14 Triangle kiriş için deneysel ve nümerik doğal frekans karşılaştırması ($t=1$).....	37
Şekil 4.15 Square kiriş için deneysel ve nümerik doğal frekans karşılaştırması ($t=1$)	37
Şekil 4.16 Star kiriş için deneysel ve nümerik doğal frekans karşılaştırması ($t=1$)	38
Şekil 4.17 Kirişlerin deneysel spektrum sonuçları ($t=2$)	39
Şekil 4.18 Kalınlık 2 mm düz kiriş için deneysel ve nümerik doğal frekans karşılaştırması.....	40
Şekil 4.19 Re-entrant kiriş için deneysel ve nümerik doğal frekans karşılaştırması ($t=2$).....	40
Şekil 4.20 Triangle kiriş için deneysel ve nümerik doğal frekans karşılaştırması ($t=2$).....	41
Şekil 4.21 Square kiriş için deneysel ve nümerik doğal frekans karşılaştırması ($t=2$)	41
Şekil 4.22 Star kiriş için deneysel ve nümerik doğal frekans karşılaştırması ($t=2$)	42

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1 Alüminyum 6061 alaşımının mekanik özellikleri.....	15
Tablo 3.2 Alüminyum 6061 alaşımının kimyasal özellikleri	15
Tablo 3.3 Sarsıcı (shaker) özellikleri	23
Tablo 4.1 Kirişlerin deformasyonu.....	26
Tablo 4.2 Auxetic yapının yer değiştirmesi	26
Tablo 4.3 Kirişlerin modal analiz sonuçları (t=1)	27
Tablo 4.4 Kirişlerin modal analiz sonuçları(t=2)	27
Tablo 4.5 Kirişlerin nümerik harmonik analiz sonuçları (t=1).....	29
Tablo 4.6 Kirişlerin nümerik harmonik analiz sonuçları (t=2).....	32
Tablo 4.7 Kirişlerin deneysel doğal frekans sonuçları (t=1)	35
Tablo 4.8 Kirişlerin deneysel doğal frekans sonuçları (t=2)	38

KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

CAD	: Computer Aided Design
CNC	: Computer Numeric Control
E	: Elastisite Modülü
FEM	: Finite Element Method
g	: Genlik
Hz	: Frekans
I	: Atalet Momenti
L	: Uzunluk
P	: Basınç
PZT	: Piezoelektrik
ω_n	: Doğal Frekans
ϑ	: Poisson Oranı

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında çalışma konusunun belirlenmesi ve hazırlanması sürecinde kıymetli bilgi ve tecrübeleri ile beni yönlendiren, çalışmanın oluşması ve yürütülmesi sırasında yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer tez danışmanım Doç. Dr. Fevzi Çakmak BOLAT'a en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Tez çalışmasının her anında, engin bilgi ve deneyimiyle önemli katkıları bulunan Dr. Ali ÖZDEMİR'e değerli yönlendirmeleri ve yardımlarından dolayı çok teşekkür ederim.

Yüksek lisans bursiyeri olarak görev aldığım TÜBİTAK UZAY'da tez süreci boyunca beni her an motive eden ve bana her zaman destek olan, değerli yöneticim Dr. Burcu DİKMEN YALÇINKAYA'ya canı gönülden teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen çalışma arkadaşlarım Kerem GÜL, Halil İbrahim ÖZGELEN, Oğuzhan TURHAN, Mert İŞLER, Dr. Hüsne Seda DEVECİ, Onur GÜZEL'e ve canım aileme teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

Günümüz teknolojisinde küçük ölçekli elektronik cihazların enerji ihtiyaçları sürekli olarak geliştirilen inovasyonlar ile azalmaktadır. Bu cihazların enerji ihtiyaçları enerji hasadı ile elde edilebilir. Enerji hasadında akıllı malzemelerin uygun dinamik yapılarda kullanılmasıyla enerji hasadı elde edilebilir bu yüzden frekansa bağlı en yüksek yer değiştirmenin analiz edilmesi önemli bir çalışma konusudur.

Malzemelerin var olan özelliklerine ek özellikler katarak ve ek tasarımlar yapılarak elde edilen yeni malzeme türlerine akıllı malzemeler denir. Akıllı malzemelerin uzay ve havacılık, kompozit teknolojisi, otomotiv, biyomedikal, tekstil gibi pek çok sektörde kullanım alanları bulunmaktadır. Akıllı malzemelerin bir türünde auxetic malzemelerdir. Auxetic malzemeler negative poisson oranına sahiptir. Bu malzemeler yük altında her iki yönde uzama veya genişleme özelliği göstermektedir. Bu yapıların kirişlerde kullanılması titreşim altında enerji hasadını arttırılmaktadır.

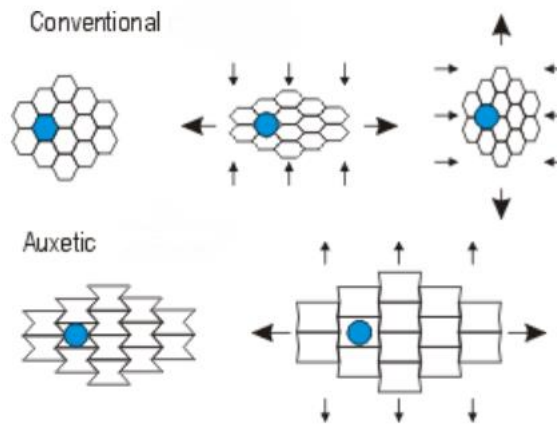
Bu çalışmanın amacı, enerji hasadını arttırmak için kirişlerde farklı geometrilerde boşaltmalar yaparak, auxetic ve düz kirişlerin nümerik ve deneysel çalışmalardaki cevaplarına göre enerji hasadı verim yönüyle karşılaştırmaktır. Yüksek şekil değiştirme özelliklerine sahip auxetic yapıların yardımı ile tasarlanan kirişlerin titreşim altında davranışlarının incelenmesidir. Farklı geometride tasarımı yapılan auxetic yapıların sonlu elemanlar metodu (FEM) ile statik analizlerini gerçekleştirilecektir. Analizleri yapılan auxetic malzemelerin deneysel olarak değerlendirilmesi için tasarlanan kirişler üretilecektir. Üretilen kirişlere titreşim testi uygulanarak ivme ölçerler üzerinden enerji hasadı ile yer değiştirmeleri hesaplanacak ve analiz ile deneysel sonuçlar karşılaştırılacaktır. Bu karşılaştırmanın sonucunda yükleme altında yer değiştirme sonuçlarına göre düz kirişe göre en tasarlanan auxetic kirişlerin verimleri kıyaslanacaktır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI

Günümüz teknolojisinde, auxetic yapıların düz yapılara kıyasla pek çok özellik bakımından daha verimli olduğundan auxetic modellerden enerji hasadı elde edilmesi üzerine gerçekleştirilen çalışmalar yoğunluk kazanmıştır. Tez çalışmasının bu kısmında auxetic yapı ve enerji hasadı kavramları tanıtılarak öncesinde yapılmış olan akademik araştırmalar verilecektir.

2.1 Auxetic Yapı Tarihçesi

Gelişen teknoloji yeni özelliklere sahip malzemelere olan ihtiyacı da beraberinde getirmiştir. Bu yeni malzeme özelliği taşıyan yapılardan biride auxetic olarak adlandırılan yapılardır. Bu yapılar negative poisson oranına sahiptirler. Bu auxetic yapıların negatif poisson oranına sahip olması geometrik özellikleri belirli oranda değiştirilmesiyle mümkün olmaktadır. Pozitif poisson oranına sahip malzemeler çekme kuvveti altında çekme yönünde uzama gerçekleşir, kuvvete dik yönde ise kısıalma meydana gelmektedir. Auxetic yapıların değişen geometrileri sayesinde ise çekme kuvveti altında kuvvete dik yönde uzama meydana geldiği görülmüştür (Gibson vd., 1982). İlk olarak Evans 1991 yılında negative poisson oranına sahip olan bu yapıları auxetic olarak adlandırmaya başlamıştır (Evans vd., 1991).



Şekil 2.1 Düz ve auxetic yapıların çekme kuvveti altındaki davranışı

Auxetic yapı geleneksel malzemeden negative poisson oranı nedeniyle çok farklıdır. Poisson oranı (ν), elastic yükleme bölgesindeki enine gerinme ile boyuna gerinmenin oranıdır ve malzeme esnetildiğinde ne kadar inceldiğini ifade eder. Auxetic yapı, mikro yapı geometrisinin özel düzenlenmesi ve malzemenin mikro yapısını oluşturan elemanlarda meydana gelen belirli mekanik deformasyon tarafından sağlanır. Kuvvet uygulandığında malzemenin iç yapısı ve deformasyon türü auxetic davranışa sebep olur.

Auxetic malzemeler doğal auxetic malzemeler ve insan yapımı auxetic malzemeler olmak üzere iki şekilde sınıflandırılır. Demir sülfid, moleküler seviyedeki ilk auxetic doğal yapılardır ve 1900lü yıllarda bulunmuştur. Doğal auxetic malzemelere deri örneği verilebilir. Semender derisi, kedi derisi gibi deri çeşitleri negatif poisson oranına sahiplerdir.

İlk yapay hücresel auxetic yapı 1982 de 2-D silikon kauçuk bal peteği yapılarda tasarlanmıştır. Daha sonrasında birçok farklı yapı tasarlanarak çalışmalar yapılmıştır. Seneler süren çalışmalar neticesinde, auxetic davranış sergileyen farklı geometrik yapılar ve modeller tasarlanmış, üretilmiş, test ve deneyleri yapılmıştır. Bu çalışmalarda sıklıkla tercih edilen auxetic yapılar re-entrant yapılar, chiral, yıldız şekilli yapılardır (Uzun, 2017).

Malzemelerin auxetic davranış gösterecek şekilde tasarlanması durumunda akustik davranış, ekstra sürtünme dayanımı, kayma modülleri, kırılma toklukları ve indentasyon dirençleri artar. Bütün bu özellikleri sebebiyle auxetic yapılar çok çeşitli alanlarda kullanılır. Gözenekli yapısından dolayı medikal alanında bandajların işlevselliği arttırması sebebiyle tercih edilir. Bir diğer medikal kullanımı ameliyat ipliği, yapay kas ve damar genişleticilerdir. Bir diğer taraftan toprak destekleyici malzeme olarak özellikle araç-tren yolu, duvar ve köprü destekleyicisi gibi kullanımı için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Akustik özellikleri iyi olduğu için ses kontrolü istenen alanlarda kullanılarak maksimum ses korumasını sağlar.

Auxetic yapılar üzerine çalışmalar devam ederken auxetic yapıların darbe altındaki mekanik davranışları araştırmacıların dikkatini çekmiştir. Auxetic yapılar üzerindeki çekme, yükleme gibi çalışmalarda daha çok analitik ve nümerik yöntemler kullanılmıştır.

Sanami (2014) ve arkadaşları tarafından yapılan bu çalışmada auxetic etki araştırılmıştır. Auxetic ve düz bir yapı darbe altında incelenmiş ve sönümleme özelliklerine göre karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada auxetic yapının darbe sönümleme yeteneğinin düz yapıya göre çok üstün olduğu görülmüştür (Sanami vd., 2014).

Jiang (2016), auxetic kiral yapılar üzerine yapılmış olan bu çalışmada iki farklı auxetic kiral yapı tasarlanmış ve bu yapılara tek eksenli sıkıştırma yapılarak mekanik deneyler yapılmıştır. Sonrasında bu kiral yapılar için analitik çalışmalar ve nümerik analizler yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Auxetic yapılardaki geometrik değişikliklerin deneysel, nümerik ve analitik farkları gözlenmiştir (Jiang, 2016).

Karaca (2016), yapmış olduğu tez çalışmasında, auxetic malzemeleri incelemiştir. Tasarlanan auxetic geometriler üzerinde şekil değişikliği uygulanmıştır. Numuneler üretilmeden önce doğru mekanik davranışlarının tespiti için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Sonrasında numuneler üretilerek nümerik sonuçlar ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Simülasyon ve deneylerde birbirine yakın sonuçlar elde edilmiş ve böylece auxetic yapılar için tasarım ve analiz prosedürlerinin doğruluğu kanıtlanmıştır (Karaca, 2016).

Yalçın ve arkadaşları (2018) yaptıkları çalışmada, geleneksel bal peteği yapı ile auxetic re-entrant yapı arasında karşılaştırma yapmayı hedeflemiştir. Ankastre giriş şeklinde tasarlanan iki yapı statik gerilmeye maruz bırakılarak yer değiştirmeleri hesaplanmıştır. Daha sonra modal analiz ile doğal frekansları hesaplanmıştır. Veriler birbirleriyle karşılaştırıldığında bal peteği ve auxetic yapıların geometrik olarak birbirine benzese de negatif poisson oranı sebebiyle her iki yapının da birbirinden farklı tepkiler verdiği kanıtlanmıştır (Yalçın vd., 2018).

Tatlier (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, auxetic bal peteği yapısındaki enerji sönümleme davranışları nümerik olarak incelemiştir. Bu çalışma da 0° , 30° , 45° , 60° ve 90° olmak üzere farklı açılara sahip 5 auxetic bal peteği yapısı incenmiş, nümerik analiz sonuçlarına göre 90° petek yapısına sahip yapının daha fazla enerji sönümlediğini göstermiştir (Tatlier, 2021).

Sree (2020), yapmış olduğu çalışmada, 4 farklı auxetic geometrinin kuvvet altında deplasmanları nümerik analiz ile incelenmiş, poisson oranları analitik olarak hesaplanmıştır. En yüksek poisson oranına sahip yapının en fazla auxetic davranış gösteren yapı olduğu gözlenmiştir (P. Siva Naga Sree, 2020).

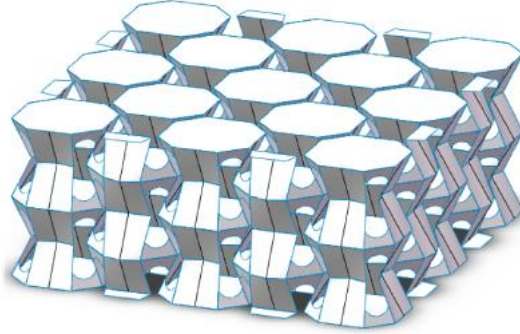
Linforth (2020), mayın saldırılarına karşı koruma sistemlerinde auxetic yapıların kullanılmasının etkilerini araştırmıştır. Patlama ve darbe gibi aşırı yükleme olaylarına karşı koruma sağlamak için daha verimli koruyucu yapılara duyulan ihtiyaçlar sonucu auxetic yapı incelenmiştir. Çeşitli geometrilere auxetic formlar tasarlanmıştır, tasarlanan bu yapılar aşırı yüklemelere maruz bırakılarak sonuçlar nümerik ve deneysel olarak incelenmiştir. Sonuç olarak auxetic yapıların geometrilere göre enerji absorbe edebilme özelliklerinin geleneksel bir yapıya göre fazla olduğu ve geometrileri değiştirilen auxetic yapılarında verimlerinin birbirine göre değiştiği gözlenmiştir (Linforth, 2020).

Çakan ve arkadaşları (2021) tarafından, auxetic malzemeler ile yapılan bir çalışmada, auxetic yapı türü olan re-entrant modelini düzlem içi ve düzlem dışı olarak tasarlayarak bu yapıların kuvvet altında yer değiştirmeleri ve mekanik davranışları deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Çalışma neticesinde auxetic yapıların enerji absorbe edebilme özelliğinin düzlem dışı geometride daha fazla olduğu görülmüştür (Çakan vd., 2021).

Faraci ve arkadaşları (2021) tarafından, giyilebilir koruyucu kıyafetlerin koruyucu özelliklerini arttırmaya yönelik yapılan bu çalışmada, re-entrant bal peteği ve altıgen bal peteği yapısı yükleme altında yüksek enerji emme özellikleri bakımından incelenmiştir. Nümerik olarak yapılan analiz sonucunda auxetic yapının enerji emme bakımından daha verimli olduğu gözlenmiştir. Bu tarz auxetic yapıların giyilebilir teknoloji için tasarım yolunun açılacağı ancak geometrilerindeki zorluk sebebiyle daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğunu kanıtlamaktadır (Faraci vd., 2021).

Wang ve arkadaşları (2022), enerji emilimi verimi için yeni bir sekizgen auxetic re-entrant bal peteği modeli tasarlayıp, bu modelin üst düzey enerji absorbe kapasitesine ulaşmasını hedefleyerek, bu yeni yapının stres altında mekanik performanslarını deneysel, nümerik ve analitik olarak incelemiştir. Re-entrant tasarımı, geometrideki tam sıkıştırmadan sonra düşük gözeneklilik ve yüksek

sertliğe sahip katı bir malzeme haline gelmiş komşu hücreler için daha fazla koruma ve destek sağladığı görülmüştür. Yapılan araştırma sonucunda nümerik, deneysel ve analitik sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğu ve bu yeni geometrinin gelecekteki optimal tasarım için iyi bir referans olabileceği görülmüştür (S. Wang vd., 2022a).



Şekil 2.2 Yeni oluşturulan sekizgen auxetic re-entrant yapı (S. Wang vd., 2022)

2.2 Auxetic Yapı Üzerinden Enerji Hasadıyla İlgili Yapılan Çalışmalar

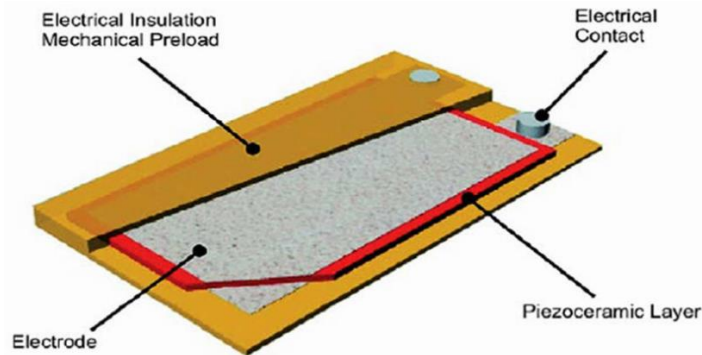
Auxetic malzemelerden enerji hasadı ile ilgili çalışmalar yakın geçmişte dayanmaktadır. Akademik çalışmaların bu konu üzerinde artmasının sebebi auxetic malzemelerin ilerleyen teknoloji ile beraber daha kullanışlı ve verimli hale getirmektir. Çalışmanın bu kısmında auxetic yapılar üzerinden enerji hasadıyla ilgili yapılmış olan akademik çalışmalardan bahsedilecektir.

Günümüz teknolojinin ilerlemesiyle birlikte artan nüfusla ilişkili olarak enerji ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Artan bu ihtiyacı karşılamak içinde alternatif enerji yöntemleri araştırılmaktadır. Bu enerji kazanç yöntemlerinden biri de enerji hasadı denilen yöntemdir. Enerji hasadı, ortamdaki az miktarda mevcut enerjinin kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştürülmesidir. Elektrik enerjisi doğrudan kullanım için ya da daha sonra kullanılmak üzere depolanır. Bu sayede şebeke gücü bulunmayan, rüzgar türbinleri veya güneş panelleri kurmak için elverişsiz olan yerlerde kullanılmak üzere alternative güç kaynağı sağlar. Enerji

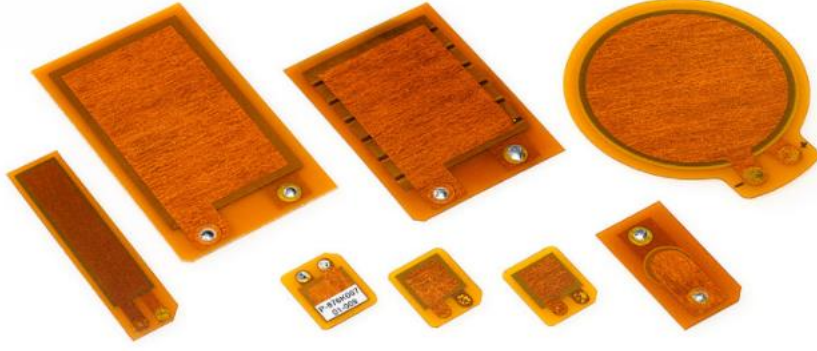
hasadı ayrıca büyük ölçüde bir bakım gerektirmez ve çevre dostudur (Energy Harvest, 2022).

Artan enerji ihtiyacı açığı kapatabilmek için türlü yenilikçi yöntemlere başvurulmaktadır. Bu yöntemlerden biriside akıllı malzemeler kullanılarak yeni tip enerji hasat jeneratörlerinin geliştirilmesidir. Doğada yapılar üzerinde farklı frekanslarda titreşimler oluşmaktadır. Piezoelektrik malzemelerin çalışma prensibini kullanarak bu titreşimlerden enerji elde etmek mümkündür. Piezoelektrik malzemeler üzerlerinde oluşan yer değiştirmeler ile voltaj üretmektedirler. Bu voltaj uygun bir çevirici devreden geçirilerek enerji elde edilebilir. Uygun piezoelektrik malzeme kullanımı, geometri seçimi ve piezoelektrik malzemenin yapı üzerinde uygulanacağı yerin optimum olarak belirlenmesi ile enerji elde edimi maksimize edilebilir (Av, 2012).

Ayrıntılı olarak incelenen ilk piezoelektrik malzeme (Jean ve Pierre Curie kardeşler tarafından) kristal kuvarz olmuştur. Endüstride, düşük frekanslı (10 MHz'in altında) elektromekanik transduserler, genellikle baryum titanat, kurşun zirkonat titanat gibi piezoelektrik seramikler kullanılarak üretilmektedir. 1 cm'lik bir uzunluktaki bir seramik numunede voltaj uzunluğu dönüşüm faktörü 1 nm/V'dir. Çoğunlukla kullanılan piezoelektrik malzeme tipi kurşun-zirkonyum-titanyum (PZT) dur. Piezoelektrik malzemeler; akustik, ultrason teknolojisi, yayıncılık, akustik elektronik, defektoskopi ve diğer bazı alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Beşergil, 2020).



Şekil 2.3 Piezoelektrik yama (Gmbh, 2020)



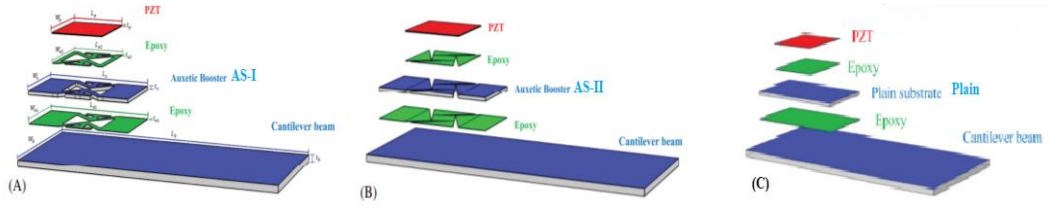
Şekil 2.4 Piezoelektrik yama çeşitleri (Gmbh, 2020)

Çalışmanın devamında çeşitli auxetic yapılar üzerinden piezoelektrik malzemeler yardımıyla gerçekleştirilen enerji hasadı çalışmalarına yer verilecektir.

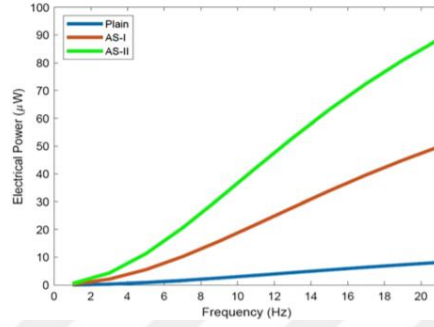
Li (2017), çalışmasında iki piezoelektrik yapının arasına sıkıştırılmış auxetic ve düz yapıyı karşılaştırmayı hedeflemiştir. Bu katmanlar gerilmeye maruz bırakılarak gerilme altındaki enine yer değiştirmeleri karşılaştırılmıştır. Auxetic yapıda piezoelektrik malzemeden elde edilen güç çıkışını arttırdığı görülmüştür (Li vd., 2017).

Ferguson vd. (2018) yapmış olduğu çalışmada, piezoelektrik olarak seramik PZT ve kompozit MFC malzemesini kullanarak, auxetic yapı ve düz kiriş yapısı arasındaki enerji hasadını karşılaştırmıştır. Bu çalışmada auxetic yapının yanı sıra kullanılan 2 farklı tür piezo malzeme de performans olarak birbirleriyle kıyaslanmıştır. En fazla enerji hasadının auxetic yapıya yama yapılan PZT'den sağlandığı görülmüştür (Ferguson vd., t.y.).

Eghbali ve arkadaşları (2020), auxetic malzemelerden titreşim verimliliğini arttırmak amacıyla yaptıkları çalışmada farklı geometrik tasarıma sahip iki auxetic yapı incelenmiştir. Üç tane konsol kiriş üzerine epoxy tabakası ile iki auxetic ve bir adet düz substratlar yapıştırılmış ve piezoelektrik (PZT) elemanlar en üst katmana monte edilmiştir. Auxetic yapılar modellenerek simüle edilmiştir. PZT katmanındaki stres dağılımı ile yorumlanmıştır. Kuvvet altında Auxetic kiriş yapılarının düz kiriş yapılarına göre enerji hasadının daha verimli olduğu görülmüştür (Eghbali, Younesian, & Farhangdoust, 2020).

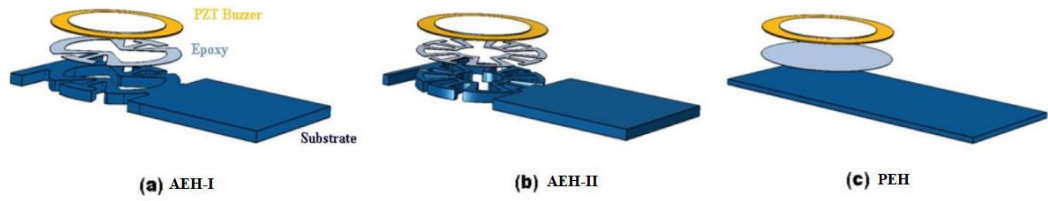


Şekil 2.5 Farklı geometride auxetic yapılar ve düz kiriş (Eghbali, Younesian, & Farhangdoust, 2020)

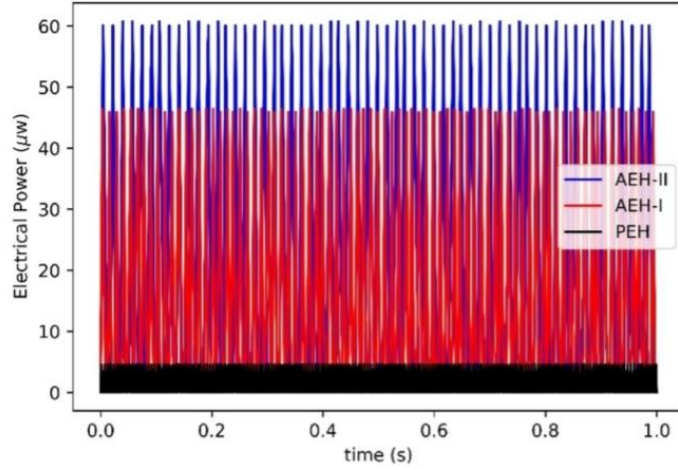


Şekil 2.6 Auxetic yapılar ve düz kirişin enerji hasadı verimlilikleri (Eghbali, Younesian, & Farhangdoust, 2020)

Eghbali ve arkadaşları (2020), iki adet dairesel auxetic yapı tasarlayarak düz yapı ile enerji hasadı karşılaştırması yapmışlardır. Çalışmalarını deneysel ve nümerik olarak doğrulamışlardır. Yapılan çalışma sonucunda auxetic yapılar ve düz yapı arasındaki enerji verimliliği kıyası yapılmıştır. Auxetic yapıların düz yapıya göre daha verimli olduğu gözlenmiştir.



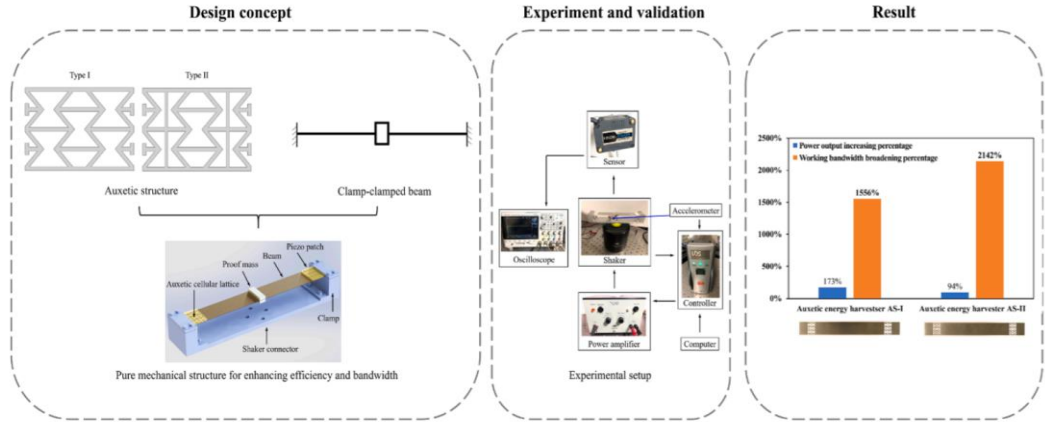
Şekil 2.7 Düz ve auxetic yapıda konsol kirişten enerji hasadı (Eghbali, Younesian, Moayedizadeh, vd., 2020)



Şekil 2.8 Düz ve auxetic yapılardan elde edilen güç (Eghbali, Younesian, Moayedizadeh, vd., 2020)

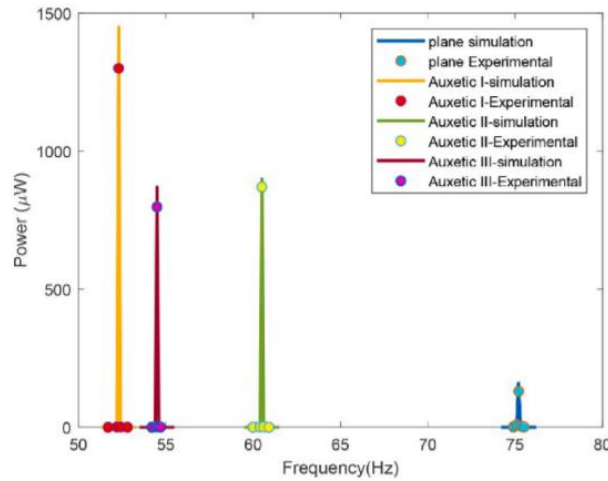
Zhang ve arkadaşları (2020), yapmış oldukları çalışmada, birbirinden farklı 4 auxetic yapı tasarlayarak standart bal peteği yapısı ile nümerik ve deneysel olarak karşılaştırmışlardır. Dinamik yüklemeler altında yapıların deformasyonları ve enerji absorbe edebilme özellikleri incelenmiştir. Auxetic yapıların hepsinde yer değiştirmelerin bal peteği yapısına göre daha fazla olduğu gözlenmiştir. Piezoelektrik malzeme kullanılarak enerji hasadı elde edilerek yapılar karşılaştırılmıştır. Auxetic yapıların enerji hasadının bal peteği yapısına göre daha fazla olduğu gözlenmiştir (Zhang vd., 2020).

Keyu Chen ve arkadaşları (2021), iki farklı geometride auxetic kiriş tasarlayarak kelepçeli kirişin her iki tarafına auxetic yapıları yapıştırarak kirişin orta noktasından yükleme yapmıştır. Yapılan yükleme sonucunda meydana gelen yer değiştirmeler nümerik ve deneysel olarak hesaplanmış ve auxetic yapılara piezoelektrik (PZT) yamalar yapıştırarak elde edilen enerji hasatları karşılaştırılmıştır. Auxetic yapılardan elde edilen enerji hasadının düz kirişe göre daha fazla olduğu görülmüştür (K. Chen vd., 2021).



Şekil 2.9 Auxetic enerji hasadı çalışma şeması (K. Chen vd., 2021)

Ebrahimian ve arkadaşları (2021), yapmış oldukları çalışmada, farklı tip auxetic yapılar ile geleneksel düz bir yapıyı karşılaştırmak istemişlerdir. Farklı tasarımların elektrik gücünü önemli derece arttırabilecek olduğu görülmek istenmiştir. Numuneler üretilerek nümerik çalışma ile beraber deneysel çalışmada yapılmıştır. Numunelerin yükleme altında yer değiştirmeleri hesaplanmış ve titreşim analizi ile doğal frekansları hesaplanmıştır. Tüm numunelerden düşük frekanslarda elde edilen enerji hasadı karşılaştırılmıştır (Ebrahimian vd., 2021).



Şekil 2.10 Nümerik ve deneysel enerji hasadı grafiği (Ebrahimian vd., 2021)

Wang ve arkadaşları (2021) yapmış olduğu çalışmada, düz, delikli ve auxetic kiriş yapılarını birbiriyle karşılaştırılmıştır. Bu yapılar için nümerik ve deneysel

Çalışma yapılmıştır. Yapıların belirli ivmede genlikleri ölçülmüştür ve doğal frekansları hesaplanmıştır. Piezoelektrik ile yapılan enerji hasadı sonucuna göre en fazla enerji hasadının auxetic yapıdan elde edildiği daha sonrasında sırasıyla delikli yapıdan ve düz yapıdan elde edildiği gözlenmiştir (L. Wang vd., 2021).

Bu alışmada Grzyberg ve arkadaşları (2020), auxetic ve düz kirişe bimorf olarak piezoelektrik patchler yapıştırılmış ve titreşim yoluyla elde edilen enerji hasadını incelemişlerdir. Bu inceleme sonucunda auxetic yapıda olan kirişten daha fazla enerji hasadı sağlandığı gözlenmiştir (Grzybek vd., 2020).

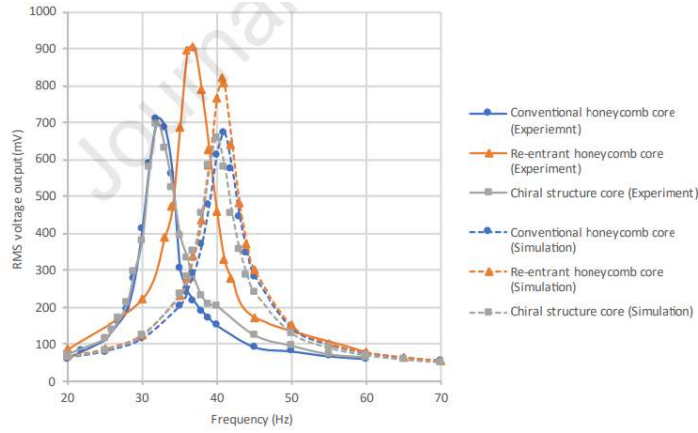
Abdelkefi ve arkadaşları (2015) bir noktadan yükleme yapılarak yük altında kirişlerden elde edilen titreşim esaslı hasat miktarını karşılaştırmışlardır. Bu amaçla üç adet aynı tip ve formda kiriş kullanılmıştır. Bu kirişlerin farklı noktalarından sabitleme ve yükleme yapmışlardır. Sarsıcı ile titreşim testi uygulayarak kirişlerin belirli noktalarına yapıştırılan piezoelektrik malzemeden aldıkları cevapları karşılaştırmışlardır. Elephant isimli kurulan modelde yükleme yapısı sayesinde enerji veriminin diğer modellere göre daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Wang ve arkadaşları (2020) hava akışı esaslı titreşim ile enerji hasadı türleri hakkında bilgi vererek, enerji hasadı performansını arttırmak ve çalışma aralığını genişletmek amacıyla analitik ve deneysel çalışmalar ile çeşitli örneklemelere yer ver vermişlerdir (J. Wang vd., 2020).

Ertürk ve arkadaşları (2017) yaptıkları çalışmada piezoelektrik malzemelerin mekanik girdi enerjisini elektriğe dönüştürmesinin verimliliğini incelemek için çeşitli teorilerde analitik ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Yapılan çalışmaların sonucunda elektromekanik bağlantı etkisi, sönümleme etkisi, uyarma frekansı ve elektrik yükü gibi etkilerin verimliliği temelde etkilediği görülmüştür. Hafif sönümleme ve güçlü bağlantıların verimliliği arttırdığı gözlenmiştir. Ayrıca rezonans durumundaki verimliliğin gerçeği yansıttığını ve sistemin çalışma performansının daha iyi hesaplandığı gözlenmiştir (Yang vd., 2017).

Chen ve arkadaşları (2022) bu çalışmada tasarlanmış olan bal peteği yapısını re-entrant ve chiral auxetic yapılar ile titreşim esaslı enerji hasadı verimlerine göre kıyaslamak istemişlerdir. Numunelere üç noktalı bükme testi analiz ve deneysel olarak yapılmıştır yük altındaki yer değiştirmeleri ve dayanımları gözlenerek

piezoelektrik voltaj çıkışları kıyaslanmıştır. Re-entrant yapının diğer iki yapı içinde daha verimli olduğu görülmüştür (B. Chen vd., 2022).



Şekil 2.11 Deneysel ve nümerik olarak enerji verimi kıyaslaması (B. Chen vd., 2022)

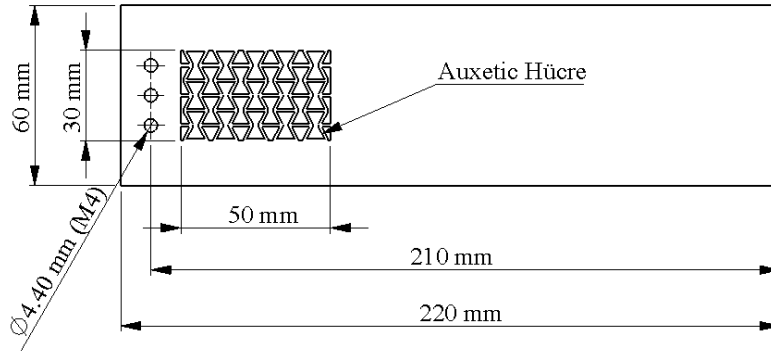
Abdelkefi (2011) eğilme-burulma titreşimi etkisindeki konsol kirişler ile enerji hasadı verimliliği üzerine bir çalışma yürütmüştür. Analitik teoriler, analiz ve deneysel olarak çalışmalar yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda kütle dağılım oranları hesaplarına göre %30 daha fazla verim alınan kiriş modeli bulunmuştur (Abdelkefi vd., 2011).

Bolat (2022) kirişler üzerindeki yer değiştirme ve gerilmenin enerji hasat performansına etkileri üzerine yaptığı bu çalışmada öncelikle kirişlerde yapısal değişiklikler yaparak auxetic etki gösteren alışmamış kirişler tasarlamıştır. Tasarlanan yeni kiriş modelleri ile titreşim esaslı elektromanyetik ve piezoelektrik enerji hasadı incelenmiştir. Elektromanyetik enerji hasadı analizinde, manyetik alanın büyüklüğünün ve bobin ile kalıcı mıknatıs arasındaki mesafenin hasat performansı serbest titreşim deneyleri ile incelenmiştir. Bu bağlamda, kalıcı bir neodimyum mıknatıs, titreşen alüminyum kiriş uç noktasına takılır. Serbest titreşim süresi boyunca, bobin ve mıknatıs yakından etkileşime girer. Sonuç olarak, bobin tarafında bir elektrik alanı indüklenerek bir voltaj çıkışı elde edilir. Sonrasında piezoelektrik enerji hasat yapılarının voltaj çıkışları deneysel olarak değerlendirilmiştir. Doğrulanmış sayısal simülasyonları kullanarak, klasik olmayan kirişler olarak adlandırılan yeni tip kiriş yapıları, daha yüksek voltaj çıkışları elde etmek için tasarlanmıştır. Klasik kiriş yapısında göre tasarlanmış alışmamış kirişlerin enerji hasadı verimliliğinin daha fazla olduğu gözlenmiştir (Bolat, 2022).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Tasarım

Bu tez çalışmasında, piezoelektrik malzeme ile enerji hasadı elde edebilmek için öncelikle kiriş tasarımı yapılmıştır. CAD yazılımı olarak SolidWorks programı kullanılmıştır. Tasarlanan kirişlerin boyutsal ölçüleri Şekil 2.1Şekil 3.1 de gösterilmiştir.

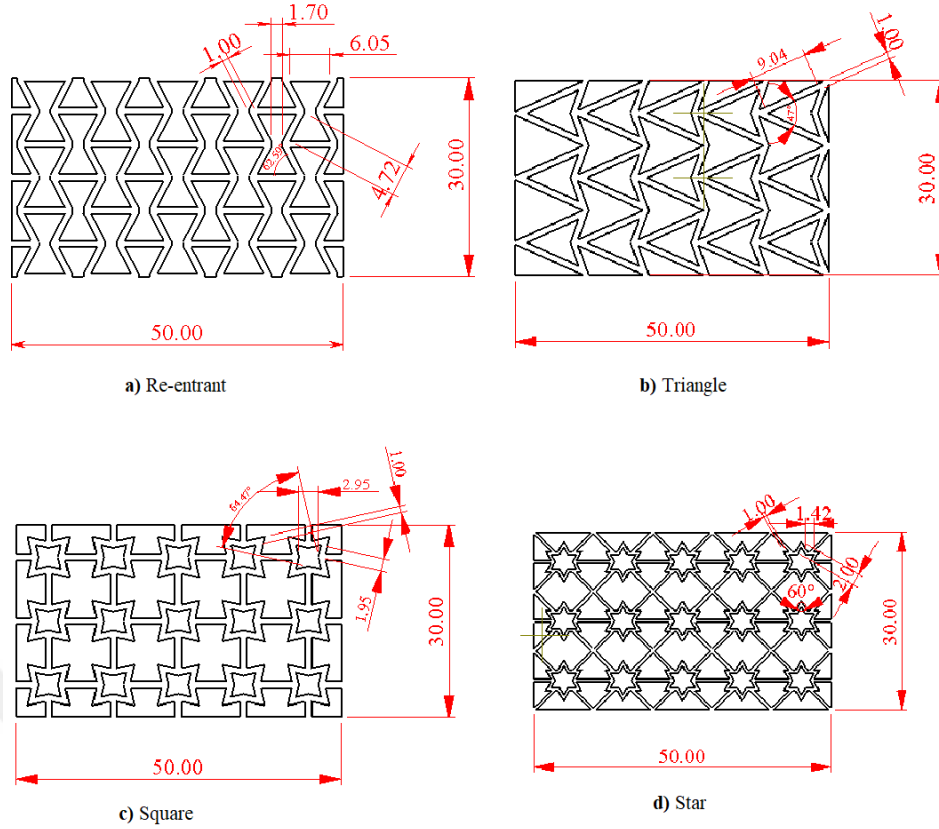


Şekil 3.1 Düz ankastre kiriş tasarımı

Tasarlanan hücrelerin hepsi aynı kiriş boyutu içerisinde bulunmaktadır. Kirişlerin genişliği 60 mm, uzunluğu ise 220 mm dir. Parçalar tasarlanırken, analiz ve deneylerde sabitleme noktalarında ankastre yapının sağlanabilmesi için 3 adet M4 delik açılmıştır.

Bu kirişin katılığını azaltıp, yer değiştirme ve gerilimlerini arttırabilmek için tasarlanan auxetic hücre modelleri Şekil 3.2 te gösterilmiştir. Tasarlanan dört auxetic ve bir adet düz kiriş, 1 mm ve 2 mm olarak toplamda 10 adet kiriş tasarımı ve üretimi yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında, re-entrant, triangle, square ve star adı verilen dört hücre şekli tasarlanarak auxetic davranış oluşturma amaçlanmıştır. Oluşturulan bu hücre geometrilerinde malzemenin mekanik olarak poisson oranı değişmez, sistemin eş değer poisson oranı ise negatiftir.



Şekil 3.2 Auxetic hücre yapıları

3.2 Kullanılan Malzeme ve Özellikleri

Auxetic kirişlerin tasarımı ve üretimi için kullanılan malzeme türü Alüminyum 6061'dir. Alüminyum 6061 serisi tercih edilmesinin sebebi elastisite modülünün kirişlerdeki yer değiştirmelerin rahatlıkla görülebilmesi için uygun olmasıdır ayrıca bu alaşım türünün yüksek akma mukavemeti göstermesi ve yüksek korozyon direncine sahip olmasıdır.

Tablo 3.1 Alüminyum 6061 alaşımının mekanik özellikleri

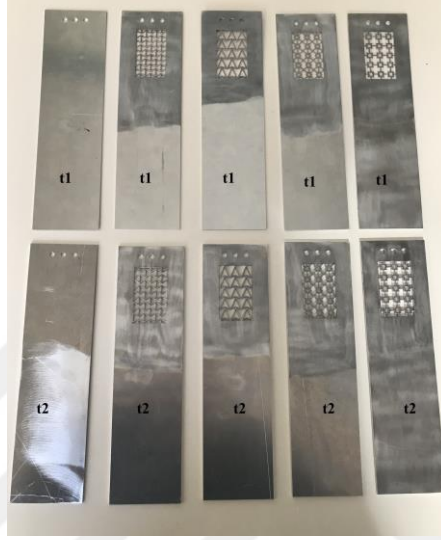
Temper	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%50)	Elastisite (GPa)
T6	276	310	20	71

Tablo 3.2 Alüminyum 6061 alaşımının kimyasal özellikleri

Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Diğer	Al
0,5	0,60-1,0	0,6-1,1	0,2-0,8	0,8-1,2	0,25	0,1	0,1	0,15	Kalan

3.3 Üretim

Tasarlanan parçaların lazer kesim yoluyla üretimi yapılmıştır. Parçalar BYSTRONIC CNC lazer kesim tezgahı ile işlenmiştir. Numunelerin köşe bölgelerindeki hassas kesimler için 0.3 mm/s hızında işleme yapılmıştır. Üretimi tamamlanan numunelerin çapakları temizlenerek zımpara işlemi yapılmıştır.



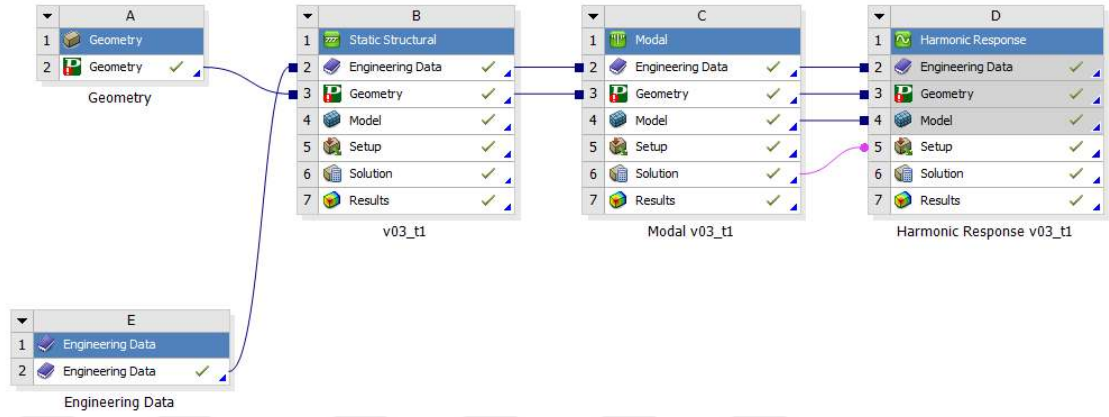
Şekil 3.3 Kirişlerin üretimi



Şekil 3.4 Zımpara işlemi yapılan numune

3.4 Nümerik Analiz

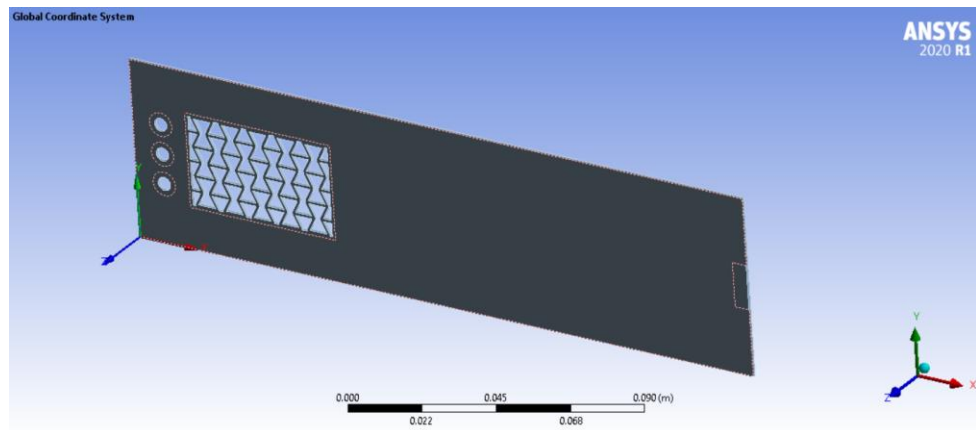
Bu tez çalışmasında sonlu elemanlar yazılımı olarak ANSYS 2020 R1 kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizinde yapısal analiz, modal analiz ve harmonik analiz olmak üzere üç farklı analiz yöntemi uygulanmıştır.



Şekil 3.5 Analiz şeması

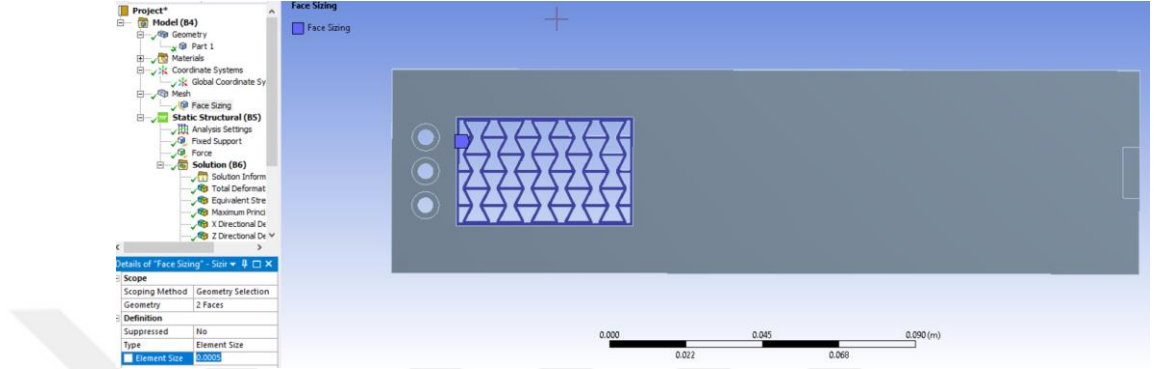
3.4.1 Analiz Modeli Oluşturma

Kirişlere yapılan analizlerde koordinat sistemi tüm kirişler için aynı noktadan olacak şekilde konumlandırılmıştır. Malzeme ataması Alüminyum alaşımı olarak yapılmıştır.

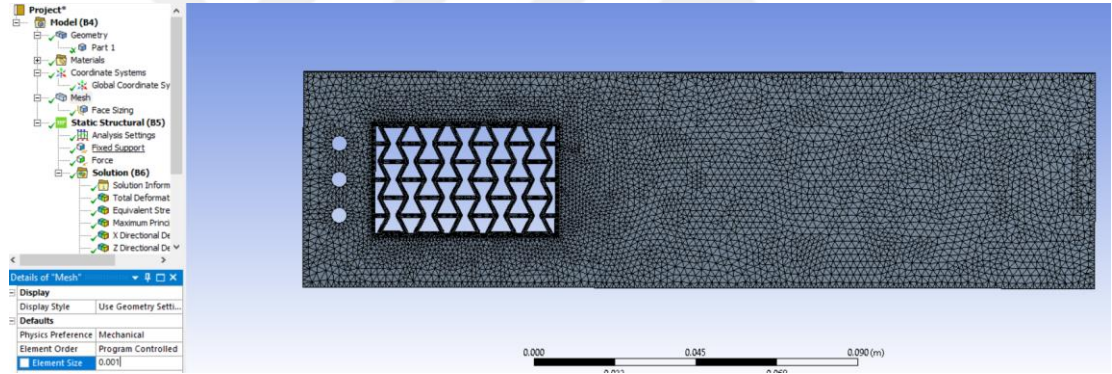


Şekil 3.6 Koordinat sistemi

Kirişe iki farklı ağ yapısı uygulanmıştır. Öncelikle kirişin tamamına 1 mm ağ yapısı oluşturulmuştur. Auxetic yapının olduğu alandaki ağ yapısı ise yüzeyler 0.5 mm olarak uygulanmıştır. Bunun sebebi auxetic alanın her iki yüzeyinde meydana gelecek gerilim ve yer değiştirmelerin piezoelektrik elemanda yaratacağı etkinin daha kaliteli ağ yapısı oluşturularak artırılmasıdır.

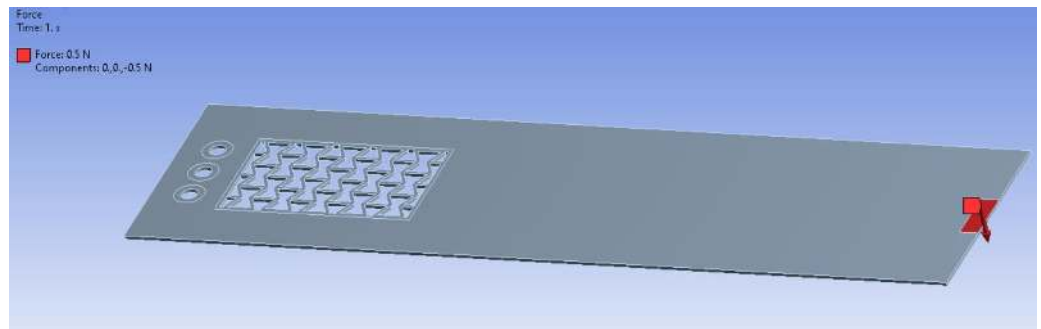


Şekil 3.7 Auxetic yüzeylere ağ yapısı ataması



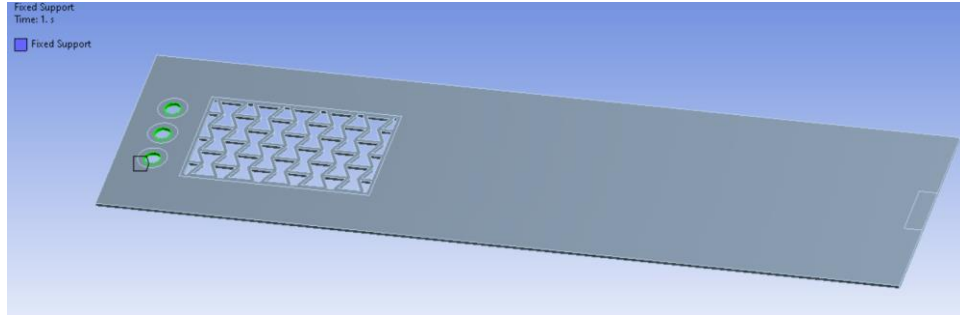
Şekil 3.8 Kirişin tamamındaki ağ yapısı ataması

Kuvvet uygulama noktası kirişin uç kısmında belirlenmiş olup 0.5 N büyüklüğünde -z yönünde kuvvet uygulanmıştır.



Şekil 3.9 Kirişlere uygulanan kuvvet noktası

Sabitlenme noktaları tasarım aşamasında ankastre etki yaratabilmesi için açılan 3 adet M4 deliklerinden yapılmıştır.



Şekil 3.10 Fixed support noktaları

3.4.2 Statik Analiz

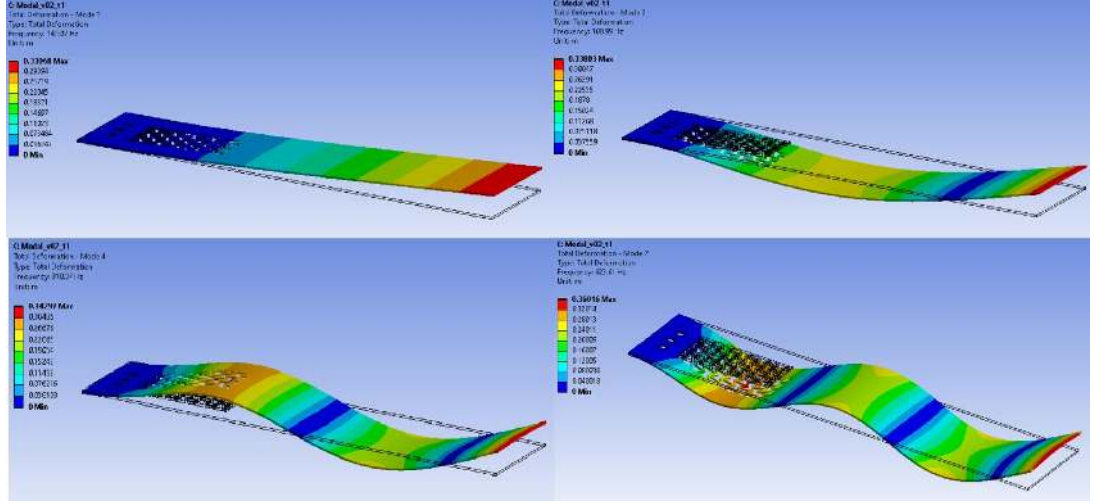
Kirişlerin sabit yük altında meydana gelen yer değiştirmelerini elde etmek için eğilme analizi yapılmıştır. Statik analiz sonucu toplam deformasyon, eş değer gerilme, x, y ve z yönündeki deformasyonlar ve auxetic yapının orta noktasında meydana gelen deformasyon miktarları görülmüştür.

3.4.3 Modal Analiz

Sistemin doğal frekanslarını bulmak amacıyla tasarlanan numunelerin modal analizi yapılmıştır. Nümerik olarak hesaplanan doğal frekanslarda z yönündeki efektif masslere göre belirlenmiştir. Şekil 3.11 de Z yönündeki kütle katılım oranları verilmiştir. Modlara göre verilen kütle katılım oranlarına göre Mod 1, Mod 2, Mod 4 ve Mod 7'nin kütle katılım oranlarının fazla olduğu görülmüştür.

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION ***** Z DIRECTION							
MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	14.5074	0.68930E-01	0.46350E-02	1.000000	0.214833E-04	0.718272	0.637116
2	108.989	0.91752E-02	-0.23572E-02	0.508559	0.555629E-05	0.904040	0.164779
3	112.164	0.89155E-02	-0.15829E-05	0.000342	0.250573E-11	0.904040	0.743106E-07
4	310.366	0.32220E-02	0.12565E-02	0.271091	0.157882E-05	0.956826	0.468219E-01
5	376.355	0.26571E-02	0.19587E-06	0.000042	0.383656E-13	0.956826	0.113778E-08
6	569.395	0.17562E-02	0.86375E-07	0.000019	0.746072E-14	0.956826	0.221257E-09
7	623.606	0.16036E-02	-0.84053E-03	0.181343	0.706489E-06	0.980447	0.209518E-01
8	688.426	0.14526E-02	-0.28219E-06	0.000061	0.796309E-13	0.980447	0.236156E-08
9	1031.55	0.96942E-03	0.76474E-03	0.164993	0.584831E-06	1.000000	0.173439E-01
10	1037.31	0.96403E-03	0.34292E-06	0.000074	0.117594E-12	1.000000	0.348739E-08
SUM					0.299098E-04		0.887013

Şekil 3.11 Z yönünde effective mass miktarı

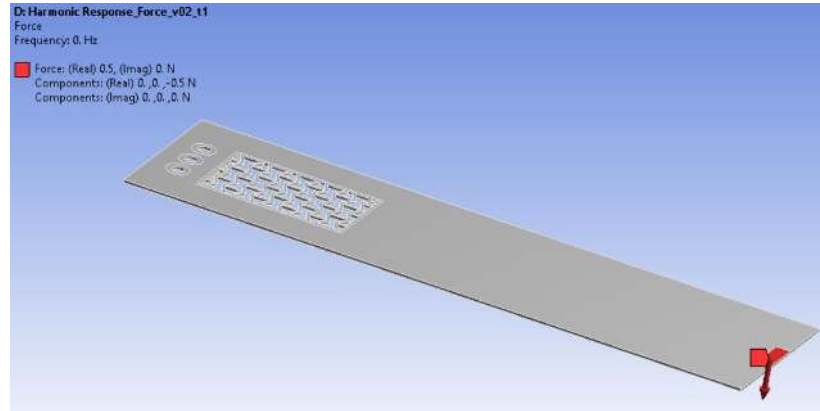


Şekil 3.12 Mod şekilleri

3.4.4 Harmonik Analiz

Piezoelektrik malzemenin güç üretimi esas olarak sistemin doğal frekansına ve çalışma frekansına bağlıdır. Bu iki frekans eşit olduğunda, rezonans meydana gelir. Rezonans durumu ortaya çıktığında maksimum güç üretilebilir. Piezoelektrik malzemeden elde edilen içindeki özellik ve değer artışı yer değişimlerine bağlıdır.

Doğrusal bir yapının sinüzoidal olarak değişen yüke karşı kararlı durum tepkisini belirlemek için harmonik analiz yapılmıştır. Kirişlere -z yönünde 0.5 N yük 0-700 Hz arasında 2 Hz aralıklar ile uygulanmıştır.



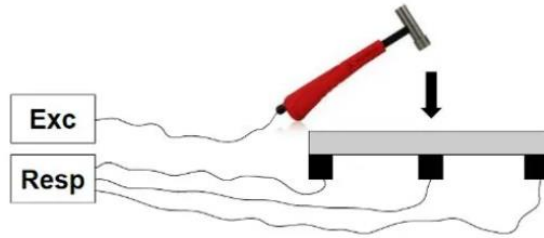
Şekil 3.13 Harmonik analiz kuvvet noktası

3.5 Deneysel Çalışma

Titreşim testi, frekans, ivme, yer değiştirme ve zaman gibi parametreleri kontrol ederek bir test numunesine daha önceden tanımlanmış miktarda titreşim uygulama işlemidir. Çevresel simülasyon olarak da bilinen titreşim testi, kontrollü ve tutarlı testlerle ürünlerin güvenilirliğini mühendislik doğrulamasını sağlar. Test numunesinin önemli konumlardaki titreşim seviyeleri, bir titreşim kontrol sistemi kullanılarak kontrol edilir ve izlenir. Titreşim testi iki yolla gerçekleştirilir.

3.5.1 Çekiç Tahrikli Titreşim Testi

Çekiç tahrikli titreşim testi, rezonans tespiti veya titreşim analiz uygulamalarında test edilen yapıya kuvvet iletilmesi çekiç yardımıyla gerçekleşir. Çekiç ve numune üzerinde bulunan ivme ölçerler yardımıyla kuvvet anında numuneden gelen cevaplar ölçülür. Pratik bir inceleme yapmak için çekiç ile darbe testi hızlı bir sonuç verebilmektedir. Elde edilen sonuçlar bazen yapının yeterli tahrik edilememesi nedeniyle yüksek hassasiyete ulaşmasa bile genel olarak bilgi sağlaması açısından tatmin edici olabilmektedir.



Şekil 3.14 Çekiç tahrikli titreşim test düzeneği

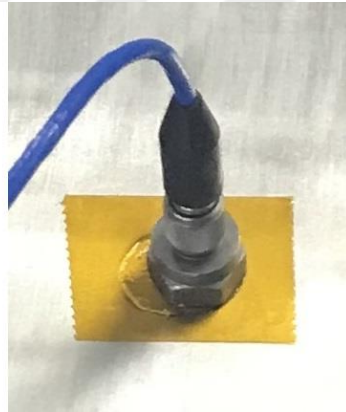
3.5.2 Sarsıcı Tahrikli Titreşim Testi

Sarsıcı tahrikli titreşim testi uygulaması çekiç yöntemine göre çok daha zahmetli olmakla birlikte bu test yönteminde oldukça hassas ölçümler almak mümkün olabilmektedir. Bu testler genellikle, Şekil 3.15 de gösterildiği gibi, sarsıcı (shaker) olarak da bilinen elektrodinamik bir tahrik sistemi üzerinde gerçekleştirilir. Test numunesinin önemli konumlardaki titreşim seviyeleri, bir titreşim kontrol sistemi kullanılarak kontrol edilir ve izlenir.



Şekil 3.15 Sarsıcı (Shaker)

İvme ölçer, ölçülen nesnenin dikey düzlemde sapma açısının belirlenmesini sağlayan statik yerçekimi ivmesini ölçmede, ayrıca şok, hareket, darbe ve titreşim gibi düşük genlikli ve frekanslı salınımların neden olduğu dinamik ivmeyi ölçmede kullanılır. İvme ölçer doğrudan titreşen nesnenin üzerine yapıştırılır, böylece ivme ölçerin titreşim enerjisini, nesnenin anlık ivmesi ile orantılı bir elektrik sinyaline dönüştürmesi sağlanır.



Şekil 3.16 İvme ölçer

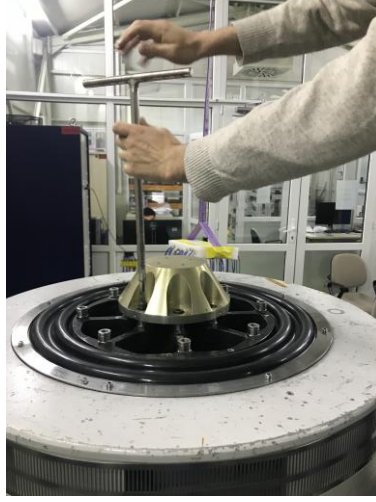
Yapılan bu çalışmada, hassas sonuçlar elde edilmek istendiği için sarsıcı tahrikli titreşim testi uygulanmıştır. Testler ETS Solutions MPA710/M544A Modeli titreşim test cihazıyla yapılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan titreşim cihazının özellikleri Tablo 3.3 de verilmiştir. 0.2 g ivme ile 0-1000 Hz arasında sinüs tarama yapılmıştır. Çıkış olarak ivme ölçülmüştür.

Tablo 3.3 Sarsıcı (shaker) özellikleri

Özellik	Değer
Sinüs kuvveti	50 kN
Rasgele kuvvet	50 kN
Şok kuvveti	100 kN
Kullanılabilir frekans aralığı	DC~2700 Hz
Azami yer değiştirme (p-p)	51 mm
Azami hız	2 m/sn
Azami ivme (sinüs)	980 m/sn ²
Güç yükselteci gücü	60 kVA
Sistemin kurulu olduğu yerdeki temiz oda standardı	Class 100.000
Armatür / Kayar tabla ölçüleri	Ø445 / 600×600 mm
Güç yükselteci gücü	60 kVA
Sistemin kurulu olduğu yerdeki temiz oda standardı	Class 100.000
Armatür / Kayar tabla ölçüleri	Ø445 / 600×600 mm
Donanım	LMS SACADAS III
Yazılım	LMS Test.Lab Rev 11B

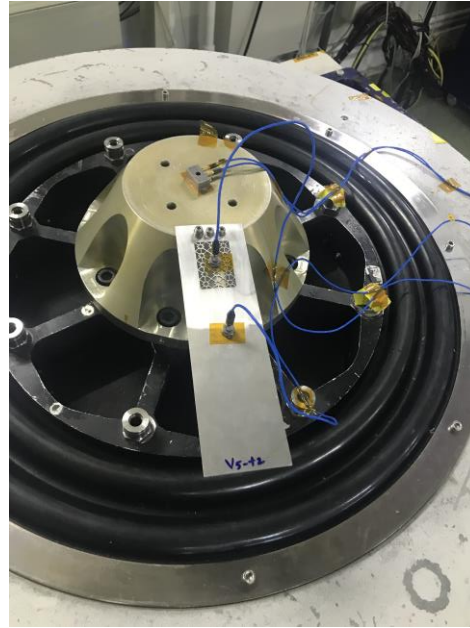
3.5.3 Numunelerin Hazırlanması

Numunelerin test cihazına bağlanabilmesi için bir fikstür kullanılmıştır. Kullanılan fikstür, sarsıcı üzerine bağlanarak torklanmıştır.



Şekil 3.17 Fikstürün sarsıcı üzerine bağlanması

Fikstür, sarsıcıya bağlandıktan sonra numuneler sırasıyla 3 adet M4 deliklerinden fikstüre 3.5 Nm ile torklanmıştır ve numunelerin üzerine ivme ölçerler yerleştirilmiştir. Kirişlerin orta noktası ve auxetic desenin orta noktasına yerleştirmek üzere 2 adet tek eksenli ivme ölçer kullanılmıştır. İvme ölçerler Loctite yapıştırıcı ile numuneler üzerine sabitlenmiştir. 1 adet 3 eksenli ivme ölçer ise kontrol ivme ölçeri olarak fikstür üzerine sabitlenmiştir.



Şekil 3.18 Numune ve ivme ölçer yerleşimi

4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Bu bölümde tasarlanan auxetic kirişlerin; düz kirişe göre, doğal frekansları, enerji hasadı üretimi piezoelektrik malzeme yapıştırılacak bölgedeki yer değiştirmelerin sabit yük ve değişik frekanslardaki cevapları incelenmiştir. Sonlu elemanlar analizi ile bulunan doğal frekans cevapları deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

4.1 Düz Kiriş Analitik ve Nümerik Sehim Oranı

Düz ankastre kirişlerdeki sehim hesabı analitik olarak $\Delta = \frac{PL^3}{3EI}$ formülü ile hesaplanır. Bu hesaplama düz kirişin özelliklerine göre;

$P = 0,5 \text{ N}$,

$L = 210 \text{ mm}$,

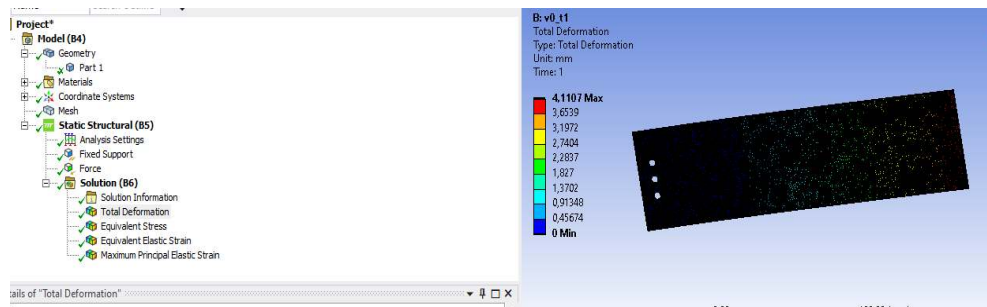
$E = 71 \text{ GPa}$ (Al için),

$b = 60 \text{ mm}$,

$h = 1 \text{ mm}$,

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{60 \cdot 1^3}{12} = 5 \text{ mm}^4, \quad \Delta = \frac{PL^3}{3EI} = \frac{0,5 \text{ N} \cdot (210 \text{ mm})^3}{3 \cdot 71 \text{ GPa} \cdot 5 \text{ mm}^4} = 4,34 \text{ mm} \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

Nümerik olarak yapılan sehim hesaplamasına göre ise; statik analiz sonucu yer değiştirme miktarı Şekil 4.1 Düz kirişin sehim miktarı Şekil 4.1 de gösterildiği gibi 4,11 mm bulunmuştur. %5 analitik ve nümerik analiz hesaplama sonucu farkı gözlenmiştir. Bu doğrulama ile diğer modellerde nümerik analize devam edilmiştir.



Şekil 4.1 Düz kirişin sehim miktarı

4.2 Statik Yük Altındaki Yer Değiştirmeler

Statik yük altındaki kirişlerin uç noktasında meydana gelen sehimler sonlu elemanlar ile elde edilmiş ve Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1 Kirişlerin deformasyonu

	Düz	Re-entrant	Triangle	Square	Star
t=1	4,16 mm	6,48 mm	6,13 mm	6,25 mm	6,47 mm
t=2	0,51 mm	0,83 mm	0,79 mm	0,8 mm	0,83 mm

Auxetic yapılar ile tasarlanan alışılmamış kirişlerde sehim miktarı kalınlık 1 mm olduğunda %57,6, %49,1, %52 ve %57,4 olarak sırasıyla re-entrant, triangle, square ve star yapılar için artmıştır. Kiriş kalınlığını 2 mm olduğunda sehim miktarı %62, %54, %56 ve %62 oranında sırasıyla artmıştır. Auxetic yapılarda kalın kirişler sehim oranı düz kirişe göre daha fazla oranda arttırmaktadır. En fazla sehim oranı re-entrant ve star yapısında meydana gelmektedir.

Statik yük altında kirişe yapıştırılacak PZT bölgesinde yani auxetic yapılarda meydana gelen ortalama yer değiştirmeler nümerik olarak elde edilmiş ve Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2 Auxetic yapının yer değiştirmesi

	Düz	Re-entrant	Triangle	Square	Star
t=1	0,18 mm	0,33 mm	0,33 mm	0,32 mm	0,33 mm
t=2	0,023 mm	0,043 mm	0,042 mm	0,042 mm	0,043 mm

Auxetic boşaltma yapılar tasarlanan kirişlerde enerji hasadı elde etmek için kullanılacak piezoelektrik patch yapıştırılacak bölgedeki ortalama şekil değiştirme t=1 için, %83, %83, %77 ve %83 olarak sırasıyla re-entrant, triangle, square ve star yapılar için artmıştır. Düz kirişe kıyasla t=2 için %86, %82, %82 ve %86 oranında sırasıyla artmıştır. Auxetic yapılar kalın kirişler sehim oranında olduğu gibi PZT yapıştırılacak bölgesindeki yer değiştirmeler daha fazla oranda arttırmaktadır.

Auxetic olarak tasarlanan kirişlerde enerji hasadı için kullanılan bölgelerdeki yer değiştirme artış oranı düz kiriş sehim artış oranından fazla olmuştur. Bu alışılmamış kirişlerdeki yer değiştirme miktarlarındaki artma, enerji hasadında artmasına neden olur.

4.3 Doğal Frekanslar

Auxetic boşaltmaların kirişin katılığını ne kadar düşürdüğü görmek ve kirişlerin doğal frekanslarını bulmak amacıyla tüm kirişler için aynı sınır koşullarında modal analiz yapılmıştır. Yapılan analiz sonuçları aşağıda Tablo 4.3 ve Tablo 4.4 de verilmiştir.

Tablo 4.3 Kirişlerin modal analiz sonuçları (t=1)

	Düz	Re-entrant	Triangle	Square	Star
Mod 1 (Hz)	18,86	14,51	14,95	14,79	14,56
Mod 2 (Hz)	117,96	108,99	110,37	110,04	109,59
Mod 3 (Hz)	330,62	310,37	315,95	314,88	314,81
Mod 4 (Hz)	648,28	623,61	632,34	631,85	634,31

Kalınlığı 1 mm auxetic kirişlerin birinci doğal frekansları düz kirişe göre sırasıyla %23, %20, %21,5 ve %22,7 olarak re-entrant, triangle, square ve star kirişler için sırasıyla azalmıştır. İkinci doğal frekansları düz kirişe göre sırasıyla %7,6, %6,4, %6,7 ve %7 olarak daha azdır. Üçüncü doğal frekansları düz kirişe göre sırasıyla %6,1, %4,4, %4,7 ve %4,7 daha azdır. Dördüncü doğal frekansları düz kiriş yapısına kıyasla %3,8, %2,4, %2,5 ve %2,1 sırasıyla daha azdır.

Tablo 4.4 Kirişlerin modal analiz sonuçları(t=2)

	Düz	Re-entrant	Triangle	Square	Star
Mod 1 (Hz)	37,59	28,62	29,48	29,16	28,65
Mod 2 (Hz)	235	216,09	219,02	218,22	217,11
Mod 3 (Hz)	658,3	614,43	626,18	623,25	622,48

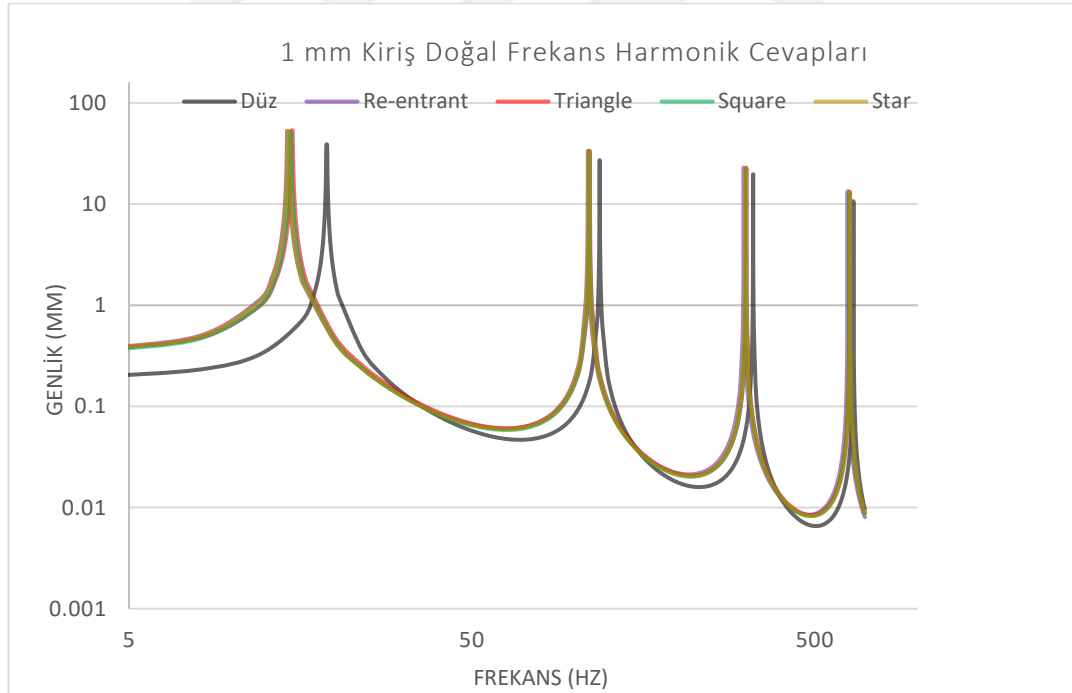
Auxetic kirişlerin 2 mm kalınlığındaki modal analiz sonuçlarına göre ise, birinci doğal frekansları düz kirişe göre sırasıyla re-entrant, triangle, square ve star kirişler için %23,8, %21,5, %22,4 ve %23,7 olarak düşmüştür. İkinci doğal

frekansları ise düz kirişe göre sırasıyla %8, %6,8, %7,1 ve %7,6 olarak daha azdır. Üçüncü doğal frekanslarında ise düz kirişe göre %6,6, %4,8, %5,3 ve %5,4 azalma meydana gelmiştir.

Kiriş kalınlığındaki değişimler ile elde edilen alıılmamış kirişlerdeki doğal frekans değişimleri çok fazla değişmemiştir. Tasarlanan kirişler için katılık değişimleri birbirilerine yakın çıkmıştır. Auxetic boşaltma kirişlerde elde edilen analiz sonuçlarına göre katılığı düşürmüştür. Katılığın düşmesi yüksek miktarda yer değiştirmeye ve buna bağlı olarak bu kirişlerde enerji hasadının artmasına neden olacaktır.

4.4 Harmonik Cevaplar

Tasarlanan kirişlere 0.5 N yükün değişik frekanslarda uygulanması sonrasında ortalama yer değiştirme cevaplarını incelemek için aynı sınır koşullarında harmonik analiz yapılmıştır. Yapılan analiz sonuçları 1 mm kirişler için Tablo 4.5 ve Şekil 4.2'de verilmiştir.



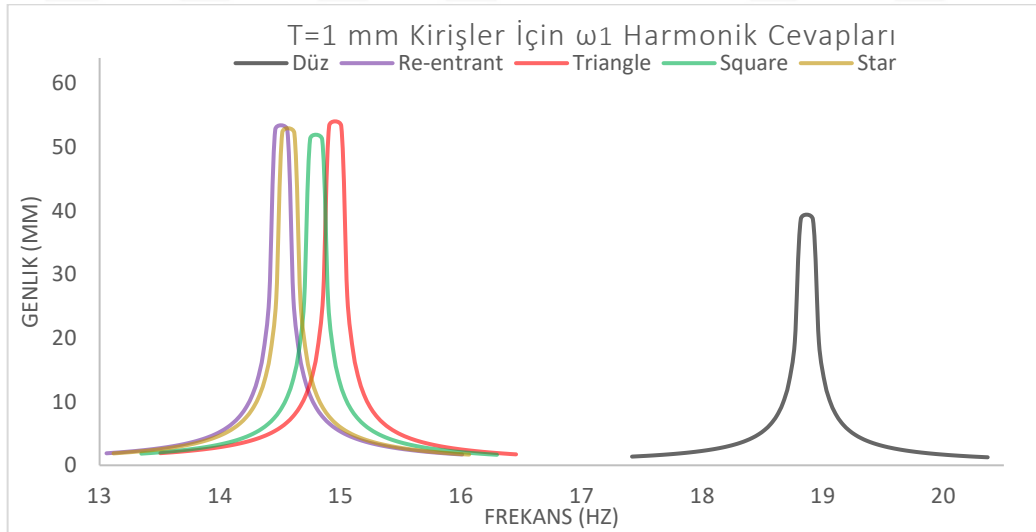
Şekil 4.2 Kirişlerin nümerik harmonik cevapları (t=1)

Tablo 4.5 Kirişlerin nümerik harmonik analiz sonuçları (t=1)

Düz		Re-entrant		Triangle		Square		Star	
Hz	Yer Değ.	Hz	Yer Değ.	Hz	Yer Değ.	Hz	Yer Değ.	Hz	Yer Değ.
18,86	38,71	14,51	52,76	14,95	53,35	14,79	51,28	14,56	52,30
117,96	27,19	108,99	33,63	110,37	33,69	110,04	32,72	109,59	32,99
330,62	19,73	310,37	22,75	315,95	22,94	314,88	22,23	314,81	22,45
648,28	10,67	623,61	13,25	632,34	13,32	631,85	12,99	634,31	13

Auxetic kirişlerde enerji hasadının yapılacağı bölgedeki ortalama yer değiştirme miktarları doğal frekans bölgelerinde harmonik kuvvet uygulandığında 1 mm kalınlığındaki kirişler için artmıştır. Bu artış doğal frekans artışı ile azalmaktadır. Auxetic boşaltma ile tasarlanan alışılmamış kirişlerde yer değiştirme daha fazladır.

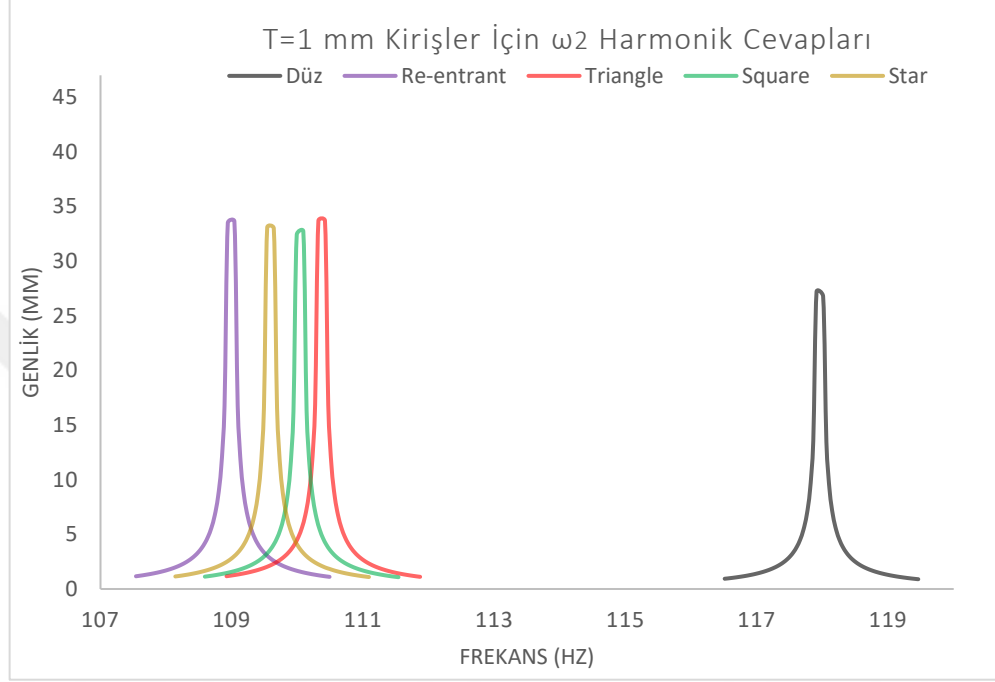
Alışılmamış kirişlerin birinci doğal frekans bölgesindeki yer değiştirme düz kirişe göre sırasıyla %36,2, %37,8, %32,4 ve %35,1 olarak re-entrant, triangle, square ve star kirişler için yüksektir.



Şekil 4.3 Kirişlerin ω_1 nümerik harmonik cevapları (t=1)

Auxetic kirişlerin ikinci doğal frekans bölgesindeki yer değiştirme düz kirişe göre sırasıyla %23,6, %23,9, %20,3 ve %21,3 olarak re-entrant, triangle, square ve star kirişler için sırasıyla yüksektir.

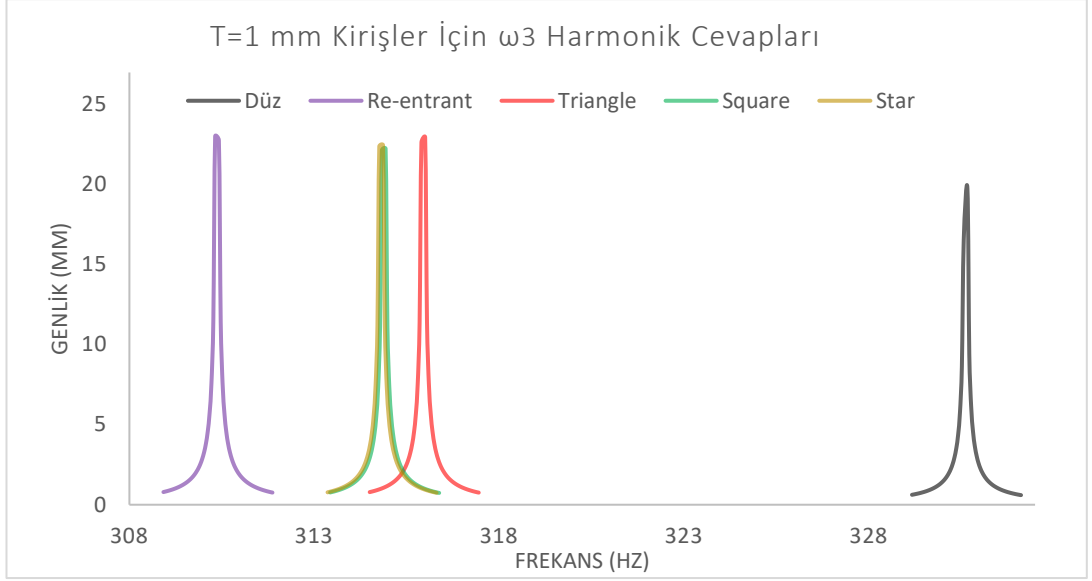
İkinci doğal frekanslardaki elastik şekil değiştirme miktarı birinci doğal frekansa göre sırasıyla %29,75, %36,2, %36,8, %36,2 ve %36,9 oranında düz kiriş, re-entrant, triangle, square ve star kirişler için azalmıştır. Auxetic boşaltma yapılmış olan kirişlerin ikinci doğal frekanslarındaki yer değiştirme miktarındaki azalma düz kirişlerden daha fazladır.



Şekil 4.4 Kirişlerin ω_2 nümerik harmonik cevapları ($t=1$)

Alışılmamış kirişlerde, üçüncü doğal frekans bölgesinde zorlanmış titreşim durumunda oluşan şekil değiştirme miktarları %15,3, %16,2, %15,6 ve %13,7 oranında düz kirişe göre re-entrant, triangle, square ve star kirişlerinde sırasıyla fazladır.

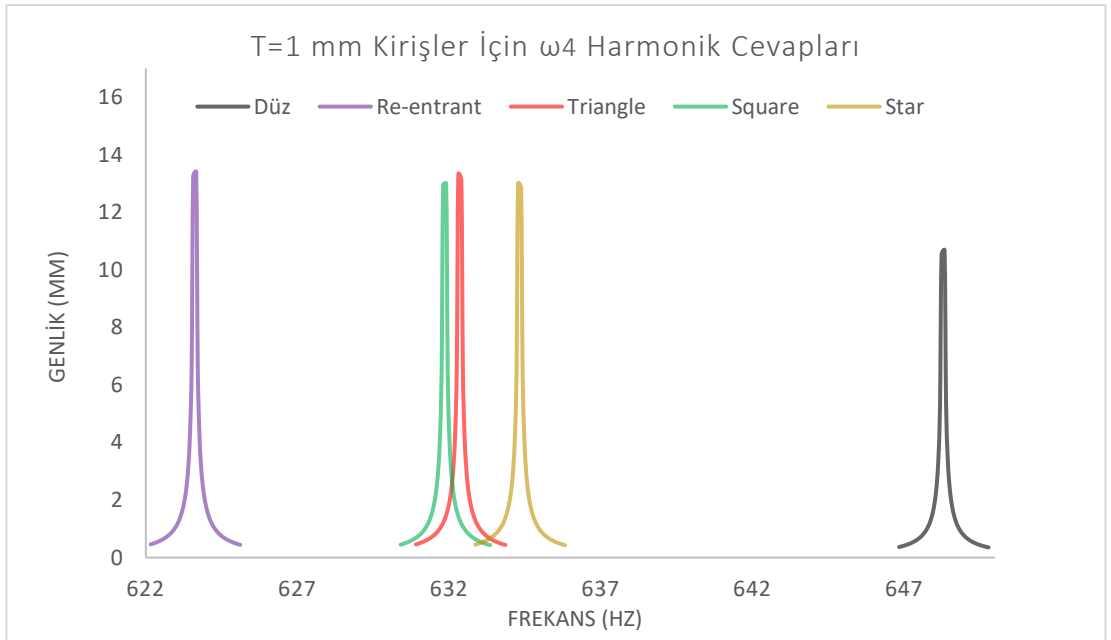
Üçüncü doğal frekanslardaki enerji hasadı için gerekli olan yer değiştirme ikinci doğal frekansa göre sırasıyla %27,4, %32,6, %31,9, %32,1 ve %31,9 oranında düz kiriş, re-entrant, triangle, square ve star kirişler için azalmıştır. Aynı şekilde auxetic boşaltma yapılarak oluşturulan alışılmamış kirişler üçüncü doğal frekanslarındaki yer değiştirme miktarındaki azalma düz kirişlerden daha fazladır.



Şekil 4.5 Kirişler için ω_3 nümerik harmonik cevapları ($t=1$)

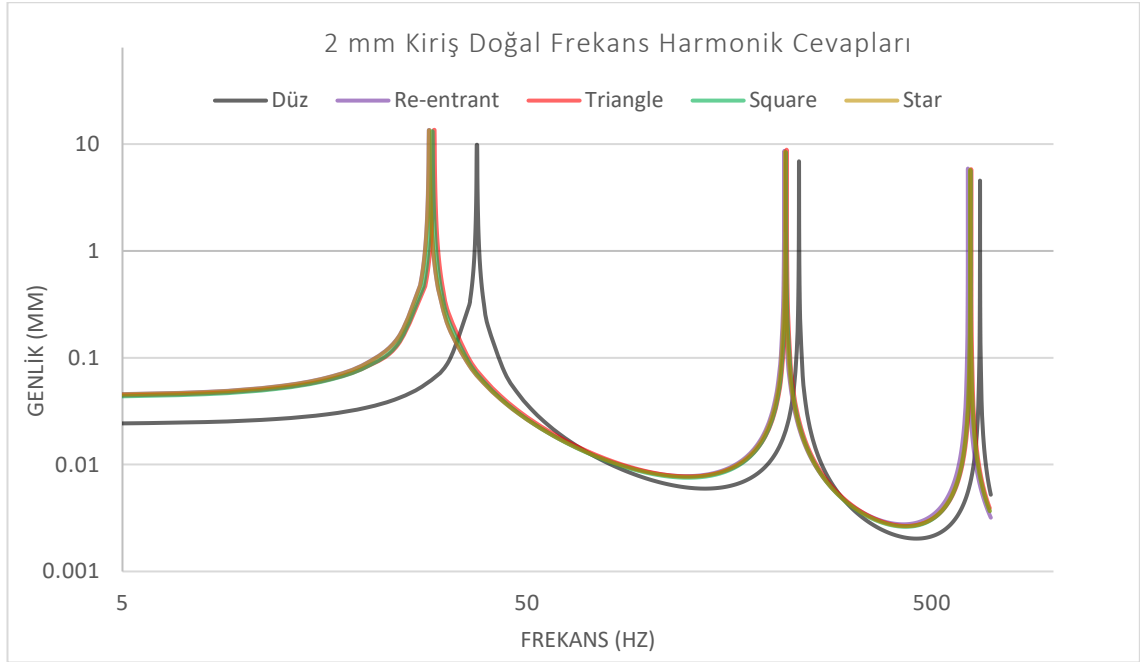
Auxetic kirişlerin son olarak dördüncü doğal frekans bölgesindeki yer değiştirme düz kirişe göre sırasıyla %24,1, %24,8, %21,7 ve %21,8 olarak re-entrant, triangle, square ve star kirişler için sırasıyla yüksektir.

Dördüncü doğal frekanslardaki enerji hasadı için gerekli olan yer değiştirme üçüncü doğal frekansa göre sırasıyla %45,9, %41,7, %41,9, %41,5 ve %42,9 oranında düz kiriş, re-entrant, triangle, square ve star kirişler için azalmıştır.



Şekil 4.6 Kirişler için ω_4 nümerik harmonik cevapları ($t=1$)

Kiriş kalınlığının 2 mm'ye çıkarılması durumunda nümerik harmonik analiz sonuçları Tablo 4.6 ve Şekil 4.7'de verilmiştir.



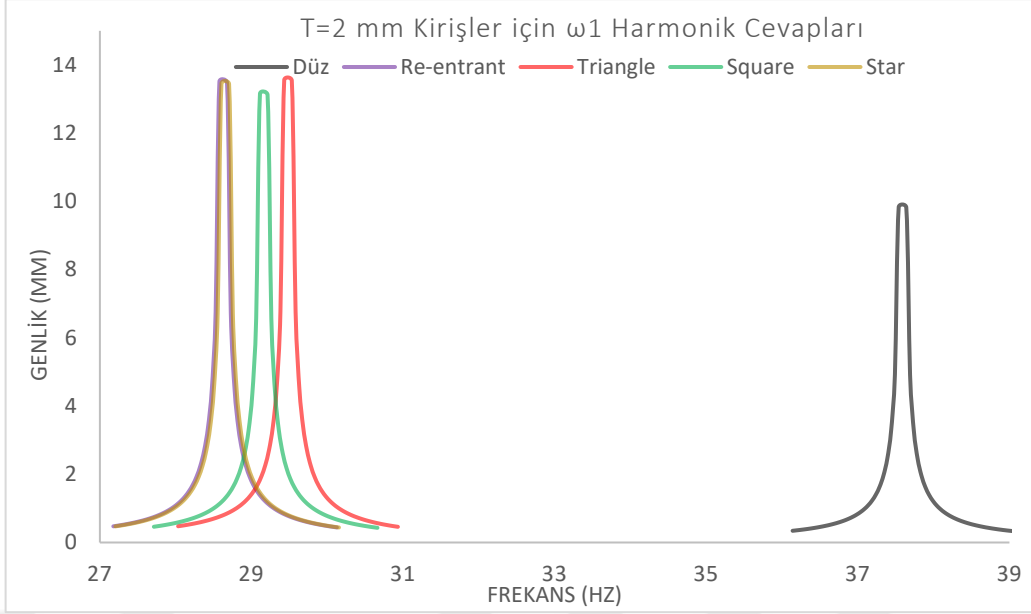
Şekil 4.7 Kirişlerin nümerik harmonik cevapları (t=2)

Tablo 4.6 Kirişlerin nümerik harmonik analiz sonuçları (t=2)

Düz		Re-entrant		Triangle		Square		Star	
Hz	Yer Değ.	Hz	Yer Değ.	Hz	Yer Değ.	Hz	Yer Değ.	Hz	Yer Değ.
37,53	9,83	28,57	13,51	29,43	13,55	29,11	13,15	28,6	13,45
234,95	6,9	216,14	8,64	219	8,86	218,27	8,39	217,16	8,5
658,31	4,55	614,38	5,9	626,13	5,81	623,2	5,71	622,53	5,78

Kalınlığın artırıldığı auxetic kirişlerde enerji hasadının yapılacağı bölgedeki ortalama yer değiştirme miktarları 1 mm kirişlerdeki gibi doğal frekans bölgelerinde harmonik kuvvet uygulandığında artmıştır. Bu artış doğal frekans artışı ile azalmaktadır. Tasarımı yapılan auxetic kirişlerde düz kirişe göre titreşim altında enerji hasadı için gerekli olan yer değiştirme miktarlarında artış olmuştur.

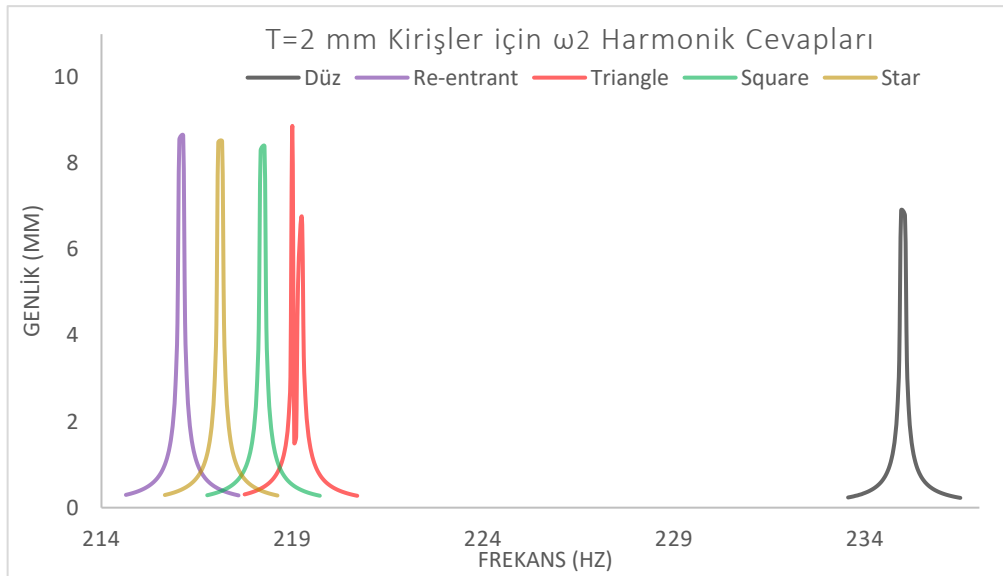
Kalınlığı 2 mm auxetic kirişlerin birinci doğal frekans bölgesindeki yer değiştirmeler incelendiğinde düz kirişe göre sırasıyla %37,43, %37,84, %33,77 ve %36,82 olarak re-entrant, triangle, square ve star kirişler için sırasıyla yüksektir.



Şekil 4.8 Kirişlerin ω_1 nümerik harmonik cevapları ($t=2$)

Auxetic kirişlerin ikinci doğal frekans bölgesindeki yer değiştirmeleri incelendiğinde düz kirişe göre $t=2$ için %25,21, %28,40, %21,59 ve %23,1 olmak üzere sırasıyla re-entrant, triangle, square ve star kirişler için yüksektir.

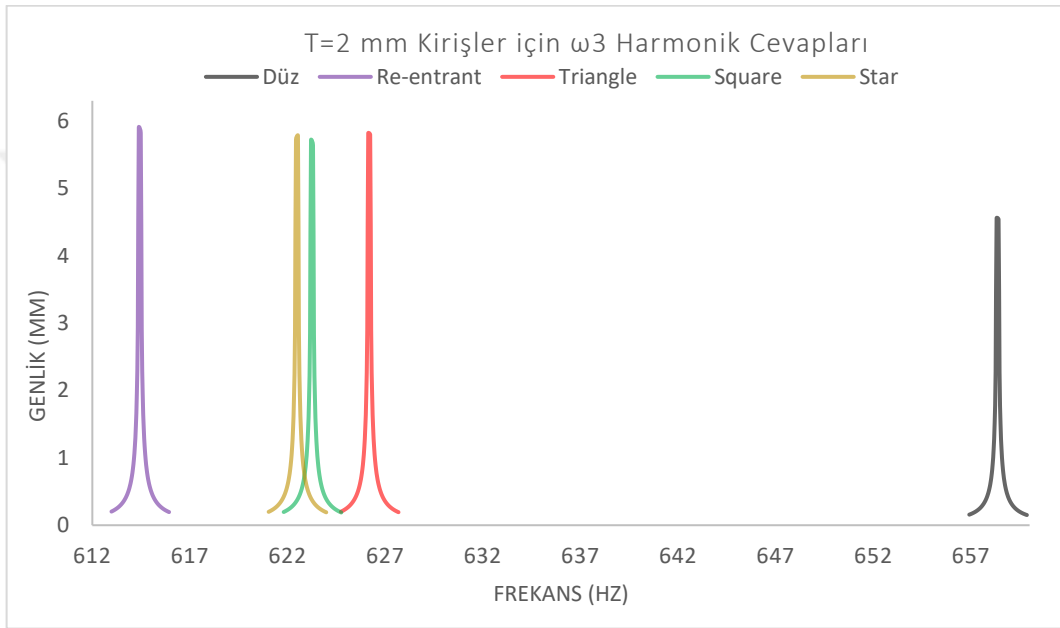
İkinci doğal frekanslardaki elastik şekil değiştirme miktarı birinci doğal frekansa göre sırasıyla %29,8, %36, %34,6, %36,1 ve %36,8 oranında düz kiriş, re-entrant, triangle, square ve star kirişler için azalmıştır.



Şekil 4.9 Kirişlerin ω_2 nümerik harmonik cevapları ($t=2$)

Kalınlığı 2 mm auxetic kirişlerin üçüncü doğal frekans bölgesindeki yer değiştirmeleri incelendiğinde düz kirişe göre sırasıyla %29,6, %27,6, %25,4 ve %27 olarak re-entrant, triangle, square ve star kirişler için sırasıyla yüksektir.

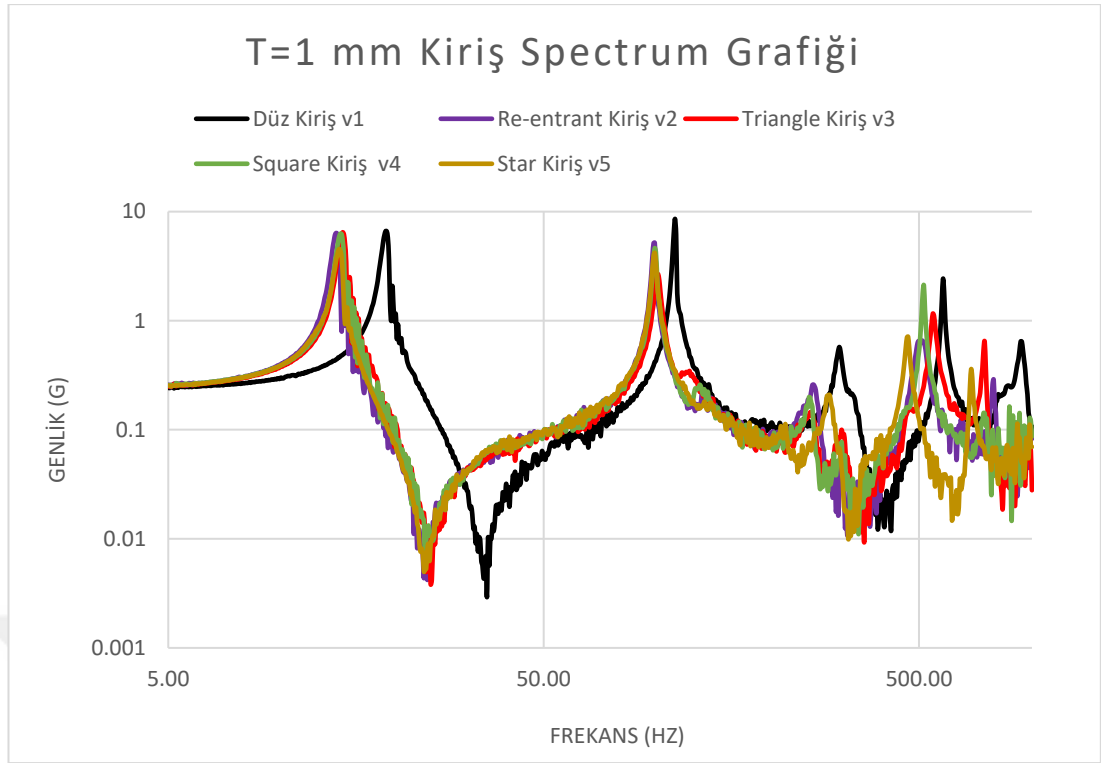
Üçüncü doğal frekanslardaki elastik şekil değiştirme miktarı ikinci doğal frekansa göre sırasıyla %34,5, %31,7, %34,4, %31,9 ve %32 oranında düz kiriş, re-entrant, triangle, square ve star kirişler için azalmıştır.



Şekil 4.10 Kirişlerin ω_3 nümerik harmonik cevapları ($t=2$)

4.5 Deneysel Sonuçlar

Yapılan analiz sonuçlarını doğrulamak ve tüm kirişlerin doğal frekanslarını bulmak için elektro mekanik sarsıcı ile titreşim testleri yapılmıştır. Kalınlığı 1 mm olan kirişler için deneylerde elde edilen sonuçlar Şekil 4.11 ve Tablo 4.7 de verilmiştir.

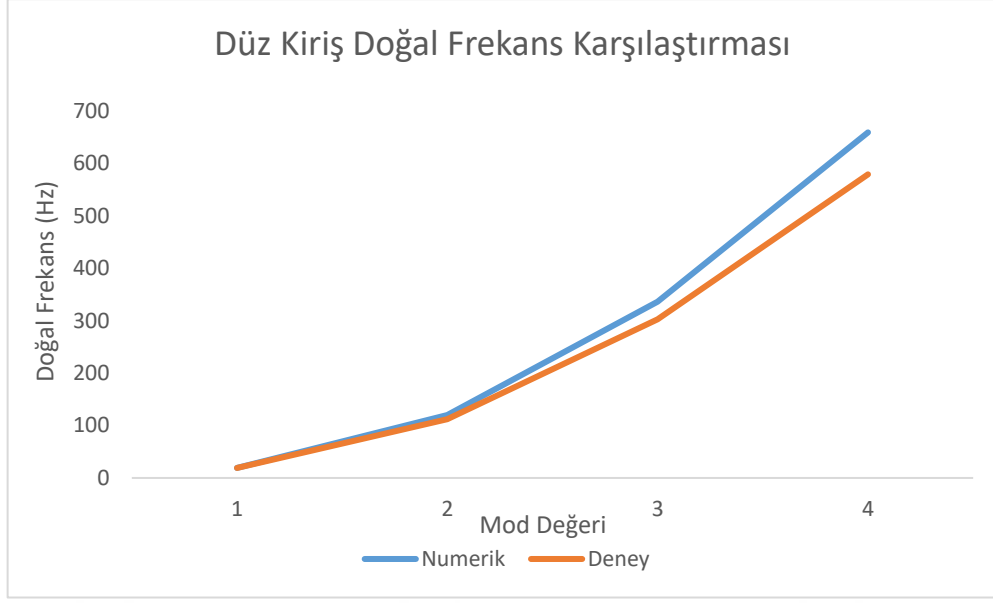


Şekil 4.11 Kirişlerin deneysel spektrum sonuçları (t=1)

Tablo 4.7 Kirişlerin deneysel doğal frekans sonuçları (t=1)

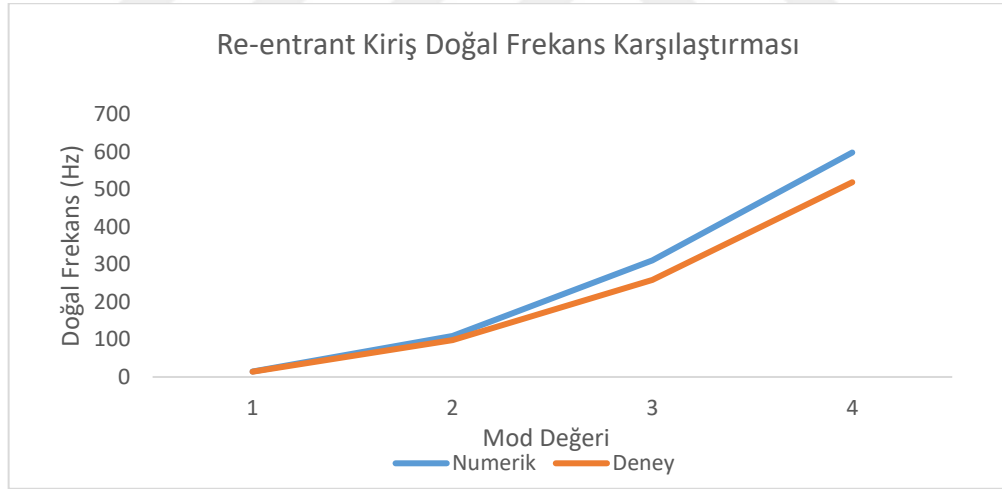
Düz		Re-entrant		Triangle		Square		Star	
Analiz	Deney	Analiz	Deney	Analiz	Deney	Analiz	Deney	Analiz	Deney
18.86	19.1	14.51	14.09	14.95	14.6	14.79	14.49	14.56	14.19
117.96	111.94	108.99	98.17	110.37	101	110.04	98.86	109.59	98.17
330.62	302.69	310.37	258.73	315.95	256	314.88	254.67	314.81	286.42
648.28	579.43	623.61	518.8	632.34	548	631.85	515.23	634.31	567.74

Düz kirişin t=1 için doğal frekansları simülasyon ve deneysel olarak elde edilen sonuçlara göre birinci doğal frekanstan dördüncü doğal frekansa kadar sırasıyla %1,27, %5, %8,4, %10,62 olmak üzere yüzdelik veriler elde edilmiştir. Doğal frekans artıkça deneysel sonuçlar ile analiz sonucu arasındaki fark artmıştır.



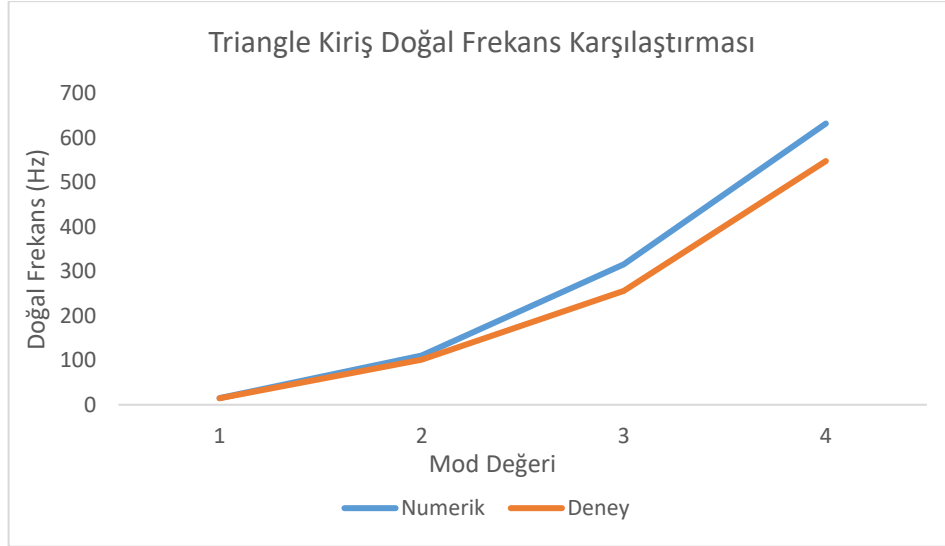
Şekil 4.12 Düz kiriş için deneysel ve nümerik doğal frekans karşılaştırması ($t=1$)

Re-entrant kirişin doğal frekansları simülasyon ve deneysel elde edilen sonuçlar arasında birinci doğal frekanstan dördüncü doğal frekansa kadar sırasıyla %2,8, %9,9, %16,6, %16,8 farklı değer $t=1$ için elde edilmiştir.



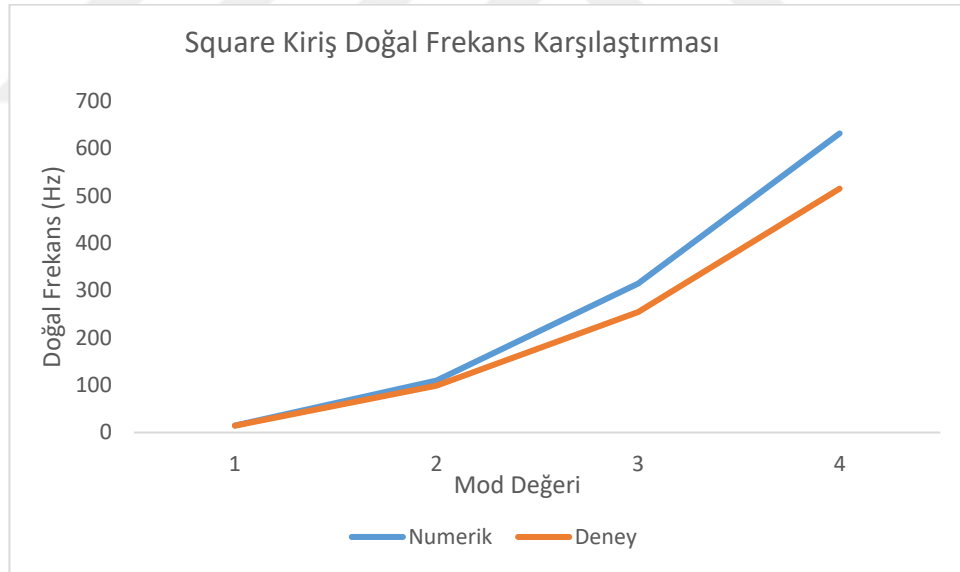
Şekil 4.13 Re-entrant kiriş için deneysel ve nümerik doğal frekans karşılaştırması ($t=1$)

Triangle kirişin doğal frekansları simülasyon ve deneysel olarak $t=1$ için elde edilen sonuçlar arasında birinci doğal frekanstan dördüncü doğal frekansa kadar sırasıyla %2,3, %8,4, %18,9, %13,3 farklı değer elde edilmiştir.



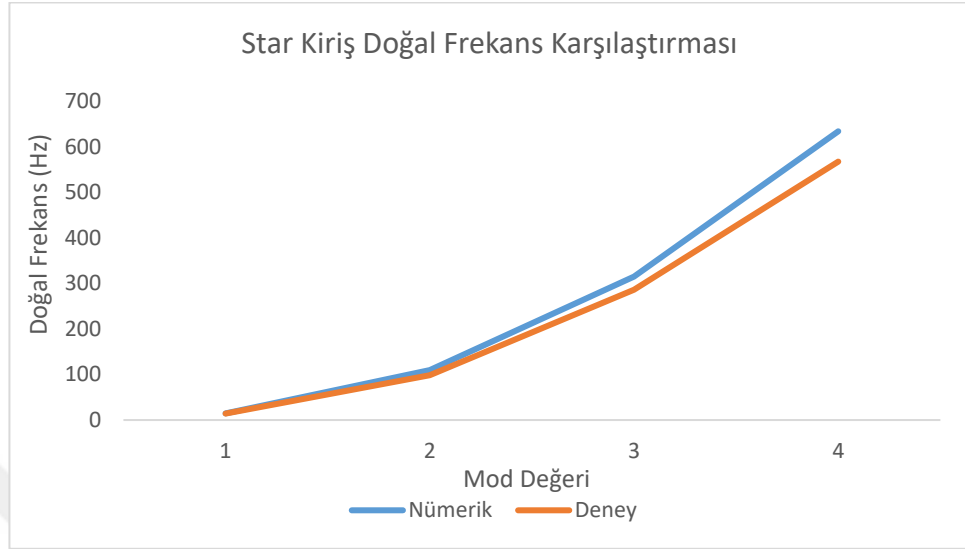
Şekil 4.14 Triangle kiriş için deneysel ve nümerik doğal frekans karşılaştırması (t=1)

Square kirişin doğal frekansları simülasyon ve deneysel elde edilen sonuçlar arasında birinci doğal frekanstan dördüncü doğal frekansa kadar sırasıyla %1,8, %10,1, %19,1, %18,4 farklı değer elde edilmiştir.



Şekil 4.15 Square kiriş için deneysel ve nümerik doğal frekans karşılaştırması (t=1)

1 mm kalınlığındaki star kirişin doğal frekansları simülasyon ve deneysel elde edilen sonuçlar arasındaki fark birinci doğal frekanstan dördüncü doğal frekansa kadar sırasıyla %2,5, %10,4, %9, %10,4 olmak üzere elde edilmiştir.

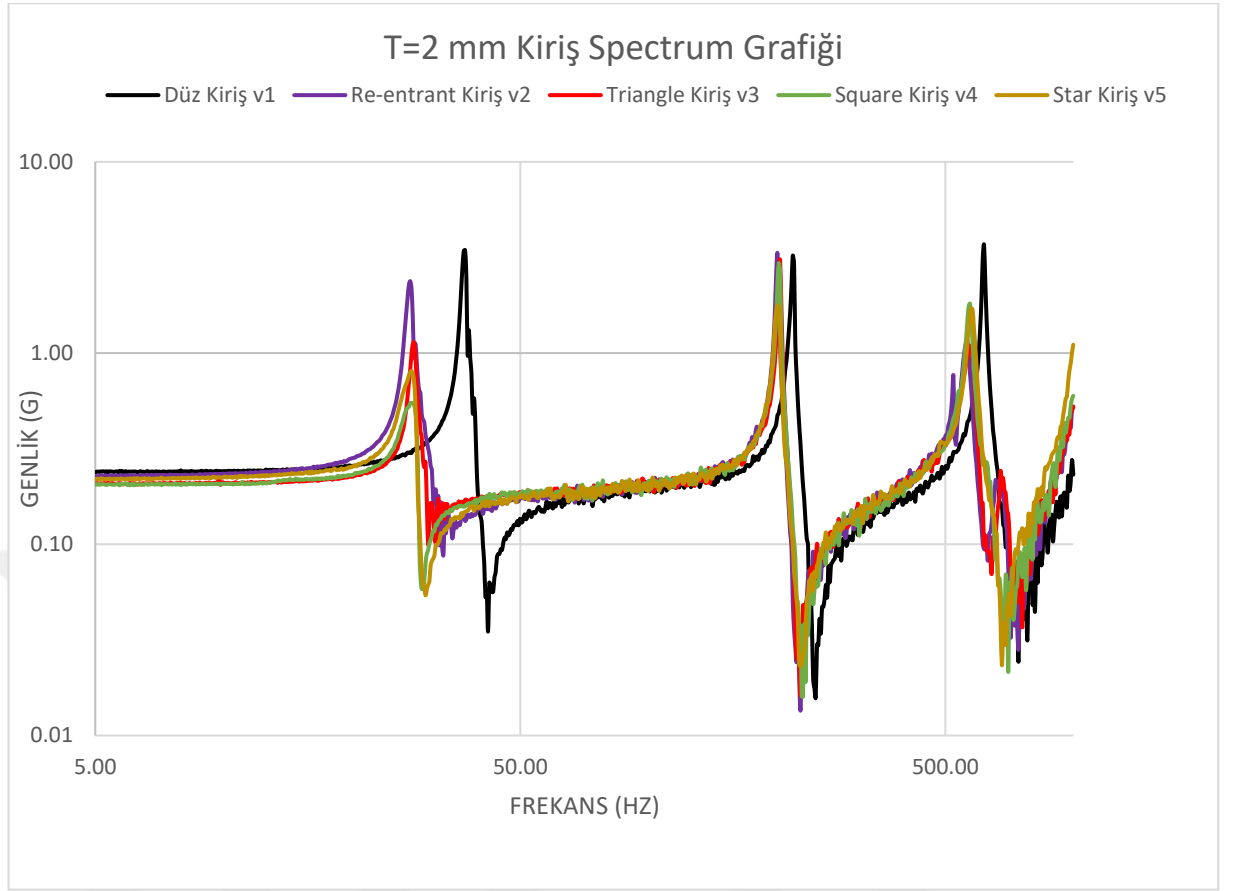


Şekil 4.16 Star kiriş için deneysel ve nümerik doğal frekans karşılaştırması (t=1)

Kalınlığı 2 mm'ye çıkarılan kirişler için deneylerde elde edilen veriler Şekil 4.17 ve Tablo 4.8 de verilmiştir.

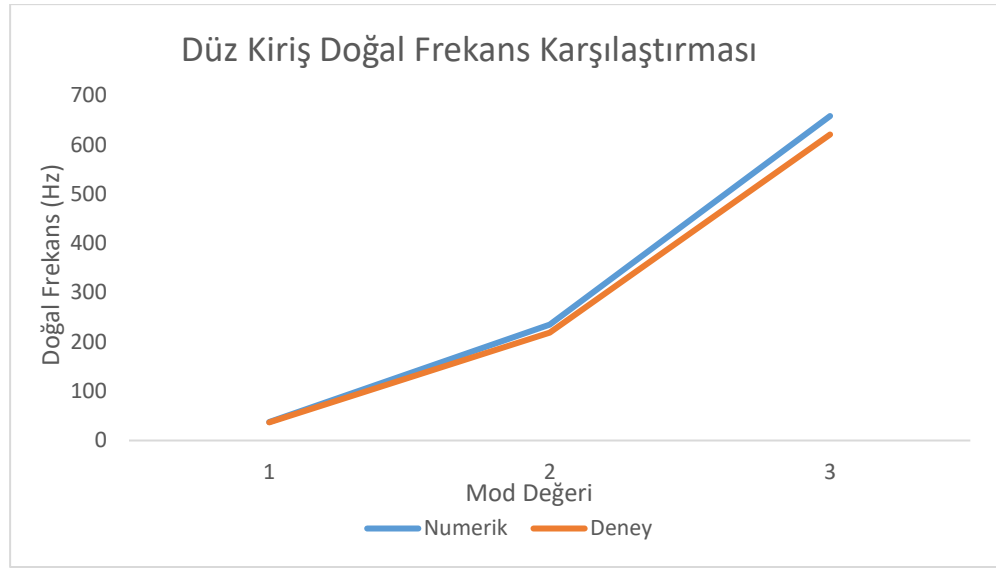
Tablo 4.8 Kirişlerin deneysel doğal frekans sonuçları (t=2)

Düz		Re-entrant		Triangle		Square		Star	
Analiz	Deney	Analiz	Deney	Analiz	Deney	Analiz	Deney	Analiz	Deney
37,59	36,81	28,62	27,54	29,48	28,12	29,14	28,31	28,65	28,12
235	218,78	216,09	201,27	219,02	204,17	218,22	202,77	217,11	202,77
658,3	620,87	614,43	563,64	626,18	608,14	623,25	571,48	622,48	587,49



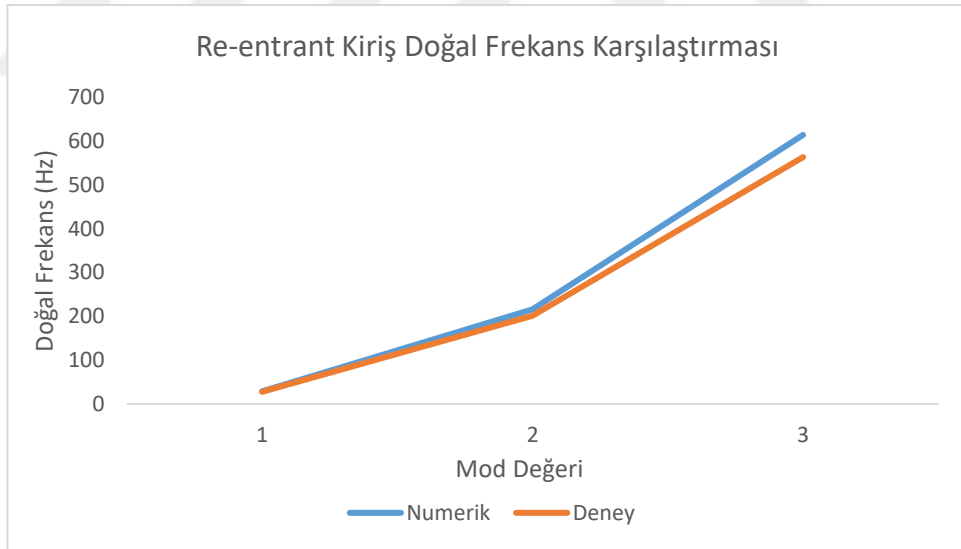
Şekil 4.17 Kirişlerin deneysel spektrum sonuçları (t=2)

Düz kirişin doğal frekansları simülasyon ve deneysel elde edilen sonuçlar arasında birinci doğal frekanstan üçüncü doğal frekansa kadar sırasıyla %2, %6,9, %5,6 farklı yüzdeler elde edilmiştir. 1 mm kalınlığındaki kirişlerde olduğu gibi kalınlığı arttırılan kirişlerde de doğal frekans artıkça deneysel sonuçlar ile analiz sonucu arasındaki fark artmıştır.



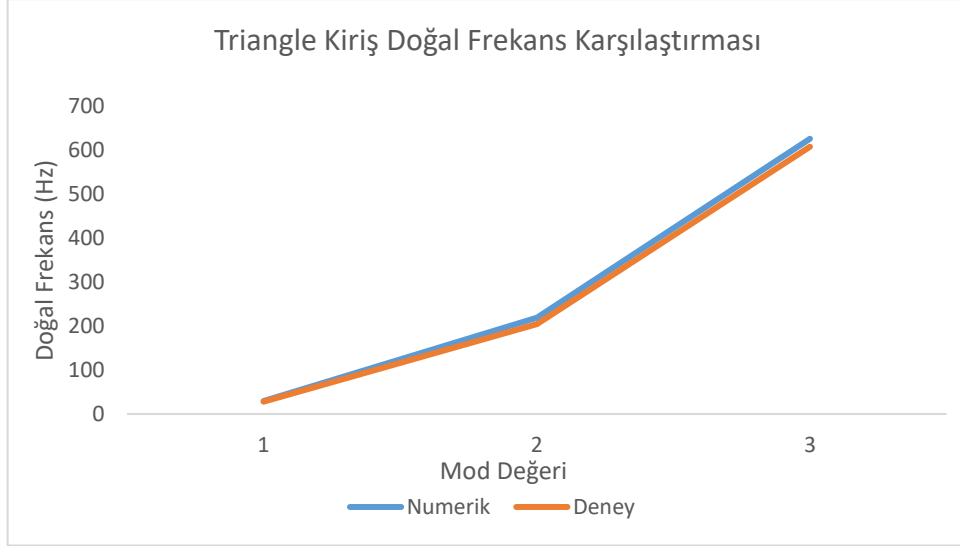
Şekil 4.18 Kalınlık 2 mm düz kiriş için deneysel ve nümerik doğal frekans karşılaştırması

Re-entrant kirişin doğal frekansları simülasyon ve deneysel elde edilen sonuçlar arasında birinci doğal frekanstan üçüncü doğal frekansa kadar sırasıyla %3,77, %6,85, %8,2 farklı yüzdelere elde edilmiştir.



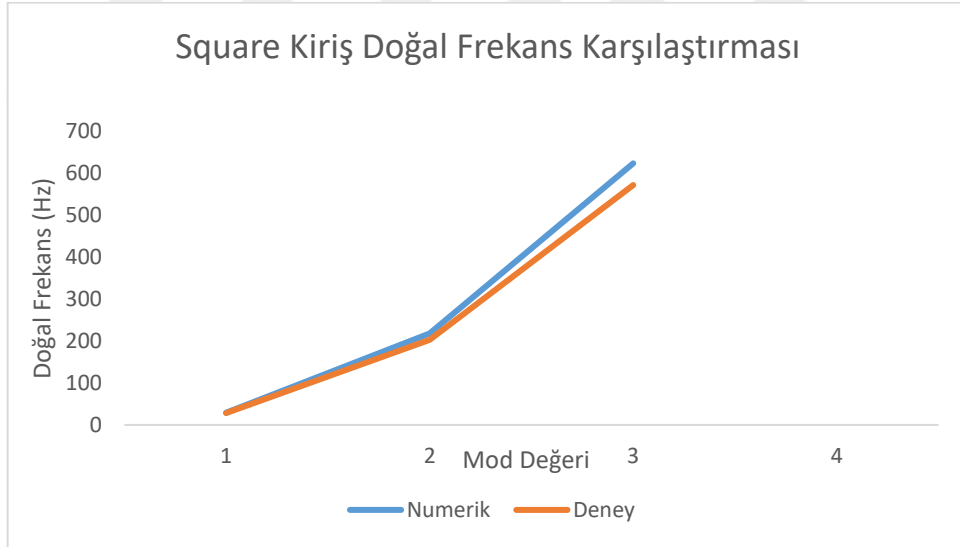
Şekil 4.19 Re-entrant kiriş için deneysel ve nümerik doğal frekans karşılaştırması (t=2)

Triangle kirişin doğal frekansları simülasyon ve deneysel elde edilen sonuçlar arasında birinci doğal frekanstan üçüncü doğal frekansa kadar sırasıyla %4,6, %6,7, %2,8 farklı yüzdelere elde edilmiştir.



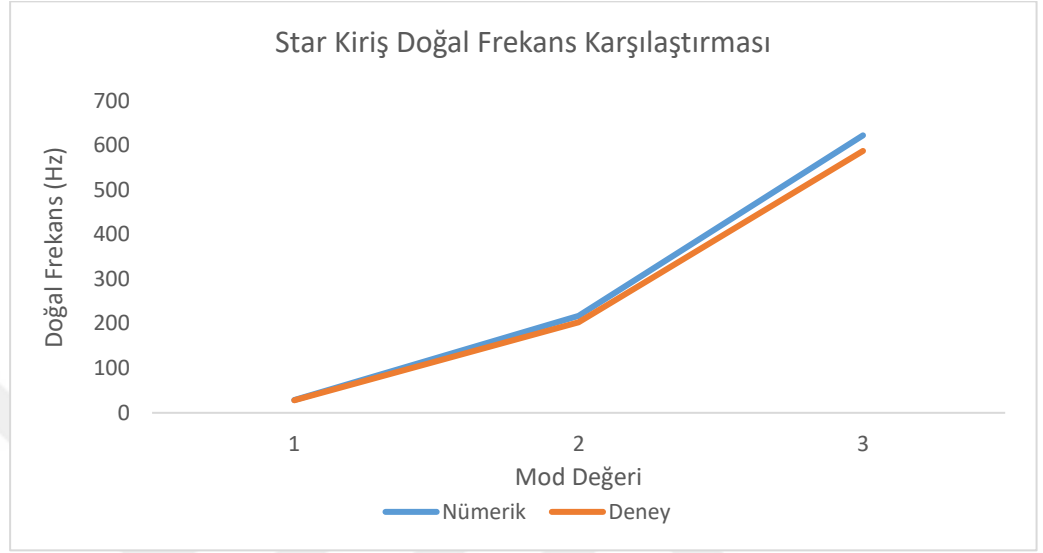
Şekil 4.20 Triangle kiriş için deneysel ve nümerik doğal frekans karşılaştırması (t=2)

Square kirişin doğal frekansları simülasyon ve deneysel elde edilen sonuçlar arasında birinci doğal frekanstan üçüncü doğal frekansa kadar sırasıyla %2,8, %7, %8,3 farklı yüzde elde edilmiştir.



Şekil 4.21 Square kiriş için deneysel ve nümerik doğal frekans karşılaştırması (t=2)

Star kirişin doğal frekansları simülasyon ve deneysel elde edilen sonuçlar arasında birinci doğal frekanstan üçüncü doğal frekansa kadar sırasıyla %1,8, %6,6, %5,6 farklı değer elde edilmiştir.



Şekil 4.22 Star kiriş için deneysel ve nümerik doğal frekans karşılaştırması (t=2)

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, titreşim ile enerji hasadında kullanılmak üzere negatif poisson oranına sahip auxetic yapılar ile tasarlanmış alışılmamış kirişlerin harmonik davranışları incelenmiştir. Piezoelektrik malzemeler kendilerine kuvvet uygulandığı zaman yer değiştirip voltaj üretebilen aynı zamanda voltaj verildiği zaman yer değiştirme özelliğine sahiptir. Bu malzemelerde yer değiştirme miktarının artırılmasıyla elde edilen voltaj miktarı artmaktadır. Klasik kirişlerde piezoelektrik malzemeler kullanılarak doğal frekanslarında zorlanmasıyla titreşim sayesinde enerji hasadı yapılmaktadır. Bu enerji hasadını arttırabilmek için kirişlerin zorlanma altındaki yer değiştirmenin artması gerekmektedir. Auxetic yapılar negatif poisson oranına sahip olup kuvvet altında her iki yöne aynı anda uzama veya daralma gösterebilmektedir. Bu yapıları kirişler üzerinde uygulayarak titreşim altında enerji hasadını arttırmak mümkündür. Bu yüzden auxetic yapıya sahip kirişlerin enerji hasadında kullanılabilirliğinin görülmesi için öncelikle kirişin doğal frekans üzerindeki etkisi incelenmiştir. Titreşim altında kirişlerin zorlanması durumunda gösterecekleri davranışlar araştırılmıştır. Daha sonra elde edilen analiz sonuçlarını doğrulamak için tasarlanan kirişler üretilip deneysel olarak doğal frekansları elde edilmiştir.

Yapılan analizlere göre kirişlerde auxetic yapılar kirişin doğal frekansını azaltmakta ve yük altındaki yer değiştirmesini arttırmaktadır. Tasarlanan auxetic yapıların doğal frekans ve yer değişimleri üzerindeki etkisi birbirlerine benzer çıkmıştır.

Bu bölümde analiz ve deneysel elde edilen sonuçlar bir önceki bölümde verildiği sırayla özet halinde sıralanmış ve daha sonraki çalışmalara ışık tutacak öneriler sunulmuştur.

5.1 Statik Yük Altındaki Yer Değiştirmeler

- Auxetic yapılar, kirişlerin sehim oranını %50 oranında arttırmaktadır.
- Auxetic yapıların kalın kirişlerde kullanılması durumunda sehim oranı daha fazla artmaktadır.
- Tasarlanan kirişlerde en fazla sehim artışı re-entrant ve star yapısında meydana gelmektedir.
- Enerji hasadı bölgesinde auxetic yapının kullanılması yer değiştirmeyi yaklaşık olarak %80 oranında arttırmıştır.

- Kiriş kalınlığının artması enerji hasadı bölgesindeki yer değiştirme oranınıda arttırmıştır.
- Tasarlanan kirişlerde enerji hasadı bölgesindeki en fazla yer değiştirme re-entrant ve star yapısında meydana gelmektedir.

5.2 Doğal Frekanslar

- Auxetic boşaltmalar kiriş katılığını azaltarak doğal frekansları düşürmüştür.
- Kiriş doğal frekansı arttıkça auxetic yapılı kirişlerin katılığı düz kirişlere yaklaşmaktadır.
- Kiriş kalınlığının artması auxetic yapılı kirişlere göre doğal frekanslardaki değişim oranını etkilememektedir.
- Tasarlanan kirişler içinde en yüksek doğal frekans değişimi re-entrant ve star kirişte meydana gelmiştir.

5.3 Harmonik Cevaplar

- Kirişlerde enerji hasadını arttırabilmek için gerekli olan yer değiştirme arttırmaları doğal frekans bölgelerinde zorlanmaya maruz kaldığı zaman artmıştır.
- Auxetic yapılı kirişler static yük altındakine benzer şekilde titreşim altında daha fazla elastik şekil değişimine maruz kalmıştır ve enerji hasadı bakımından daha fizibildir.
- Tasarlanan kirişler içinde harmonik olarak zorlanmaya maruz kaldığı zaman her iki kalınlıkta da en fazla enerji hasadı bölgesindeki yer değiştirme triangle kiriş modelinde meydana gelmiştir.
- Doğal frekans arttıkça auxetic yapılı kirişlerin yer değiştirme cevaplarındaki azalmalar düz kirişlere göre fazla olmakta ve enerji hasadı bakımından düz kirişe yaklaşmaktadır.

5.4 Deneysel Sonuçlar

- Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen kiriş doğal frekansları benzetimlerde elde edilen sonuçlar ile uyumlu çıkmıştır.
- Kalınlığı 1 mm ve 2 mm olan kirişler için analiz ve deneysel olarak doğal frekanslar karşılaştırıldığında, her bir kiriş için doğal frekans arttıkça deneysel ve nümerik analiz sonuçlarıda arasındaki farkta artmıştır.

- Analiz ve deneysel çalışmalar arasındaki fark kiriş kalınlığı arttıkça yüksek frekanslarda azalmaktadır.
- Auxetic yapılı kirişlerin deneysel çalışmalarında elde edilen doğal frekansları ile nümerik olarak elde edilen sonuçlar arasındaki fark daha fazladır.

5.5 Daha Sonraki alışmalar İçin neriler

- Bu çalışmada, modellemede piezoelektrik malzemeler bulunmamaktadır. Piezoelektrik malzemelerin modellemeye katılarak enerji hasadı için gerekli yer değiştirmeler gerçeğe daha yakın olarak sonuçlar verecektir.
- Enerji hasadının daha fazla olduğunu kirişi bulmak için aynı zamanda yer değiştirmenin yanında piezoelektrik malzemedeki gerilmelerin zorlanmış titreşim altındaki değerlerinin elde edilmesi daha doğru olacaktır.
- Bu çalışmada elde edilen teorik sonuçların doğrulanması için tasarlanan kirişler üzerinde Piezoelektrik patchler yapıştırılarak doğal frekans bölgeleri altındaki enerji hasatları deneysel olarak elde edilebilir.

6. KAYNAKLAR

Bu tez çalışmasında APA atıf sistemi kullanılmıştır.

- Abdelkefi, A., Najar, F., Nayfeh, A. H., & Ayed, S. B. (2011). An energy harvester using piezoelectric cantilever beams undergoing coupled bending–torsion vibrations. *Smart Materials and Structures*, 20(11), 115007. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/20/11/115007>
- Auxetic clamped-clamped resonators for high-efficiency vibration energy harvesting at low-frequency excitation | Elsevier Enhanced Reader. (t.y.). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117010>
- Av, A. L. (2012). *Piezoelektrik Malzemeler Yardımıyla Enerji Hasatı*. 8.
- Beşergil. (2020). *Piezoelektrik Malzemeler (piezoelectric materials)*. <http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/piezoelektrik-malzemeler-piezoelectric.html>
- Bolat, F. C. (2022). Experimental and numerical analysis of vibration-based hybrid energy harvesting from non-classical beam structures. *Structures*, 37, 504-513. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.01.036>
- Chen, B., Jia, Y., Narita, F., Wang, C., & Shi, Y. (2022). Multifunctional cellular sandwich structures with optimised core topologies for improved mechanical properties and energy harvesting performance. *Composites Part B: Engineering*, 109899. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109899>
- Chen, K., Gao, Q., Fang, S., Zou, D., Yang, Z., & Liao, W.-H. (2021). An auxetic nonlinear piezoelectric energy harvester for enhancing efficiency and bandwidth. *Applied Energy*, 298, 117274.
- Çakan, B. G., Ensarioğlu, C., Küçükakarsu, V. M., Tekin, İ. E., & Çakır, M. C. (2021). Experimental and numerical investigation of in-plane and out-of-plane impact behaviour of auxetic honeycomb boxes produced by material extrusion. *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, 36(3), 1657-1667.
- Ebrahimian, F., Kabirian, Z., Younesian, D., & Eghbali, P. (2021). Auxetic clamped-clamped resonators for high-efficiency vibration energy harvesting at low-frequency excitation. *Applied Energy*, 295, 117010.
- Eghbali et al. - 2020—Study in circular auxetic structures for efficienc.pdf. (t.y.).
- Eghbali, P., Younesian, D., & Farhangdoust, S. (2020). Enhancement of piezoelectric vibration energy harvesting with auxetic boosters. *International Journal of Energy Research*, 44(2), 1179-1190.
- Eghbali, P., Younesian, D., Moayedizadeh, A., & Ranjbar, M. (2020). Study in circular auxetic structures for efficiency enhancement in piezoelectric vibration energy harvesting. *Scientific Reports*, 10(1), 16338.
- Evans et al. - 1991—Molecular network design.pdf. (t.y.). Geliş tarihi 13 Ocak 2022, gönderen <https://www.nature.com/articles/353124a0.pdf>
- Faraci, D., Driemeier, L., & Comi, C. (2021). Bending-Dominated Auxetic Materials for Wearable Protective Devices Against Impact. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 7(3), 425-435.
- Gibson, L. J., Ashby, M. F., Schajer, G. S., & Robertson, C. I. (1982). The Mechanics of Two-Dimensional Cellular Materials. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 382(1782), 25-42.
- Gmbh, P. C. (2020). *P-876 DuraAct Patch Transducer*. <https://www.piceramic.com/en/products/piezoceramic-actuators/patch-transducers/p-876-duraact-patch-transducer-101790/>
- Grzybek, D., Sikora, W., Kata, D., & Micek, P. (2020). Comparative Numerical Analysis of a Piezoelectric Harvester Based on Non-auxetic and Auxetic Material. *2020 21th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, 1-5.
- Jiang, Y. (2016). *Analytical, Experimental and Numerical Study on The Mechanical Behavior of 3d Printed Auxetic Chiral Structures*. 105.
- Karaca, A. A. (2016). *Auxetic Malzemelerin Deneyisel Olarak ve Sonlu Elemanlar Metodu ile İncelenmesi*. 86.
- Li, Q., Kuang, Y., & Zhu, M. (2017). Auxetic piezoelectric energy harvesters for increased electric power output. *AIP Advances*, 7(1), 015104.
- Linforth, S. J. (2020). *Auxetic Armour System for Protection Against Soil Blast Loading*. 283.

- P. Siva Naga Sree. (2020). Modeling and Analysis of Structures with Negative Poisson's Ratio. *International Journal of Engineering Research And*, V9(03).
- Sanami et al. - 2014—*Auxetic Materials for Sports Applications.pdf*. (t.y.).
- Sharpes, N., Abdelkefi, A., & Priya, S. (2015). Two-dimensional concentrated-stress low-frequency piezoelectric vibration energy harvesters. *Applied Physics Letters*, 107(9), 093901. <https://doi.org/10.1063/1.4929844>
- Tatlier, M. S. (2021). A numerical study on energy absorption of re-entrant honeycomb structures with variable alignment. *International Journal of Crashworthiness*, 26(3), 237-245.
- Uzun, M. (2017). Negatif Poisson Oranına Sahip (Auxetic) Malzemeler Ve Uygulama Alanları. *Tekstil ve Mühendis*, 6.
- Wang, J., Geng, L., Ding, L., Zhu, H., & Yurchenko, D. (2020). The state-of-the-art review on energy harvesting from flow-induced vibrations. *Applied Energy*, 267, 114902. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114902>
- Wang, L., Zhao, L., Jiang, Z., Li, X., Yang, P., Bai, Y., Luo, G., Lin, Q., & Ryutaro, M. (2021). Contribution discrimination of auxetic cantilever for increased piezoelectric output in vibration energy harvesting. *2021 IEEE 16th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS)*, 513-517
- Wang, S., Deng, C., Ojo, O., Akinrinlola, B., Kozub, J., & Wu, N. (2022b). Design and modeling of a novel three dimensional auxetic reentrant honeycomb structure for energy absorption. *Composite Structures*, 280, 114882.
- Yalçın, B., Ergene, B., & Karakılınç, U. (2018). Modal and Stress Analysis of Cellular Structures Produced with Additive Manufacturing by Finite Element Analysis (FEA). *Academic Perspective Procedia*, 1(1), 263-272.
- Yang, Z., Erturk, A., & Zu, J. (2017). On the efficiency of piezoelectric energy harvesters. *Extreme Mechanics Letters*, 15, 26-37. <https://doi.org/10.1016/j.eml.2017.05.002>
- Zhang, Lu, & You. (2020). *Large deformation and energy absorption of additively manufactured auxetic materials and structures: A review | Elsevier Enhanced Reader*.

7. EKLER

EK 1

1. 1 mm Düz Kiriş Sinüs Tarama Titreşim Test Verileri

Point id component
Point id 26180
Overload 0
Original run GUVLAB_AUXETIC_V1T1_RS_2
Original section Section1
Original project GUVLAB_RS
Original project dir C:\LMSLocal11B\Data\UZAY\GUVLAB\GUVLAB_RS.lms
Estimator Harmonic
Compression factor 4
Sweep done 1
Sweep direction Up
Sweep rate 2 Oct/min
Sweep mode Log
Number of control channels 1
Control strategy Average
Peak 3.01566 g
Spectrum format linear
Spectrum scaling peak
Number of averages 1
Function class Spectrum
Weighting Linear

Frequency	Imaginary	Real	Amplitude
5.00E+00	2.75E-01	3.30E-03	0.275330714
5.04E+00	2.73E-01	-4.85E-04	0.27343433
5.07E+00	2.75E-01	1.14E-03	0.275494167
5.11E+00	2.78E-01	5.90E-04	0.277785527
5.14E+00	2.78E-01	4.74E-03	0.27853551
5.18E+00	2.72E-01	3.54E-03	0.272328554
5.21E+00	2.77E-01	5.84E-04	0.276628015
5.25E+00	2.77E-01	4.17E-03	0.277029269
5.28E+00	2.76E-01	3.18E-03	0.276134374
5.32E+00	2.75E-01	4.63E-04	0.27493869
5.36E+00	2.78E-01	5.66E-04	0.277783577
5.40E+00	2.77E-01	3.10E-03	0.277438535
5.43E+00	2.76E-01	3.36E-03	0.276067755
5.47E+00	2.78E-01	3.09E-03	0.277690629
5.51E+00	2.77E-01	1.72E-03	0.27725175
5.55E+00	2.76E-01	1.78E-03	0.275747126

5.58E+00	2.77E-01	9.90E-04	0.277260966
5.62E+00	2.77E-01	1.51E-03	0.276931729
5.66E+00	2.76E-01	1.83E-03	0.275876993
5.70E+00	2.78E-01	1.12E-03	0.278058954
5.74E+00	2.78E-01	2.19E-03	0.277626043
5.78E+00	2.76E-01	2.71E-03	0.275799475
5.82E+00	2.79E-01	2.89E-03	0.278764006
5.86E+00	2.78E-01	2.44E-03	0.278440572
5.90E+00	2.78E-01	2.59E-03	0.277881454
5.94E+00	2.77E-01	2.64E-03	0.27694218
5.98E+00	2.79E-01	2.60E-03	0.278997046
6.03E+00	2.77E-01	1.87E-03	0.277076584
6.07E+00	2.78E-01	2.28E-03	0.278251611
6.11E+00	2.78E-01	2.26E-03	0.277683677
6.15E+00	2.80E-01	2.72E-03	0.279894534
6.19E+00	2.80E-01	2.49E-03	0.279791576
6.24E+00	2.79E-01	2.49E-03	0.279477631
6.28E+00	2.79E-01	2.90E-03	0.279159577
6.32E+00	2.79E-01	2.76E-03	0.278649834
6.37E+00	2.80E-01	2.82E-03	0.279995735
6.41E+00	2.80E-01	2.87E-03	0.279535329
6.46E+00	2.81E-01	1.34E-03	0.280612503
6.50E+00	2.79E-01	2.11E-03	0.279233566
6.55E+00	2.79E-01	2.81E-03	0.279311698
6.59E+00	2.81E-01	3.24E-03	0.280811559
6.64E+00	2.82E-01	3.88E-03	0.281735532
6.68E+00	2.81E-01	2.14E-03	0.28131033
6.73E+00	2.79E-01	3.63E-03	0.279503782
6.78E+00	2.81E-01	4.44E-03	0.281102631
6.82E+00	2.81E-01	3.87E-03	0.281495167
6.87E+00	2.81E-01	2.70E-03	0.280956577
6.92E+00	2.82E-01	2.54E-03	0.282076043
6.97E+00	2.81E-01	2.45E-03	0.28127938
7.01E+00	2.80E-01	2.15E-03	0.279592784
7.06E+00	2.84E-01	2.34E-03	0.283541175
7.11E+00	2.82E-01	1.96E-03	0.282284738
7.16E+00	2.83E-01	1.76E-03	0.282690801
7.21E+00	2.83E-01	1.60E-03	0.282764233
7.26E+00	2.83E-01	1.84E-03	0.282996104
7.31E+00	2.83E-01	2.96E-03	0.283018911
7.36E+00	2.83E-01	2.50E-03	0.283497152
7.41E+00	2.84E-01	2.21E-03	0.283526177
7.46E+00	2.83E-01	2.98E-03	0.283499297
7.52E+00	2.84E-01	2.66E-03	0.284146815
7.57E+00	2.84E-01	2.57E-03	0.283720124
7.62E+00	2.85E-01	2.14E-03	0.284988432

7.67E+00	2.85E-01	3.66E-03	0.284852121
7.73E+00	2.86E-01	1.92E-03	0.286137916
7.78E+00	2.85E-01	2.93E-03	0.28460699
7.83E+00	2.85E-01	2.46E-03	0.285320028
7.89E+00	2.88E-01	2.27E-03	0.287847146
7.94E+00	2.85E-01	1.73E-03	0.285261635
8.00E+00	2.86E-01	2.29E-03	0.285797959
8.05E+00	2.87E-01	2.74E-03	0.28742755
8.11E+00	2.87E-01	2.94E-03	0.286776919
8.17E+00	2.87E-01	2.39E-03	0.28750342
8.22E+00	2.90E-01	2.00E-03	0.289950295
8.28E+00	2.86E-01	2.22E-03	0.286275089
8.34E+00	2.90E-01	1.85E-03	0.2899497
8.39E+00	2.89E-01	2.38E-03	0.288964098
8.45E+00	2.89E-01	2.09E-03	0.289029938
8.51E+00	2.89E-01	2.16E-03	0.288950239
8.57E+00	2.92E-01	2.24E-03	0.2916415
8.63E+00	2.91E-01	2.40E-03	0.291010905
8.69E+00	2.91E-01	2.21E-03	0.290979859
8.75E+00	2.92E-01	1.90E-03	0.29179169
8.81E+00	2.91E-01	2.74E-03	0.290708032
8.87E+00	2.92E-01	2.38E-03	0.292015108
8.93E+00	2.93E-01	2.00E-03	0.293004241
8.99E+00	2.92E-01	2.11E-03	0.291514052
9.06E+00	2.94E-01	1.77E-03	0.293577323
9.12E+00	2.95E-01	2.39E-03	0.295329777
9.18E+00	2.93E-01	2.12E-03	0.293087778
9.25E+00	2.96E-01	2.02E-03	0.295923405
9.31E+00	2.94E-01	1.97E-03	0.294370491
9.38E+00	2.96E-01	2.61E-03	0.295712954
9.44E+00	2.98E-01	2.02E-03	0.297946336
9.51E+00	2.95E-01	3.40E-03	0.295065728
9.57E+00	2.97E-01	1.63E-03	0.297122482
9.64E+00	2.99E-01	3.70E-03	0.298612072
9.71E+00	2.97E-01	4.22E-04	0.2970651
9.77E+00	3.00E-01	3.45E-03	0.299806577
9.84E+00	2.99E-01	3.10E-03	0.299183458
9.91E+00	2.97E-01	2.88E-04	0.297399839
9.98E+00	3.03E-01	2.21E-03	0.302564367
1.00E+01	3.01E-01	3.99E-03	0.30067718
1.01E+01	2.99E-01	2.51E-03	0.299379311
1.02E+01	3.02E-01	7.26E-04	0.302401571
1.03E+01	3.04E-01	1.69E-03	0.304498215
1.03E+01	3.05E-01	1.64E-03	0.304953502
1.04E+01	3.08E-01	4.50E-03	0.307782377
1.05E+01	3.07E-01	4.47E-03	0.307353762

1.05E+01	3.06E-01	4.62E-03	0.306172961
1.06E+01	3.07E-01	3.98E-03	0.30726141
1.07E+01	3.10E-01	6.04E-04	0.30983159
1.08E+01	3.10E-01	2.33E-04	0.309974587
1.08E+01	3.09E-01	-3.38E-04	0.309301285
1.09E+01	3.07E-01	8.99E-04	0.306710319
1.10E+01	3.10E-01	4.67E-03	0.309573074
1.11E+01	3.12E-01	4.18E-03	0.312330989
1.11E+01	3.14E-01	-3.72E-05	0.313673002
1.12E+01	3.12E-01	5.12E-04	0.311909221
1.13E+01	3.15E-01	4.00E-03	0.31483516
1.14E+01	3.16E-01	7.92E-04	0.315800693
1.15E+01	3.14E-01	3.44E-03	0.313623062
1.15E+01	3.19E-01	1.05E-03	0.318571827
1.16E+01	3.17E-01	2.84E-03	0.316726933
1.17E+01	3.21E-01	2.43E-04	0.321190892
1.18E+01	3.18E-01	2.82E-03	0.318270493
1.19E+01	3.22E-01	1.08E-03	0.322406716
1.19E+01	3.23E-01	1.11E-03	0.323182111
1.20E+01	3.24E-01	3.64E-03	0.323854572
1.21E+01	3.27E-01	3.15E-03	0.326754507
1.22E+01	3.29E-01	1.03E-03	0.329029717
1.23E+01	3.29E-01	2.14E-03	0.328538273
1.24E+01	3.29E-01	2.90E-03	0.329167002
1.24E+01	3.31E-01	3.80E-03	0.331038142
1.25E+01	3.30E-01	6.16E-04	0.330422374
1.26E+01	3.33E-01	2.04E-03	0.333305464
1.27E+01	3.36E-01	2.97E-03	0.336389722
1.28E+01	3.38E-01	3.22E-03	0.338231822
1.29E+01	3.41E-01	1.89E-03	0.341244444
1.30E+01	3.40E-01	1.09E-03	0.340250531
1.31E+01	3.45E-01	1.52E-03	0.344904531
1.32E+01	3.44E-01	1.85E-03	0.344258862
1.32E+01	3.46E-01	2.99E-03	0.346315127
1.33E+01	3.50E-01	1.73E-03	0.350220461
1.34E+01	3.53E-01	2.04E-03	0.353152472
1.35E+01	3.56E-01	3.28E-03	0.356287683
1.36E+01	3.56E-01	2.26E-03	0.355680676
1.37E+01	3.62E-01	2.64E-03	0.362088392
1.38E+01	3.62E-01	4.38E-03	0.361877858
1.39E+01	3.63E-01	1.03E-03	0.363443573
1.40E+01	3.67E-01	3.23E-03	0.367371714
1.41E+01	3.69E-01	2.68E-03	0.369444286
1.42E+01	3.78E-01	3.16E-03	0.378171496
1.43E+01	3.77E-01	4.78E-03	0.376936903
1.44E+01	3.84E-01	1.45E-04	0.383516227

1.45E+01	3.85E-01	-9.45E-04	0.385489959
1.46E+01	3.89E-01	6.46E-03	0.38937741
1.47E+01	3.94E-01	4.50E-03	0.394273731
1.48E+01	3.99E-01	-9.20E-04	0.399386359
1.49E+01	4.01E-01	1.26E-03	0.401023369
1.50E+01	4.08E-01	1.51E-03	0.407963605
1.51E+01	4.15E-01	3.32E-03	0.415264645
1.52E+01	4.22E-01	2.66E-03	0.421641901
1.53E+01	4.27E-01	3.36E-04	0.426611132
1.54E+01	4.36E-01	4.58E-03	0.435920063
1.55E+01	4.37E-01	-8.38E-04	0.437375304
1.56E+01	4.44E-01	1.42E-03	0.444122681
1.57E+01	4.54E-01	1.20E-03	0.454485396
1.58E+01	4.67E-01	2.67E-05	0.467157201
1.60E+01	4.74E-01	-6.34E-04	0.474002724
1.61E+01	4.84E-01	-6.61E-04	0.484417151
1.62E+01	4.99E-01	-2.95E-03	0.499149012
1.63E+01	5.12E-01	-3.49E-03	0.51158581
1.64E+01	5.25E-01	-5.44E-03	0.52489121
1.65E+01	5.42E-01	-4.18E-03	0.542368105
1.66E+01	5.60E-01	-1.09E-02	0.560340238
1.67E+01	5.81E-01	-1.00E-02	0.581165524
1.69E+01	6.05E-01	-1.26E-02	0.604764019
1.70E+01	6.30E-01	-1.48E-02	0.629940819
1.71E+01	6.59E-01	-2.03E-02	0.659621507
1.72E+01	6.91E-01	-2.99E-02	0.691621642
1.73E+01	7.33E-01	-3.75E-02	0.733583324
1.75E+01	7.86E-01	-3.67E-02	0.786698247
1.76E+01	8.28E-01	-6.11E-02	0.830040502
1.77E+01	9.05E-01	-9.40E-02	0.909419394
1.78E+01	9.90E-01	-1.20E-01	0.997391898
1.79E+01	1.09E+00	-1.83E-01	1.102765166
1.81E+01	1.20E+00	-2.90E-01	1.239065624
1.82E+01	1.37E+00	-4.83E-01	1.453961353
1.83E+01	1.51E+00	-7.22E-01	1.670109277
1.85E+01	1.58E+00	-1.10E+00	1.921550711
1.86E+01	1.52E+00	-1.59E+00	2.19829218
1.87E+01	1.16E+00	-2.29E+00	2.562094563
1.88E+01	4.13E-01	-2.78E+00	2.814829704
1.90E+01	-6.99E-01	-2.89E+00	2.9688861
1.91E+01	-2.07E+00	-1.98E+00	2.864530868
1.92E+01	-2.37E+00	-6.00E-01	2.444400301
1.94E+01	-1.31E+00	6.93E-01	1.485329599
1.95E+01	-2.91E-01	4.37E-01	0.525224122
1.96E+01	-1.62E-01	-3.27E-01	0.364800462
1.98E+01	-7.98E-01	-1.24E-01	0.807178453

1.99E+01	-3.70E-01	2.85E-01	0.466694436
2.00E+01	-2.46E-01	-2.00E-01	0.317101348
2.02E+01	-3.44E-01	1.48E-01	0.374073584
2.03E+01	-1.17E-01	-1.23E-01	0.169715685
2.05E+01	-2.58E-01	7.54E-02	0.268331081
2.06E+01	-1.06E-01	-9.69E-02	0.143874127
2.07E+01	-1.44E-01	4.92E-02	0.152345429
2.09E+01	-1.58E-01	-1.83E-02	0.159544057
2.10E+01	-5.99E-02	-5.38E-02	0.08055042
2.12E+01	-8.04E-02	1.69E-02	0.082215432
2.13E+01	-7.86E-02	1.58E-02	0.080142259
2.15E+01	-7.44E-02	-1.31E-02	0.07558131
2.16E+01	-3.34E-02	-3.51E-02	0.048473978
2.18E+01	-1.48E-02	-3.11E-02	0.034396058
2.19E+01	-3.62E-03	-2.75E-02	0.027782127
2.21E+01	-1.13E-03	-2.38E-02	0.023830955
2.22E+01	3.26E-03	-2.26E-02	0.022809074
2.24E+01	9.96E-03	-2.44E-02	0.026380843
2.25E+01	1.55E-02	-1.63E-02	0.022456588
2.27E+01	2.45E-02	-7.24E-03	0.025531927
2.29E+01	3.62E-02	-2.66E-03	0.036318453
2.30E+01	4.14E-02	-2.01E-02	0.045987406
2.32E+01	4.36E-02	-1.09E-02	0.044889329
2.33E+01	5.14E-02	4.11E-04	0.051400339
2.35E+01	5.49E-02	-9.77E-03	0.055810188
2.37E+01	6.09E-02	-6.54E-04	0.060896708
2.38E+01	6.61E-02	-5.68E-03	0.066358843
2.40E+01	6.65E-02	-6.74E-03	0.066825658
2.42E+01	7.68E-02	-9.34E-03	0.077391383
2.43E+01	8.02E-02	1.86E-04	0.080182866
2.45E+01	8.04E-02	-1.81E-03	0.080389146
2.47E+01	8.61E-02	-7.82E-03	0.086414611
2.48E+01	9.15E-02	-4.75E-03	0.091662983
2.50E+01	9.47E-02	-2.84E-03	0.094694656
2.52E+01	9.39E-02	-4.81E-03	0.09405724
2.54E+01	1.01E-01	-8.93E-04	0.101497628
2.55E+01	1.02E-01	-5.64E-03	0.101995059
2.57E+01	1.05E-01	-5.66E-03	0.10487721
2.59E+01	1.05E-01	-8.12E-03	0.105656111
2.61E+01	1.12E-01	2.33E-04	0.111511243
2.62E+01	1.12E-01	-3.15E-03	0.11160968
2.64E+01	1.15E-01	1.35E-03	0.11532225
2.66E+01	1.18E-01	-6.29E-04	0.117836877
2.68E+01	1.18E-01	-5.57E-03	0.118366951
2.70E+01	1.22E-01	-3.74E-03	0.121987706
2.72E+01	1.21E-01	-1.14E-03	0.121267023

2.74E+01	1.26E-01	-4.23E-03	0.126376136
2.75E+01	1.29E-01	1.14E-03	0.12908799
2.77E+01	1.32E-01	-5.81E-03	0.13182084
2.79E+01	1.32E-01	-2.63E-03	0.132055447
2.81E+01	1.32E-01	-1.30E-04	0.131594764
2.83E+01	1.36E-01	-1.03E-03	0.136458185
2.85E+01	1.35E-01	1.33E-04	0.135187565
2.87E+01	1.40E-01	-6.57E-04	0.140366939
2.89E+01	1.37E-01	-2.78E-03	0.13697268
2.91E+01	1.38E-01	2.42E-03	0.138279614
2.93E+01	1.41E-01	-2.54E-03	0.141458792
2.95E+01	1.41E-01	-1.69E-04	0.140784501
2.97E+01	1.42E-01	-1.36E-03	0.14199774
2.99E+01	1.47E-01	-2.36E-03	0.146683735
3.01E+01	1.46E-01	2.26E-03	0.145653261
3.03E+01	1.48E-01	5.05E-05	0.147664909
3.05E+01	1.46E-01	-1.12E-03	0.146402655
3.08E+01	1.52E-01	-5.51E-03	0.151847012
3.10E+01	1.48E-01	8.81E-04	0.148136119
3.12E+01	1.52E-01	-5.37E-03	0.15209777
3.14E+01	1.53E-01	-1.69E-03	0.152596376
3.16E+01	1.52E-01	-2.29E-03	0.152153678
3.18E+01	1.56E-01	-1.04E-03	0.155924988
3.21E+01	1.55E-01	3.64E-04	0.155269026
3.23E+01	1.57E-01	-1.23E-04	0.157421148
3.25E+01	1.60E-01	7.04E-05	0.159729216
3.27E+01	1.58E-01	1.92E-03	0.158119284
3.30E+01	1.60E-01	3.26E-04	0.160133232
3.32E+01	1.60E-01	1.90E-03	0.159748848
3.34E+01	1.62E-01	4.39E-04	0.161609796
3.37E+01	1.57E-01	5.64E-04	0.157427511
3.39E+01	1.60E-01	-3.78E-03	0.160235882
3.41E+01	1.64E-01	1.84E-03	0.16356583
3.44E+01	1.66E-01	-5.29E-04	0.166095341
3.46E+01	1.64E-01	-8.42E-04	0.164460858
3.48E+01	1.63E-01	1.54E-03	0.163143537
3.51E+01	1.68E-01	-1.29E-03	0.167717433
3.53E+01	1.63E-01	-2.57E-03	0.163269165
3.56E+01	1.67E-01	1.44E-03	0.166986829
3.58E+01	1.66E-01	-5.67E-04	0.166006068
3.61E+01	1.67E-01	8.99E-04	0.166655023
3.63E+01	1.67E-01	-5.91E-04	0.167162043
3.66E+01	1.70E-01	-1.34E-03	0.170350559
3.68E+01	1.68E-01	-1.61E-03	0.168377072
3.71E+01	1.70E-01	-3.41E-03	0.169817696
3.73E+01	1.74E-01	1.50E-04	0.174098565

3.76E+01	1.74E-01	2.94E-03	0.174336371
3.78E+01	1.69E-01	-3.85E-03	0.169101957
3.81E+01	1.71E-01	-4.41E-03	0.171093137
3.84E+01	1.73E-01	-2.71E-03	0.173208863
3.86E+01	1.70E-01	7.90E-04	0.170029436
3.89E+01	1.76E-01	-3.09E-04	0.175638373
3.92E+01	1.74E-01	8.08E-04	0.174021974
3.94E+01	1.72E-01	-3.51E-04	0.172109457
3.97E+01	1.80E-01	2.12E-03	0.180440514
4.00E+01	1.72E-01	9.09E-04	0.172199402
4.03E+01	1.73E-01	-3.86E-03	0.172776068
4.06E+01	1.67E-01	-4.86E-03	0.166975818
4.08E+01	1.81E-01	3.07E-03	0.181096964
4.11E+01	1.74E-01	1.56E-03	0.174238449
4.14E+01	1.83E-01	-1.72E-03	0.183460958
4.17E+01	1.77E-01	-4.80E-03	0.176868068
4.20E+01	1.83E-01	-1.48E-03	0.183180872
4.23E+01	1.75E-01	8.60E-04	0.174660717
4.26E+01	1.72E-01	1.41E-03	0.171992548
4.29E+01	1.81E-01	-4.77E-03	0.180946288
4.32E+01	1.71E-01	5.66E-03	0.171364082
4.35E+01	1.75E-01	-3.49E-03	0.174907026
4.38E+01	1.91E-01	-3.98E-03	0.191316228
4.41E+01	1.82E-01	7.66E-04	0.181517814
4.44E+01	1.84E-01	-6.25E-03	0.184256766
4.47E+01	1.90E-01	-4.09E-03	0.189763776
4.50E+01	1.80E-01	-1.50E-04	0.179589863
4.53E+01	1.86E-01	-4.87E-03	0.18604257
4.56E+01	1.86E-01	2.70E-03	0.186455633
4.59E+01	1.84E-01	-6.61E-03	0.183644905
4.62E+01	1.85E-01	-2.19E-03	0.184878073
4.66E+01	1.82E-01	9.27E-04	0.182022063
4.69E+01	1.89E-01	1.69E-03	0.18949784
4.72E+01	1.93E-01	2.14E-03	0.193038523
4.75E+01	1.89E-01	-3.35E-05	0.188783003
4.79E+01	1.94E-01	-4.97E-03	0.193760172
4.82E+01	1.85E-01	6.33E-03	0.185519283
4.85E+01	1.91E-01	3.14E-03	0.190562099
4.89E+01	1.82E-01	7.16E-03	0.182609595
4.92E+01	1.87E-01	3.22E-03	0.187313293
4.95E+01	1.99E-01	-3.15E-03	0.199436026
4.99E+01	1.88E-01	1.31E-03	0.188049296
5.02E+01	1.90E-01	5.64E-04	0.190149336
5.06E+01	1.84E-01	-1.99E-03	0.183743256
5.09E+01	1.88E-01	8.84E-03	0.188479519
5.13E+01	1.86E-01	6.16E-03	0.186249647

5.16E+01	1.92E-01	-1.54E-03	0.192154883
5.20E+01	1.97E-01	-7.84E-03	0.197372211
5.24E+01	1.98E-01	-2.71E-03	0.198389814
5.27E+01	1.97E-01	9.22E-03	0.196972036
5.31E+01	1.92E-01	-2.77E-03	0.192068932
5.35E+01	1.90E-01	-1.76E-03	0.190258195
5.38E+01	1.98E-01	-7.73E-03	0.197651957
5.42E+01	1.95E-01	-3.58E-03	0.195457766
5.46E+01	1.89E-01	-7.13E-03	0.189505197
5.50E+01	1.92E-01	-3.16E-03	0.191756046
5.53E+01	2.06E-01	8.86E-03	0.20618756
5.57E+01	2.04E-01	4.29E-04	0.203811252
5.61E+01	2.06E-01	2.97E-03	0.20647467
5.65E+01	1.93E-01	-6.91E-03	0.192883339
5.69E+01	2.00E-01	-6.44E-03	0.200095661
5.73E+01	2.09E-01	4.70E-04	0.209065228
5.77E+01	2.00E-01	-5.53E-03	0.200061126
5.81E+01	1.78E-01	-1.03E-02	0.178219011
5.85E+01	1.95E-01	-7.20E-03	0.19538664
5.89E+01	2.06E-01	-4.93E-03	0.206476551
5.93E+01	1.95E-01	-9.12E-03	0.195600465
5.97E+01	2.11E-01	-6.30E-03	0.211422472
6.01E+01	2.00E-01	1.10E-04	0.19988983
6.05E+01	2.04E-01	1.04E-03	0.204433766
6.10E+01	2.03E-01	5.44E-03	0.202758764
6.14E+01	2.10E-01	-7.12E-04	0.210272506
6.18E+01	2.08E-01	-1.08E-02	0.208585571
6.22E+01	2.05E-01	1.51E-03	0.204529394
6.27E+01	2.03E-01	-7.40E-03	0.203236037
6.31E+01	2.04E-01	-3.92E-03	0.203721299
6.35E+01	1.93E-01	9.56E-03	0.193497532
6.40E+01	1.95E-01	-1.39E-03	0.195473618
6.44E+01	1.90E-01	4.57E-03	0.189764208
6.49E+01	1.96E-01	-7.84E-03	0.19574634
6.53E+01	2.13E-01	-1.04E-02	0.213333177
6.58E+01	1.86E-01	-6.10E-03	0.185761159
6.62E+01	2.02E-01	-1.20E-02	0.202266069
6.67E+01	1.96E-01	8.81E-03	0.196537623
6.71E+01	2.12E-01	5.28E-03	0.212152886
6.76E+01	1.91E-01	6.06E-03	0.19065929
6.81E+01	2.14E-01	-8.99E-03	0.2145247
6.85E+01	2.21E-01	-5.76E-03	0.221288524
6.90E+01	2.06E-01	6.27E-04	0.206158653
6.95E+01	2.07E-01	-1.27E-02	0.207650921
7.00E+01	2.04E-01	2.88E-03	0.203932801
7.05E+01	2.16E-01	4.15E-03	0.216359013

7.10E+01	1.85E-01	-3.47E-03	0.185229076
7.14E+01	2.22E-01	5.62E-03	0.221874753
7.19E+01	2.40E-01	-7.65E-03	0.239968058
7.24E+01	2.19E-01	-2.45E-03	0.218919334
7.29E+01	2.39E-01	-4.62E-03	0.238596708
7.35E+01	2.05E-01	2.48E-03	0.204691734
7.40E+01	2.12E-01	8.28E-03	0.212426369
7.45E+01	2.03E-01	5.16E-03	0.203018261
7.50E+01	2.18E-01	-7.39E-03	0.218395436
7.55E+01	2.30E-01	-4.59E-03	0.230477218
7.60E+01	2.24E-01	-6.09E-03	0.224122697
7.66E+01	2.03E-01	-3.52E-03	0.202565231
7.71E+01	2.14E-01	2.58E-03	0.214084818
7.76E+01	2.18E-01	-4.16E-03	0.217903831
7.82E+01	2.14E-01	1.08E-02	0.214117348
7.87E+01	2.42E-01	1.77E-03	0.241760195
7.93E+01	2.24E-01	7.46E-03	0.223677777
7.98E+01	2.32E-01	-7.55E-03	0.232484376
8.04E+01	2.22E-01	-2.38E-03	0.222387592
8.09E+01	2.48E-01	-7.12E-03	0.24778282
8.15E+01	2.28E-01	-1.21E-03	0.227541806
8.20E+01	2.25E-01	2.96E-03	0.224803192
8.26E+01	2.30E-01	2.04E-03	0.229954817
8.32E+01	2.25E-01	9.60E-03	0.224720664
8.38E+01	2.38E-01	-4.10E-03	0.237892814
8.43E+01	2.31E-01	-7.63E-04	0.231304658
8.49E+01	2.35E-01	4.06E-03	0.234640063
8.55E+01	2.41E-01	-1.01E-02	0.241062134
8.61E+01	2.32E-01	-1.33E-04	0.231638138
8.67E+01	2.27E-01	-8.08E-03	0.227005398
8.73E+01	2.38E-01	1.55E-03	0.237917136
8.79E+01	2.45E-01	-8.88E-04	0.244648211
8.85E+01	2.34E-01	-3.54E-03	0.233862664
8.91E+01	2.56E-01	-8.33E-03	0.256538931
8.97E+01	2.50E-01	6.63E-03	0.249746085
9.04E+01	2.61E-01	-6.54E-03	0.260994657
9.10E+01	2.42E-01	5.12E-03	0.24213503
9.16E+01	2.70E-01	1.37E-03	0.269579265
9.23E+01	2.58E-01	-7.01E-04	0.257796854
9.29E+01	2.59E-01	-1.14E-02	0.259232864
9.35E+01	2.53E-01	-1.32E-02	0.253782807
9.42E+01	2.88E-01	-6.54E-03	0.288185427
9.48E+01	2.70E-01	-5.34E-03	0.27018712
9.55E+01	2.74E-01	-1.54E-03	0.273938632
9.62E+01	2.83E-01	-7.68E-03	0.282995568
9.68E+01	2.84E-01	-1.69E-03	0.283922442

9.75E+01	3.01E-01	-5.36E-03	0.301336728
9.82E+01	3.03E-01	-5.82E-03	0.303271217
9.89E+01	3.18E-01	-3.85E-03	0.318123654
9.95E+01	3.12E-01	-1.02E-02	0.311997479
1.00E+02	3.30E-01	-7.69E-03	0.330459746
1.01E+02	3.41E-01	-5.70E-03	0.34061583
1.02E+02	3.51E-01	-1.14E-02	0.351295202
1.02E+02	3.54E-01	-1.30E-02	0.354069125
1.03E+02	3.84E-01	-1.34E-02	0.384188699
1.04E+02	3.86E-01	-1.05E-02	0.38635303
1.04E+02	4.04E-01	-2.85E-02	0.404803295
1.05E+02	4.35E-01	-2.84E-02	0.435496459
1.06E+02	4.79E-01	-2.92E-02	0.480241315
1.07E+02	5.30E-01	-6.20E-02	0.533501154
1.07E+02	6.00E-01	-5.26E-02	0.602266563
1.08E+02	6.79E-01	-1.20E-01	0.689823994
1.09E+02	8.27E-01	-1.84E-01	0.847121424
1.10E+02	1.01E+00	-3.87E-01	1.080051253
1.10E+02	1.26E+00	-8.06E-01	1.497382161
1.11E+02	1.06E+00	-1.83E+00	2.110659602
1.12E+02	-9.83E-01	-2.41E+00	2.599407912
1.13E+02	-1.71E+00	2.27E-01	1.725000109
1.14E+02	-3.08E-01	-2.66E-01	0.406501157
1.14E+02	-2.24E-01	-1.99E-02	0.224781065
1.15E+02	-1.83E-01	-4.19E-02	0.187407887
1.16E+02	-1.50E-01	-7.34E-02	0.167161089
1.17E+02	-1.08E-01	-3.36E-02	0.113160766
1.17E+02	-8.14E-02	-2.38E-02	0.084861849
1.18E+02	-5.80E-02	-2.26E-02	0.062250386
1.19E+02	-3.88E-02	7.72E-03	0.03961001
1.20E+02	-2.04E-02	1.89E-04	0.020356235
1.21E+02	1.03E-02	-5.38E-03	0.011608563
1.22E+02	-7.11E-03	-1.97E-02	0.020921418
1.22E+02	5.44E-02	-1.06E-02	0.05545861
1.23E+02	3.99E-02	-1.35E-03	0.039952604
1.24E+02	5.50E-02	-1.47E-02	0.056936179
1.25E+02	7.11E-02	6.25E-03	0.071388527
1.26E+02	7.53E-02	5.39E-03	0.075474089
1.27E+02	7.46E-02	-3.77E-03	0.074677222
1.28E+02	6.19E-02	-2.27E-02	0.065892888
1.29E+02	8.02E-02	6.26E-03	0.080428317
1.29E+02	9.25E-02	-2.53E-03	0.092507286
1.30E+02	1.01E-01	-9.74E-04	0.101244489
1.31E+02	8.79E-02	-1.37E-02	0.088929264
1.32E+02	1.17E-01	-1.83E-03	0.117068572
1.33E+02	1.01E-01	4.73E-03	0.100734204

1.34E+02	1.02E-01	-1.30E-02	0.10288564
1.35E+02	1.22E-01	-1.42E-02	0.123114105
1.36E+02	1.23E-01	1.23E-03	0.122788416
1.37E+02	1.14E-01	1.10E-02	0.114641232
1.38E+02	1.12E-01	-1.22E-02	0.112940133
1.39E+02	1.12E-01	-6.68E-03	0.112127222
1.40E+02	1.24E-01	6.27E-03	0.124567602
1.41E+02	1.26E-01	-9.82E-04	0.125695435
1.42E+02	1.28E-01	5.90E-03	0.128387022
1.43E+02	1.29E-01	6.31E-03	0.128699731
1.44E+02	1.25E-01	3.26E-03	0.125224975
1.45E+02	1.38E-01	1.45E-02	0.138683309
1.46E+02	1.46E-01	1.30E-02	0.146885451
1.47E+02	1.24E-01	4.83E-03	0.123952123
1.48E+02	1.46E-01	-1.43E-02	0.147107855
1.49E+02	1.55E-01	-2.20E-03	0.155402435
1.50E+02	1.47E-01	-2.82E-03	0.147156397
1.51E+02	1.39E-01	-1.71E-02	0.140274645
1.52E+02	1.39E-01	9.06E-03	0.138969452
1.53E+02	1.50E-01	-3.03E-03	0.149900127
1.54E+02	1.32E-01	8.24E-03	0.132517006
1.55E+02	1.54E-01	-1.10E-03	0.154021996
1.56E+02	1.54E-01	1.15E-02	0.154259119
1.57E+02	1.53E-01	-1.44E-02	0.153278618
1.58E+02	1.52E-01	1.03E-02	0.151862877
1.59E+02	1.50E-01	-5.91E-03	0.150423414
1.60E+02	1.59E-01	-1.10E-02	0.159089356
1.61E+02	1.64E-01	-1.66E-02	0.164839536
1.63E+02	1.48E-01	-2.11E-03	0.14827998
1.64E+02	1.77E-01	-1.31E-02	0.177180293
1.65E+02	1.56E-01	5.32E-03	0.155863636
1.66E+02	1.67E-01	1.14E-04	0.166552139
1.67E+02	1.62E-01	-4.49E-03	0.161747524
1.68E+02	1.54E-01	-5.31E-03	0.154488749
1.69E+02	1.59E-01	-1.19E-02	0.159340917
1.71E+02	1.65E-01	-4.53E-03	0.164856935
1.72E+02	1.51E-01	-3.93E-03	0.150699133
1.73E+02	1.65E-01	-7.24E-03	0.165269868
1.74E+02	1.61E-01	-6.75E-03	0.161180914
1.75E+02	1.78E-01	3.95E-03	0.178186461
1.77E+02	1.68E-01	7.33E-03	0.168113724
1.78E+02	1.67E-01	-1.84E-03	0.166627744
1.79E+02	1.65E-01	9.28E-03	0.165745878
1.80E+02	1.75E-01	-2.83E-04	0.175408228
1.82E+02	1.66E-01	1.40E-02	0.166859882
1.83E+02	1.66E-01	-1.68E-03	0.166358887

1.84E+02	1.73E-01	-4.49E-03	0.173178257
1.85E+02	1.80E-01	5.35E-04	0.179880995
1.87E+02	1.95E-01	1.21E-02	0.195402625
1.88E+02	1.85E-01	-2.62E-03	0.184861823
1.89E+02	1.79E-01	7.35E-03	0.179463931
1.91E+02	1.78E-01	-4.04E-04	0.178042758
1.92E+02	2.05E-01	7.08E-03	0.204710747
1.93E+02	1.86E-01	7.19E-03	0.185905903
1.95E+02	1.96E-01	1.18E-02	0.196120842
1.96E+02	1.84E-01	-5.89E-03	0.18400385
1.97E+02	1.92E-01	-6.81E-03	0.191652338
1.99E+02	1.85E-01	-9.41E-04	0.1845868
2.00E+02	1.95E-01	-1.87E-03	0.195037737
2.01E+02	1.93E-01	-3.21E-03	0.193459466
2.03E+02	1.78E-01	-1.89E-03	0.178133923
2.04E+02	1.98E-01	-9.06E-03	0.198463283
2.06E+02	1.90E-01	7.92E-04	0.190096451
2.07E+02	2.18E-01	1.38E-02	0.218629602
2.08E+02	2.08E-01	-1.47E-02	0.208437078
2.10E+02	2.04E-01	-7.69E-03	0.2037894
2.11E+02	1.89E-01	3.92E-03	0.188650661
2.13E+02	2.07E-01	-4.27E-03	0.207349747
2.14E+02	2.11E-01	-1.56E-02	0.211094972
2.16E+02	1.92E-01	7.36E-03	0.191734124
2.17E+02	2.01E-01	-4.40E-03	0.201361608
2.19E+02	2.24E-01	-1.35E-02	0.223910762
2.20E+02	2.16E-01	-9.06E-03	0.215728276
2.22E+02	2.10E-01	-1.04E-02	0.209785285
2.23E+02	2.13E-01	-1.43E-02	0.212989142
2.25E+02	2.01E-01	1.56E-02	0.201470981
2.26E+02	2.31E-01	-1.08E-02	0.231542782
2.28E+02	2.33E-01	-3.05E-03	0.232539384
2.30E+02	2.17E-01	1.22E-03	0.21690124
2.31E+02	2.20E-01	7.37E-03	0.220500494
2.33E+02	2.24E-01	7.76E-03	0.223832085
2.34E+02	2.33E-01	-5.70E-03	0.233395655
2.36E+02	2.16E-01	-3.34E-03	0.215842649
2.38E+02	2.21E-01	2.49E-03	0.220610598
2.39E+02	2.32E-01	1.77E-03	0.232386932
2.41E+02	2.30E-01	8.71E-03	0.230208086
2.43E+02	2.35E-01	-7.15E-03	0.234699633
2.44E+02	2.41E-01	-1.09E-02	0.241272342
2.46E+02	2.39E-01	-1.22E-02	0.239786548
2.48E+02	2.44E-01	-2.50E-02	0.24514338
2.49E+02	2.52E-01	-1.16E-02	0.252418352
2.51E+02	2.52E-01	-4.26E-03	0.251914639

2.53E+02	2.53E-01	8.76E-03	0.253283268
2.55E+02	2.56E-01	-1.79E-02	0.256606215
2.56E+02	2.74E-01	3.95E-03	0.274299374
2.58E+02	2.69E-01	-2.53E-03	0.268581561
2.60E+02	2.59E-01	-1.65E-02	0.259836805
2.62E+02	2.86E-01	-1.95E-02	0.286846342
2.64E+02	2.76E-01	-1.72E-02	0.276365746
2.65E+02	2.81E-01	-1.58E-02	0.281606437
2.67E+02	2.98E-01	-2.56E-02	0.299493485
2.69E+02	3.08E-01	-6.98E-04	0.307652591
2.71E+02	2.90E-01	-8.88E-03	0.289950169
2.73E+02	3.07E-01	-8.43E-03	0.307117719
2.75E+02	3.20E-01	4.55E-03	0.320444123
2.77E+02	3.52E-01	-4.71E-03	0.352054065
2.79E+02	3.43E-01	-1.65E-02	0.343447628
2.81E+02	3.49E-01	-4.33E-03	0.349048956
2.82E+02	3.81E-01	-2.54E-02	0.381707506
2.84E+02	3.88E-01	-1.24E-02	0.388129279
2.86E+02	4.24E-01	-6.37E-03	0.423738265
2.88E+02	4.22E-01	-5.23E-02	0.424742926
2.90E+02	4.68E-01	-4.21E-02	0.470113563
2.92E+02	5.11E-01	-4.10E-02	0.51309329
2.94E+02	5.57E-01	-9.34E-02	0.565076666
2.96E+02	5.88E-01	-1.49E-01	0.606971568
2.99E+02	7.09E-01	-1.51E-01	0.724645853
3.01E+02	7.54E-01	-2.93E-01	0.808697788
3.03E+02	8.30E-01	-4.80E-01	0.959020677
3.05E+02	7.97E-01	-7.45E-01	1.090631062
3.07E+02	5.20E-01	-9.55E-01	1.08728383
3.09E+02	2.06E-01	-9.65E-01	0.986390778
3.11E+02	2.83E-02	-8.32E-01	0.83225391
3.13E+02	-1.44E-01	-6.55E-01	0.670533154
3.16E+02	-1.16E-01	-5.29E-01	0.541360757
3.18E+02	-1.81E-01	-4.18E-01	0.455761615
3.20E+02	-9.91E-02	-4.16E-01	0.427833383
3.22E+02	-3.18E-02	-3.88E-01	0.389285995
3.24E+02	-1.10E-01	-3.40E-01	0.35775888
3.27E+02	-9.76E-02	-3.36E-01	0.350143958
3.29E+02	-1.10E-01	-3.27E-01	0.345059208
3.31E+02	-1.15E-01	-3.04E-01	0.325285038
3.33E+02	-1.66E-01	-2.41E-01	0.29231829
3.36E+02	-1.68E-01	-2.18E-01	0.275092506
3.38E+02	-1.39E-01	-1.88E-01	0.233459061
3.40E+02	-1.72E-01	-8.68E-02	0.192668162
3.43E+02	-1.46E-01	-9.14E-02	0.172157595
3.45E+02	-1.12E-01	-7.53E-02	0.135047332

3.48E+02	-6.59E-02	-8.02E-02	0.103802437
3.50E+02	-6.12E-02	-5.27E-02	0.080726656
3.52E+02	-4.87E-02	1.03E-02	0.049808038
3.55E+02	-4.08E-02	-2.96E-02	0.050437454
3.57E+02	-5.14E-04	-4.64E-02	0.046385837
3.60E+02	-3.89E-04	-2.55E-02	0.025520785
3.62E+02	4.29E-03	-2.19E-02	0.022284059
3.65E+02	1.33E-02	-2.47E-02	0.028042257
3.67E+02	3.52E-02	-8.28E-04	0.035201125
3.70E+02	3.32E-02	-4.33E-03	0.033443663
3.72E+02	4.07E-02	-1.71E-02	0.044096682
3.75E+02	4.24E-02	-2.09E-02	0.047250692
3.78E+02	5.85E-02	-1.79E-02	0.061206785
3.80E+02	4.64E-02	-8.58E-03	0.047185183
3.83E+02	4.83E-02	-1.38E-02	0.05028431
3.85E+02	6.81E-02	4.20E-03	0.0682496
3.88E+02	6.97E-02	-1.07E-02	0.070556425
3.91E+02	6.17E-02	-8.85E-03	0.062366213
3.94E+02	7.86E-02	-2.58E-02	0.082778417
3.96E+02	9.70E-02	-1.36E-02	0.097979684
3.99E+02	8.70E-02	-2.91E-02	0.091728205
4.02E+02	1.06E-01	-7.87E-03	0.106002782
4.05E+02	9.86E-02	-1.50E-02	0.099707791
4.07E+02	9.38E-02	-1.09E-02	0.094420107
4.10E+02	1.07E-01	-1.31E-02	0.107855126
4.13E+02	1.09E-01	-4.71E-02	0.118909394
4.16E+02	1.20E-01	1.92E-02	0.121542751
4.19E+02	1.11E-01	5.96E-03	0.111377116
4.22E+02	1.34E-01	3.94E-03	0.133696959
4.25E+02	1.28E-01	-1.00E-02	0.127958383
4.28E+02	1.28E-01	5.92E-03	0.128592464
4.31E+02	1.32E-01	-3.27E-02	0.13617472
4.34E+02	1.27E-01	-2.42E-02	0.128928696
4.37E+02	1.36E-01	1.59E-02	0.136815575
4.40E+02	1.51E-01	-2.99E-02	0.153488154
4.43E+02	1.56E-01	-3.20E-02	0.15928151
4.46E+02	1.54E-01	-4.08E-03	0.154529414
4.49E+02	1.64E-01	-2.40E-02	0.165321009
4.52E+02	1.63E-01	-9.89E-03	0.163178559
4.55E+02	1.50E-01	-4.33E-03	0.150015868
4.58E+02	1.60E-01	1.27E-02	0.160078914
4.61E+02	1.85E-01	-3.71E-02	0.188465665
4.65E+02	1.67E-01	-2.66E-02	0.169383833
4.68E+02	1.91E-01	8.47E-03	0.190935595
4.71E+02	1.77E-01	-1.56E-02	0.177727168
4.74E+02	1.91E-01	1.02E-03	0.191451015

4.78E+02	1.91E-01	-4.25E-02	0.195276633
4.81E+02	2.02E-01	-9.32E-04	0.202252948
4.84E+02	2.01E-01	-2.68E-02	0.203014926
4.88E+02	2.10E-01	-7.98E-03	0.21027375
4.91E+02	2.16E-01	-1.58E-02	0.21641423
4.94E+02	2.19E-01	-2.90E-03	0.218995333
4.98E+02	2.13E-01	-3.40E-02	0.215691398
5.01E+02	2.22E-01	-1.36E-02	0.22224049
5.05E+02	2.14E-01	-3.75E-02	0.217494463
5.08E+02	2.34E-01	-6.11E-02	0.241998042
5.12E+02	2.24E-01	-8.52E-03	0.224498429
5.15E+02	2.35E-01	-6.33E-03	0.235159394
5.19E+02	2.37E-01	-3.71E-02	0.239423488
5.22E+02	2.63E-01	-1.99E-02	0.263733146
5.26E+02	2.76E-01	-1.46E-02	0.276476268
5.30E+02	2.93E-01	-2.04E-03	0.293343266
5.33E+02	3.12E-01	-1.67E-02	0.312305075
5.37E+02	3.26E-01	-4.78E-02	0.329064579
5.41E+02	3.63E-01	-1.78E-02	0.363425195
5.45E+02	3.90E-01	-3.12E-04	0.389841625
5.48E+02	4.27E-01	-3.35E-02	0.428683524
5.52E+02	4.83E-01	-4.87E-02	0.485005015
5.56E+02	5.56E-01	-6.08E-02	0.559297549
5.60E+02	6.38E-01	-8.89E-02	0.64373043
5.64E+02	7.45E-01	-1.45E-01	0.75900398
5.68E+02	9.27E-01	-2.32E-01	0.955884052
5.71E+02	1.21E+00	-4.81E-01	1.297841649
5.75E+02	1.58E+00	-1.22E+00	2.002159906
5.79E+02	2.29E-01	-3.01E+00	3.015655698
5.83E+02	-1.67E+00	-1.35E+00	2.148235455
5.87E+02	-1.04E+00	-5.60E-01	1.179460689
5.92E+02	-7.12E-01	-2.45E-01	0.752505799
5.96E+02	-5.53E-01	-1.43E-01	0.571163604
6.00E+02	-4.31E-01	-4.78E-02	0.433820538
6.04E+02	-3.27E-01	-7.35E-02	0.334951392
6.08E+02	-2.61E-01	-2.38E-02	0.261661778
6.12E+02	-2.27E-01	-3.34E-02	0.229811421
6.17E+02	-1.90E-01	-3.67E-02	0.193456892
6.21E+02	-1.50E-01	2.12E-02	0.151454523
6.25E+02	-1.05E-01	-5.45E-02	0.118712312
6.30E+02	-1.16E-01	-1.14E-02	0.116869056
6.34E+02	-7.81E-02	6.61E-03	0.07834966
6.38E+02	-7.21E-02	-1.73E-02	0.07416403
6.43E+02	-3.91E-02	-3.46E-02	0.052207594
6.47E+02	-4.15E-02	-1.90E-02	0.045616641
6.52E+02	2.28E-03	-5.20E-02	0.05209838

6.56E+02	-1.73E-02	-3.70E-02	0.040889884
6.61E+02	9.58E-03	-3.36E-02	0.034973299
6.65E+02	2.98E-02	-1.15E-02	0.031912222
6.70E+02	-7.06E-04	-4.18E-02	0.041812979
6.75E+02	2.79E-02	-2.81E-03	0.028080231
6.79E+02	1.38E-02	-3.08E-02	0.033709567
6.84E+02	2.24E-02	-2.19E-02	0.031327605
6.89E+02	5.44E-02	-3.44E-02	0.064405214
6.93E+02	3.29E-02	-3.81E-02	0.050318028
6.98E+02	5.31E-02	-1.35E-02	0.05477459
7.03E+02	4.95E-02	-4.69E-02	0.06821183
7.08E+02	6.07E-02	-8.79E-03	0.061296951
7.13E+02	3.90E-03	3.33E-02	0.03353645
7.18E+02	9.04E-02	-4.55E-03	0.090481605
7.23E+02	9.03E-02	1.35E-02	0.091336856
7.28E+02	7.09E-02	-5.54E-02	0.089963444
7.33E+02	1.10E-01	-2.80E-03	0.110295361
7.38E+02	7.08E-02	-6.36E-02	0.095115286
7.43E+02	8.19E-02	-3.91E-02	0.090755512
7.48E+02	8.74E-02	-5.64E-02	0.104021896
7.53E+02	9.76E-02	-8.88E-03	0.097965351
7.59E+02	1.13E-01	-2.56E-02	0.116266608
7.64E+02	6.24E-02	-8.96E-02	0.109214136
7.69E+02	9.34E-02	-4.46E-02	0.103502214
7.74E+02	1.20E-01	-7.26E-02	0.140098924
7.80E+02	1.24E-01	-3.74E-02	0.129471815
7.85E+02	9.67E-02	-1.64E-02	0.098042173
7.91E+02	1.25E-01	-3.08E-02	0.128682983
7.96E+02	1.37E-01	-1.78E-02	0.13821064
8.02E+02	1.29E-01	1.49E-02	0.129499463
8.07E+02	1.47E-01	1.27E-02	0.147632005
8.13E+02	1.70E-01	-1.06E-02	0.17022615
8.18E+02	1.77E-01	-5.71E-03	0.176837357
8.24E+02	1.75E-01	1.50E-02	0.175953713
8.30E+02	1.88E-01	-5.09E-02	0.19522134
8.36E+02	2.01E-01	-3.59E-02	0.203965128
8.41E+02	2.38E-01	-4.59E-02	0.24190438
8.47E+02	2.46E-01	-3.17E-02	0.248152776
8.53E+02	2.60E-01	-9.58E-02	0.276749097
8.59E+02	2.57E-01	-1.03E-01	0.276624788
8.65E+02	2.89E-01	-9.02E-02	0.302855215
8.71E+02	2.80E-01	-1.31E-01	0.309002555
8.77E+02	3.06E-01	-1.21E-01	0.329512644
8.83E+02	2.92E-01	-1.27E-01	0.318312817
8.89E+02	3.08E-01	-1.07E-01	0.326116926
8.95E+02	3.27E-01	-1.22E-01	0.349108797

9.02E+02	3.59E-01	-1.59E-01	0.392582743
9.08E+02	4.16E-01	-2.24E-01	0.472645315
9.14E+02	4.64E-01	-3.06E-01	0.556106494
9.20E+02	4.72E-01	-3.55E-01	0.590570733
9.27E+02	4.66E-01	-6.22E-01	0.776788781
9.33E+02	3.80E-01	-7.88E-01	0.874769618
9.40E+02	-1.38E-01	-8.39E-01	0.850573961
9.46E+02	-2.52E-01	-6.52E-01	0.69902354
9.53E+02	-2.96E-01	-4.86E-01	0.569079001
9.59E+02	-3.19E-01	-2.74E-01	0.420348207
9.66E+02	-2.73E-01	-1.69E-01	0.320874508
9.73E+02	-1.84E-01	-1.41E-01	0.231754565
9.79E+02	-1.44E-01	-1.34E-01	0.19649745
9.86E+02	-9.52E-02	-8.85E-02	0.129996154
9.93E+02	-8.09E-02	-4.70E-02	0.093563382
1.00E+03	-4.90E-02	-1.04E-01	0.115196424