

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**METAL DIŞ YÜZLÜ SANDVIÇ KİRİŞ MALZEME ÖZELLİKLERİNİN
TİTREŞİM TESTİ İLE BELİRLENMESİ**

Raphig ALIEV

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ağustos 2024

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**METAL DIŞ YÜZLÜ SANDVIÇ KİRİŞ MALZEME ÖZELLİKLERİNİN
TİTREŞİM TESTİ İLE BELİRLENMESİ**

Raphig ALIEV

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ağustos 2024

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METAL DIŞ YÜZLÜ SANDVIÇ KİRİŞ MALZEME ÖZELLİKLERİNİN
TİTREŞİM TESTİ İLE BELİRLENMESİ**

Raphig ALIEV

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ağustos 2024
ANTALYA**

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METAL DIŞ YÜZLÜ SANDVIÇ KİRİŞ MALZEME ÖZELLİKLERİNİN
TİTREŞİM TESTİ İLE BELİRLENMESİ**

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 04/08/2024... tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof.Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ (Danışman)

Prof.Dr. Okan ÖZCAN

Dr.Öğr.Üyesi Yağmur KOPRAMAN

ÖZET

METAL DIŞ YÜZLÜ SANDVIÇ KİRİŞ MALZEME ÖZELLİKLERİNİN TİTREŞİM TESTİ İLE BELİRLENMESİ

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

Ağustos 2024; 30 sayfa

Bu çalışmada, metal dış yüzlü sandviç kirişlerin malzeme parametrelerinin belirlenmesi için bir titreşim testi yapılmıştır. Bu tip rijit köpük çekirdekli kirişlerde sünme sebebiyle statik testlerden genellikle iyi netice alınamaması ve numuneye hasar vermemek için bu yola gidilmiştir. Düşük maliyetli dijital bir ivme ölçer kullanılarak galvanizli sac dış yüzlere sahip sandviç kiriş numuneleri test edilmiştir. Sandviç kiriş dış yüzü üstte kalacak şekilde testler yapılarak çekirdek malzeme kayma modülü belirlenmiştir. Elde edilen deneysel neticeler bir sonlu elemanlar paket programı ile elde edilmiş olan sayısal neticeler ile mukayese edilmiş ve deneysel ve sayısal neticeler arasında iyi bir uyum olduğu belirlenmiştir.

Elde edilen neticeler deneysel çalışmada kullanılmış olan düşük maliyetli ivmeölçerin yeterli hassasiyette netice verdiğini göstermektedir. Ayrıca, galvanizli sac dış yüzlü sandviç kiriş eğilme ve kayma rijitliklerinin hesaptan elde edilen değerler ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: İvmeölçer, Rijitlik, Sandviç Kiriş, Titreşim Testi.

JÜRİ: Prof.Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

Prof.Dr. Okan ÖZCAN

Dr.Öğr.Üyesi Yağmur KOPRAMAN

ABSTRACT

DETERMINATION OF THE MATERIAL PROPERTIES OF SANDWICH BEAMS HAVING METAL FACES BY VIBRATION TEST

Raphig ALIEV

MSc. Thesis in Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

August 2024; 30 pages

In this study, a vibration test is conducted to obtain the material properties of sandwich beams having galvanized steel faces. The main reason of making use of this test is that, favorable results cannot be obtained by the static bending test due to creep deformations for this type of sandwich beams. A low-cost MEMS type accelerometer is used for testing. Vibration tests are conducted on sandwich beam specimens and the bending rigidities are determined. The experimental results obtained are compared with the numerical results obtained using a finite element software package and it is determined that the numerical results are in very good agreement with the experimental results.

The results obtained in this study shows that the use of the low cost accelerometer selected yields very accurate results. Also, it is observed that, the bending and shear rigidities calculated are in good agreement with the experimentally obtained ones in previous studies.

KEYWORDS: Accelerometer, Rigidity, Sandwich Beam, Vibration Test.

COMMITTEE: Prof.Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

Prof.Dr. Okan ÖZCAN

Asst.Prof.Dr. Yağmur KOPRAMAN

ÖNSÖZ

Desteęi ve yardımını için danışmanım Prof. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ, İnş. Müh. Böl. yüksek lisans öğrencileri Tuęçe SARGIN, Umut HEKİM, İsmail Selçuk YILMAZ ve yüksek lisans eğitimim boyunca yanımda olan aileme teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
AKADEMİK BEYAN	v
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	4
3. MATERYAL VE METOT	7
3.1. Kullanılan Malzemeler	7
3.1.1. Köpük Malzemenin Özellikleri	7
3.1.2. Galvanizli Sac Özellikleri.....	8
3.1.3. Poliüretan Yapıştırıcı Özellikleri.....	8
3.2. Numune İmalatı	9
3.3. Sonlu Elemanlar Modeli.....	10
3.4. Titreşim Deney Düzeneği.....	13
3.5. FFT Analizi	15
3.5. Sönüm Oranının Belirlenmesi	15
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	18
4.1. Sayısal Neticeler.....	18
4.2. Titreşim Deneyleri.....	18
5. SONUÇLAR	22
5. KAYNAKLAR	24
6. EKLER.....	26
6.1. EK-1: Arduino Kodu	26
6.2. EK-2: FFT Kodu	29
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Kompozit Dış Yüzlü Sandviç Kiriş Eğilme Ve Kayma Rijitliklerinin Titreşim Testi İle Belirlenmesi”adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

Tarih 04/08/2024

Raphig ALIEV

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

N	: Newton
E	: Elastisite Modülü
L	: Numune Uzunluğu
t_f	: Dış yüz kalınlığı
h_c	: Çekirdek kalınlığı
ρ	: Yoğunluk
X	: Basınç Dayanımı
G	: Kayma Modülü
S	: Kayma Dayanımı
m, c, k	: kütle, sönüm ve rijitlik
ξ	: sönüm oranı
X_n	: n tepe noktası sayısı olmak üzere genlik
ω_n	: sönümsüz açısal frekans
ω_d	: sönümlü açısal fekans
f_n	: sönümsüz frekans
f_d	: sönümlü fekans

Kısaltmalar

FFT	: Fast Fourier Transform
XPS	: Extruded polystrene
MPa	: Mega Pascal (N/mm ²)
PU	: Poliüretan
°C	: Santigrat Derece

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Örnek bir panel geometrisi	1
Şekil 1.2. Rijit köpük çekirdekli sandviç kiriş gerilme dağılımı	2
Şekil 3.1. XPS numune parlak yüzü mikroskop görüntüsü (2.2mm × 2.9mm).....	8
Şekil 3.2. Kullanılan poliüretan tutkal ve sertleştirici komponenti	8
Şekil 3.3. Çözüm ağının oluşturulması	10
Şekil 3.4. Sac malzeme özellikleri.....	11
Şekil 3.5. Sac dış yüzün kiriş elemanı olarak tasarlanması	11
Şekil 3.6. İvme ölçerin ağırlık olarak tanımlanması	12
Şekil 3.7. XPS için malzeme özelliklerinin tanımlanması.....	12
Şekil 3.8. XPS'in membran olarak tanımlanması	13
Şekil 3.9. Titreşim deney düzeneği.....	13
Şekil 3.10. ADXL345 dijital ivmeölçer	14
Şekil 3.11. Arduino Uno R3 marka mikrodenetleyici kartı	14
Şekil 3.12. Tek serbestlik dereceli titreşim problemi	15
Şekil 3.13. Sönümlü sistemde tepe noktaları	16
Şekil 4.1. Sandviç kiriş için 1. titreşim mod şekli	18
Şekil 4.2. Sandviç kiriş için 1. titreşim mod şekli (2. model)	18
Şekil 4.3. Numune-1 için deneysel neticeler ve FFT neticesi	19
Şekil 4.4. Numune-2 için deneysel neticeler ve FFT neticesi	19
Şekil 4.5. Numune-3 için deneysel neticeler ve FFT neticesi	20

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Polistren köpük malzemesinin mekanik özellikleri.....	7
Çizelge 3.2. Kullanılan tutkal malzemesinin teknik özellikleri.....	9
Çizelge 3.3. Numune özellikleri	9
Çizelge 4.1. Elde edilen deneysel ve sayısal neticeler.....	20



1. GİRİŞ

Sandviç yapıların en büyük avantajları düşük ağırlıkta rijitlik ve yüksek dayanım sağlamalarıdır. 1960'lı yıllardan önce, sandviç teknolojisi neredeyse tamamen havacılık uygulamalarıyla sınırlı kalmıştı. 1960'lara gelindiğinde artan sayıda kullanım alanları keşfedilmiş ve sandviç paneller soğuk hava depolarında, prefabrik yapılarda, otomobil ve gemi inşa endüstrilerinde kullanılmaya başlanmıştır.

Sandviç panel yapılarda, genellikle çekirdeği çevreleyen iki yüz görünüş ve mukavemet yönünden benzer özelliklere sahip malzemelerle kaplanır. Ayrıca, sandviç yapının birçok alternatif biçimi farklı yüz ve çekirdek malzemeleri birleştirilerek elde edilebilir. Kaplamalar çelik, alüminyum, ahşap, fiber takviyeli plastik hatta plastik olabilir. Çekirdek mantar, balsa ahşabı, kauçuk, katı plastik malzeme (polietilen), sert köpük malzeme, mineral yünü döşeme levhaları veya metal peteklerden hatta kağıttan yapılabilir. Bunlar, poliüretan veya polistiren çekirdekli panel, metal veya kağıt petek çekirdekli panel, ve mineral yün çekirdekli paneldir. Sandviç paneller genellikle duvar veya çatı elamanlarının hem iç hem de dış yüzeyinde düz veya profilli metal olarak kullanılırlar, bunlar uygun izolasyon, sertlik ve nispeten düşük mukavemetli çekirdek özelliklerine sahiptirler. Bu sandviç bileşenleri birbirine yapıştırılmalıdır. Bu yapıştırma işlemi, köpürtme işlemi sırasında, yapıştırıcılar kullanılarak ya da mekanik bağlantı elamanları ile yapılabilir. Dış yüzler alüminyum, çelik, kontrplak yonga levha veya cam takviyeli plastik olabilir; bkz. Şekil 1.1.



Şekil 1.1. Örnek bir panel geometrisi

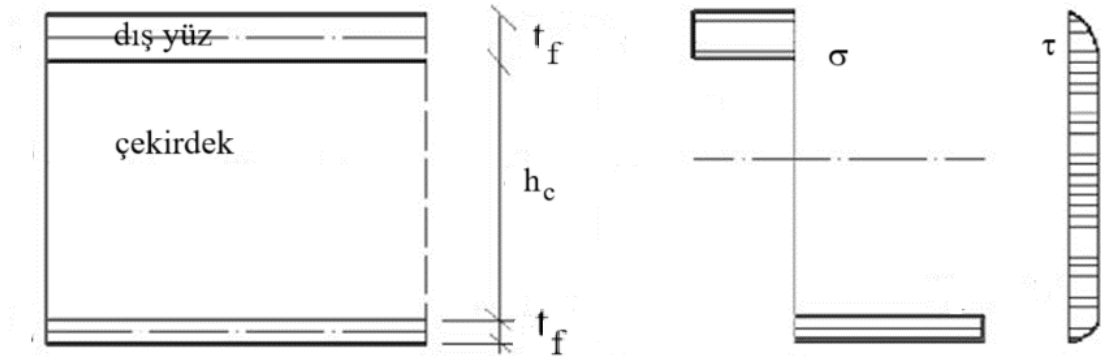
İnşaat uygulamalarında sandviç panellerin kullanımında son zamanlardaki büyük artışın neredeyse tamamen köpük çekirdek kullanımına bağlıdır. Genellikle poliüretan köpük tercih edilmektedir. Bu tür köpükler, sıvı halde bileşenin belirli katalizörler ile karıştırılmasıyla ve köpürtülmesiyle elde edilir. Ancak, çekirdek olarak kullanılan rijit köpükler, imalat tekniğine bağlı olarak, anizotrop yapıdadırlar. Bu yüzden yapısal analizlerinin yeterli hassasiyette yapılabilmesi için çok sayıda malzeme parametresinin belirlenmesi gerekir. Bu parametrelerin içinde en önemlisinin çekirdek kayma modülü olduğu söylenebilir.

Bu çalışmada düz metal yüzü ve rijit köpük çekirdekli sandviç kiriş malzeme özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi veya verilen parametrelerin kontrolü amaçlanmıştır. Rijit köpük çekirdekli sandviç kirişlerde sünme sebebiyle statik deneylerden genellikle iyi netice alınamaması ve numuneye hasar vermemek için kiriş titreşim deneyi yapılması yoluna gidilmiştir.

Kiriş titreşim deneyi, kiriş rijitliğini ve dolaylı olarak malzeme parametrelerini belirlemede sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Titreşim deneyleri ile ilgili standartlar, ASTM E 1876 ve ASTM E 756 belgelerinde tanımlanmıştır. Bu standartlar, basit mesnetli kiriş titreşim deneylerini ve konsol kiriş titreşim deneylerini kapsamaktadır. Bu çalışmada, mesnet teşkilinin nispeten kolay olması nedeniyle basit mesnetli kiriş yerine konsol kiriş titreşim deneyinin yapılmasına karar verilmiştir.

Öncelikle basit bir titreşim deney düzeneği oluşturulmuştur ve MEMS tipi düşük maliyetli dijital bir ivmeölçer ile elde edilmiş olan zaman-ivme verileri üzerinde FFT analizleri yapılarak numuneler için temel titreşim frekansları elde edilmiştir.

Deneysel çalışmada sandviç kiriş dış yüzü üstte kalacak şekilde mesnetlenmiş numuneler üzerinde titreşim deneyleri yapılmış ve deney neticeleri kullanılarak malzeme parametrelerinin belirlenmesi konusu irdelenmiştir. Deneysel olarak elde edilmiş olan kayma rijitliği değeri kullanılarak rijit köpük çekirdek için önemli bir malzeme özelliği olan kayma modülü elde edilmiştir. Burada kiriş kalınlığı boyunca kayma gerilmesi dağılımının sabit olduğu varsayımı yapılmıştır. Köpük çekirdek kayma modülünün dış yüz kayma modülünden çok düşük olması sebebiyle yapılan bu varsayım kabul edilebilirdir. Aşağıda Şekil 1.2’de rijit köpük çekirdekli bir sandviç kiriş için normal ve kayma gerilme dağılımları şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1.2. Rijit köpük çekirdekli sandviç kiriş gerilme dağılımı

Şekil 1.2’den görülebileceği üzere, kayma gerilmesi dağılımı kalınlık boyunca sabittir. Elbette bu durum sadece çok düşük kayma modülüne sahip çekirdek malzemelerinde görülebilir. Farklı çekirdek malzemeleri için daha parabolik bir dağılım beklenir.

Elde edilen deneysel neticeler bir sonlu elemanlar paket programı ile elde edilmiş olan sayısal neticeler ile mukayese edilmiş ve deneysel ve sayısal neticeler arasındaki uyum incelenmiştir.

Sandviç kiriş titreşim deneyi için yapılan düzlem modelde dış yüz kiriş sonlu elemanları ile, çekirdek ise membran sonlu elemanları ile modellenmiştir. Sayısal neticeler çözüm ağı sıklığı farklı iki sonlu elemanlar modeli kullanılarak elde edilmiştir. Bahse konu sandviç kiriş genişliklerinin yeteri kadar büyük olmasından dolayı temel titreşim mod şeklinin sadece eğilme şeklinde olması veya başka bir deyişle burulma-eğilme şeklinde olmaması sebebiyle düzlem model kullanılmasının hataya sebebiyet vermeyeceği değerlendirilmiştir.

Son olarak, elde edilen deneysel ve sayısal neticeler mukayese edilerek sunulmuş ve deneysel çalışmada karşılaşılan mesnetleme ile alakalı zorluklar üzerinde durulmuştur.

Kullanılan programlar da ek olarak sunulmuştur.



2. KAYNAK TARAMASI

Literatürde bu çalışmada incelenen kiriş titreşim deneyi ile ilgili aşağıda özetlenmiş olan bazı çalışmalar bulunmaktadır.

Hyer vd. (1978), sınır şartlarının etkisini inceleyerek, ankastre ucun tam olarak tutulu olmaması durumunda elde edilen sonuçların kayda değer oranda hata içerebileceğini belirtmiş ve bu nedenle mesnetlenmeye özellikle dikkat edilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Ayrıca, mesnetlerde bir miktar sıkışma olacağından, mesnetleme sırasında numune kalınlık değişiminin de takip edilmesi gerektiği ifade edilmiştir.

Sokolinsky vd. (2004), yumuşak polimer çekirdekli sandviç kirişlerin titreşim davranışlarını incelemiş ve konsol kiriş titreşim deneylerinden elde ettikleri sonuçların, analitik ve sayısal sonuçlarla uyumlu olduğunu ve sönümün hesaplarda göz önünde bulundurulması gerektiğini bildirmişlerdir. Ayrıca, klasik sandviç teorisi ile elde edilen doğal frekansların ciddi nispette hata içerdiği ve bu yüzden yüksek mertebeden bir teorisinin kullanılmasının daha uygun olacağı bildirilmiştir.

Rizos vd. (1990), konsol kiriş testi ile kirişlerde çatlak konum ve derinliğinin belirlemek için kiriş titreşim testinden faydalanmışlardır. Geliştirilen basit tahribatsız muayene tekniği ile çatlak ilerlemesinin gözlemlenebileceği bildirilmiştir.

Benzer bir çalışmada Baba ve Thoppul (2009), titreşim deneyleri ile düz ve eğri sandviç kirişlerde dış yüz-çekirdek adezyon kaybının kiriş rijitliğine etkisini belirlemek için kiriş titreşim deneyleri yapmışlar ve ayrışmaya bağlı olarak kiriş doğal titreşim frekansının düştüğünü belirlemişlerdir. Ayrıca, adezyon kaybı sebebiyle sürtünmenin artmasına bağlı olarak sönüm oranının arttığını da göstermişlerdir. Neticeler kiriş 4 nokta eğilme deneyleri ile mukayese edilmiştir.

Son yıllarda, düşük maliyetli (MEMS tipi) ivmeölçerler titreşim testlerinde kullanılmaya başlanmıştır. Varanis vd. (2018) metal kiriş ve çerçevelerin titreşim parametrelerini elde etmek için bu tür ivmeölçerler kullanmış ve sayısal/analitik sonuçlarla uyumlu deneysel veriler elde etmişlerdir.

Varanis (2016) MEMS tipi ivmeölçerin yanı sıra bir ultrasonik mesafe ölçer ve bir dijital jiroskop da kullanmıştır. Bu çalışmada veri toplama için düşük maliyetli bir mikrodenetleyici kart kullanılmıştır. Metal kirişler için elde edilen doğal frekanslar analitik ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile elde edilmiş sayısal neticeler ile mukayese edilmiştir. Varanis (2016) tarafından sunulan neticeler ultrasonik mesafe ölçer ile dijital ivmeölçer ile elde edilen hassasiyete çok yakın neticeler elde edilebildiğini göstermiş ve ultrasonik mesafe ölçerin numuneye temas etmemesinden dolayı ivmeölçerden daha iyi bir ölçüm alternatifi olduğunu bildirilmiştir. Ancak, ultrasonik mesafe ölçer için örnekleme frekansının sadece 248 Hz olmasından dolayı ivmeölçerin ölçüm için daha uygun bir alternatif olduğu söylenebilir. Bu nedenle bu tez çalışmasında sadece ivmeölçer kullanılmıştır. Varanis (2016) infrared sensörlerin de temassız kiriş titreşim deneylerinde veri elde etmekte kullanılabileceğini bildirmiştir. Ancak, literatürde bu konuda bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Toledo vd. (2021) yapı sağlık izleme sistemlerinde dijital ivmeölçerlerin kullanımını incelemişlerdir. Elde ettikleri neticeler dijital ivmeölçerler ile numune doğal frekanlarının yeterli hassasiyette ölçülebildiğini göstermiştir. Toledo vd. (2001) dijital ölçüm sisteminin maliyetinin nklasik ölçüm sistemi maliyetinin 1/100'ü kadar olduğunu bildirmişlerdir.

Albarbar vd. (2009), MEMS tipi bir ivmeölçerin performansını incelemiş ve düşük maliyetli ivmeölçerler ile yüksek maliyetli ivmeölçerlerden elde edilen frekans tepe değerlerine çok yakın sonuçlar elde edilebileceğini göstermiştir.

Abarcar ve Cunniff (1972) lifli kompozit ince kirişler üzerinde titreşim deneyleri yaparak ilgili malzeme parametrelerini belirlemişlerdir. Deneyde, konsol kiriş numunesi kiriş mesnetine uygulanan ve frekansı hassas bir şekilde ayarlanabilen sinüzoidal bir yük fonksiyonu ile harmonik harekete zorlanmıştır. Bu sırada kiriş üzerine yapıştırılmış gerinim pulları vasıtasıyla ölçülen normal gerilmedeki artış gözlemlenerek doğal bir frekansa ulaşıldığı belirlenmiştir.

Guan vd. (2016) ince ahşap kompozit kirişlerin düzlem içi kayma modüllerinin belirlenmesi için bir konsol kiriş titreşim deney düzeneği geliştirmişlerdir. Düzenekte ivmeölçer yerine bir lazer sensörü kullanılmıştır. Bu sayede ivmeölçer kütlelerinin etkisini hesaba katmaya gerek kalmamıştır. Hesaplarda sönüm oranı da hesaba katılmış ve bu maksatla Logaritmik Azalma Yöntemi kullanılmıştır. Sonuç olarak titreşim deneyinin kayma modülünü elde etmekte kullanılabileceği bildirilmiştir.

Yoshihara (2011) MDF kirişlerde düzlem içi kayma modülü değerini belirlemek için bir kiriş titreşim deneyi önermiştir. Deney düzeneğinde titreşim mod şekillerini göz önünde bulundurarak, belli noktalardan asılmış kirişler bir çekiç ile tahrik edilmiştir. Titreşimler ivmeölçer yerine bir mikrofon kullanılarak kaydedilmiş ve FFT algoritması kullanılarak değerlendirilmiştir. Yoshihara (2011) numune narinliğinin artışı ile ölçülen kayma modülü değerindeki hatanın arttığını göstermiş ve yeteri kadar hassas netice elde edebilmek için numune uzunluk/kalınlık oranının 7.5'den düşük olması gerektiğini bildirmiştir.

MEMS tipi ivmeölçer kullanılarak yapılan bir çalışmada, Çağdaş ve Aliyev (2020), metal yüzü sandviç konsol kiriş titreşim deneyleri ile elde ettikleri deneysel sonuçları kayma deformasyonlu kiriş elemanları kullanılarak oluşturulan sonlu elemanlar modeli ile karşılaştırmış ve artan numune uzunluğuyla sönüm oranının azaldığını belirlemişlerdir. Bu çalışmada rijit köpük çekirdekli sandviç kirişlerde ankastre mesnet oluşturulamamasının elde edilen deneysel neticelerde bir miktar hata oluşmasına sebebiyet verdiği belirlenmiştir.

Taskin vd. (2022) sandviç kiriş çekirdek malzeme kayma modülünün belirlenmesi için modifiye edilmiş bir 3 ray kayma deneyi ile elde edilen neticelerin konsol kiriş titreşim deneyleri ile edilmiş neticeler ile uyumlu olduklarını göstermişlerdir. Bununla beraber, anizotrop malzeme için kayma modüllerinin tamamının elde edilmesinin kiriş titreşim deneyi ile elde edilemeyeceği de bildirilmiştir.

Cagdas ve Saeedi (2022) konsol kiriş titreşim deneyleri ile ham ve cam elyafı ile güçlendirilmiş MDF kirişler üzerinde titreşim ve 3 nokta eğilme deneyleri yapmış ve elde

ettikleri neticeleri mukayese etmişlerdir. Ancak, Cagdas ve Saeedi (2022), burada değinilmiş çalışmaların aksine, konsol kiriş titreşim deneyinin ankastre sınır şartının tam olarak sağlanamaması sebebiyle MDF malzeme kayma modülü belirlemek için uygun olmadığını bildirmişlerdir. Bu yüzden, sandviç kiriş çekirdek malzemesinin düşük kayma rijitliğine sahip olması halinde konsol kiriş titreşim deneyinin iyi netice vereceği söylenebilir. Ayrıca, düşük dayanımlı çekirdek malzemelerinde oluşan ani sünmeden dolayı statik deneylerin iyi netice vermeyebileceği de göz önünde bulundurulmalıdır.



3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde öncelikle kullanılan malzeme özellikleri verilmiştir. Daha sonra deneysel çalışma ve ilgili sayısal ve analitik yöntemler kısaca açıklanmıştır.

3.1. Kullanılan Malzemeler

Deneysel çalışmada kullanılan malzeme özellikleri aşağıdaki alt bölümlerde verilmiştir.

3.1.1. Köpük Malzemenin Özellikleri

Seçilen Wallboard marka rijit köpük malzeme için mekanik özellikler Çizelge 3.1’de verilmiştir; bkz. Yıldırım (2019).

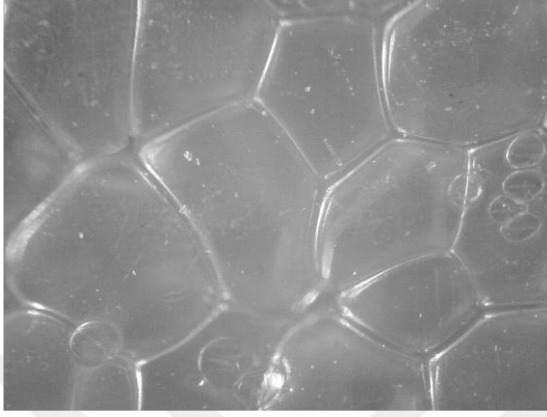
Çizelge 3.1. Polistren köpük malzemesinin mekanik özellikleri

Mekanik Özellik	Tanım	Değer
ρ (kg/m ³)	Yoğunluk	23.40
E_1^{XPS} (MPa)	1 (köpük yükselme) yönündeki elastisite modülü	6.33
E_2^{XPS} (MPa)	2 yönündeki elastisite modülü	4.41
E_3^{XPS} (MPa)	3 yönündeki elastisite modülü	2.40
$X_{C,1}^{XPS}$ (MPa)	1 yönündeki basınç dayanımı	0.19
$X_{C,2}^{XPS}$ (MPa)	2 yönündeki basınç dayanımı	0.11
$X_{C,3}^{XPS}$ (MPa)	3 yönündeki basınç dayanımı	0.07
G_{12}^{XPS} (MPa)	1-2 düzlemi için kayma modülü	4.32
G_{23}^{XPS} (MPa)	2-3 düzlemi için kayma modülü	3.31
S_{12}^{XPS} (MPa)	1-2 düzlemi için kayma dayanımı	0.16
S_{23}^{XPS} (MPa)	2-3 düzlemi için kayma dayanımı	0.10

Şekil 3.1’de ise dijital mikroskop ile çekilmiş rijit köpük (XPS) parlak yüzü fotoğrafı gösterilmektedir. Kesim sırasında hücre duvarlarının parçalanması sebebiyle parlak olmayan (kesilmiş) yüzlerdeki hücrelerin fotoğrafının çekilememiştir. Şekil 3.1’den görülebileceği üzere XPS ince cidarlı hücrelerden oluşan bir malzemedir. Şekilde net olarak görülemese de hücre duvarlarının kabarma doğrultusundaki boyları buna dik doğrultudaki hücre duvarı boylarından daha kısadır. Bundan dolayı, imalat sırasında yükselme-kabarma doğrultusundaki (foam rise direction) dayanım ve elastisite modülü değeri buna dik doğrultulardaki değerlerden daha büyüktür (seçilen malzeme için her ikisi de yaklaşık 2 misli).

Rijit köpük malzemenin önemli bir özelliği de bütün doğrultulardaki çekme dayanımlarının basma dayanımlarından yüksek olmasıdır. Bunun sebebi basıncın hücre duvarlarında burkulmaya sebep olmasıdır. Ayrıca, numune kayma gerilmeleri

altındayken basınç altında kalan hücre duvarlarında burkulma olacaktır. Bu yüzden kayma ve elastisite modülleri arasında homojen izotrop malzemelerde olduğu gibi bir bağıntı bulunmamaktadır.



Şekil 3.1. XPS numune parlak yüzü mikroskop görüntüsü (boyutlar 2.2mm × 2.9mm)

3.1.2. Galvanizli Sac Özellikleri

Galvanizli sac için mekanik özellikler;

$$E_{\text{ç}} = 2 \times 10^5 \text{MPa}, \nu_{\text{ç}} = 0.3,$$

olarak kabul edilmiştir. Burada, $E_{\text{ç}}$ ve $\nu_{\text{ç}}$ sırasıyla Elastisite Modülü ve Poisson oranını simgeler.

3.1.3. Poliüretan Yapıştırıcı Özellikleri

Kullanılan poliüretan bazlı iki parçalı yapıştırıcının üretici firma tarafından verilmiş olan özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir; bkz. Şekil 3.2.



Şekil 3.2. Kullanılan Poliüretan tutkal ve sertleştirici komponenti

Çizelge 3.2. Kullanılan tutkal malzemesinin teknik özellikleri

Sertlik	75-80
Malzeme Yapısı	Çift bileşenli poliüretan reçine ve sertleştirici
Bağlayıcı Madde	Poliüretan reçine
Yoğunluk	Ana malzeme 1.60 gr/cm ³ / sertleştirici 1.22 gr/cm ³
Karışım Oranı	6/1 kg ağırlıkça
Uygulama Süresi (23 °C) de	30 Dakika
Katılma Başlangıcı	25 °C /+40 °C ısısında 45. dakika
Isı dayanıklılığı	-40 °C/+280 °C
Kürünü Tamamlama (20 °C)	5-7 saat
Sağlığa uygunluk	Sağlığa zararlı değildir
UV Işınlara	UV dayanıklıdır

3.2. Numune İmalatı

Kiriş uzunluğu $L=700$ mm, kiriş genişliği $b=50$ mm, çekirdek yüksekliği $h_c=50$ mm, dış yüz kalınlığı $t_f=0.7$ mm olarak alınmıştır. Dış yüzler daha önceden kesilen XPS köpük çekirdeğe Mikrokim marka poliüretan yapıştırıcı kullanılarak oda sıcaklığında yapıştırılmıştır. Deneyler yapılmadan önce poliüretan bazlı yapıştırıcının kimyasal dayanımına tam olarak ulaşmasını sağlamak için 2 hafta kadar beklenmiştir. İmal edilen numunelerin ağırlıkları sırasıyla 463 gr, 466 gr, ve 468 gr olarak ölçülmüştür; bkz. Çizelge 3.3.

Çizelge 3.3. Numune özellikleri

Numune	Ağırlık (gr)	Uzunluk L (mm)	Kalınlık t_f (mm)
1	463	700	0,7
2	466	700	0,7
3	468	700	0,7

3.3. Sonlu Elemanlar Modeli

Sap2000 paket programı kullanılarak dış yüz için bir ucu ankastre kiriş için düzlem sonlu elemanlar modeli yapılmıştır. Sandviç kiriş numune uzunluğu $L=500$ mm, çekirdek kalınlığı $h_c=50$ mm, dış yüz kalınlığı: $t_f=0.7$ mm (altta ve üstte olmak üzere) olarak alınmıştır. Düzlem modelde kullanılan malzeme özellikleri ise şöyle alınmıştır;

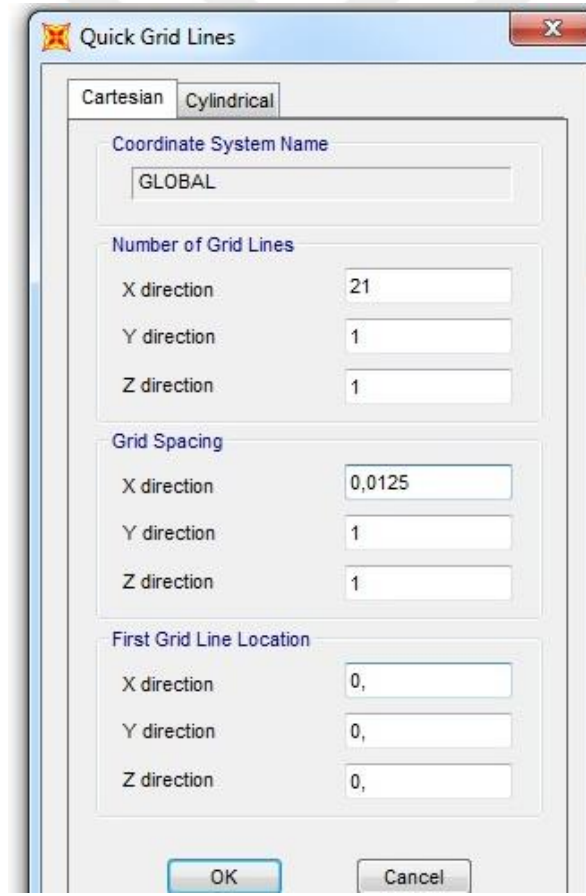
XPS için

$E_1=6.33$ Mpa, $E_2=4.41$ Mpa, $E_3=2.4$ Mpa, $G_{12}=4.32$ Mpa, $G_{13}=4.0$ Mpa, $G_{23}=3.31$ Mpa,

Sac için

$E=200000$ MPa, $G=76293.08$ Mpa.

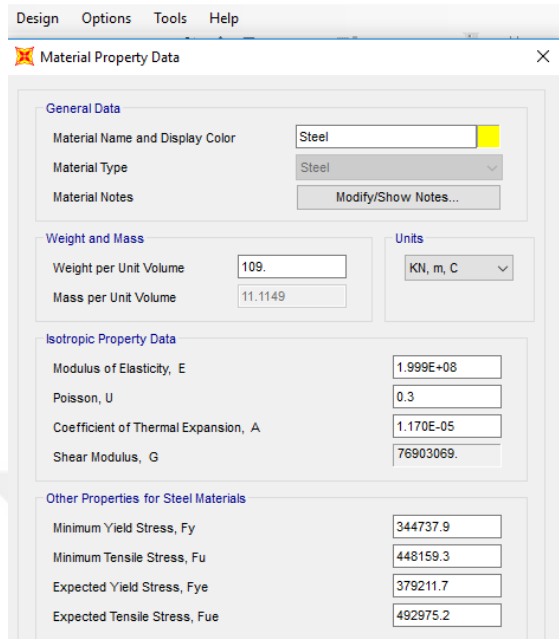
İlk önce Sap2000 programında “New Model” sekmesinde “Grid Only” kısmında çözüm ağı özellikleri oluşturulmuş ve kiriş, X doğrultusunda 20 parçaya bölünmüştür; bkz Şekil 3.3.



Şekil 3.3. Çözüm ağının oluşturulması

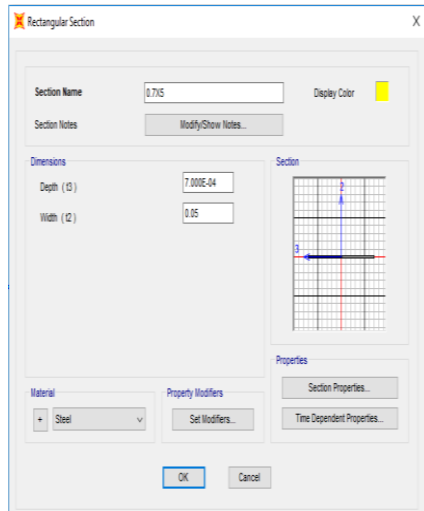
Galvanizli çelik sac malzeme özelliklerini girmek için “Define” menüsünden sırasıyla Materials; Add New Materials seçilir. Açılan pencerede Region için User

Material Type için ise Steel seçilip OK a basınca Material Property Data penceresi açılır. Bu pencere verilen malzeme özellikleri tanımlanır; bkz Şekil 3.4.



Şekil 3.4. Sac malzeme özellikleri

Kesiti tanımlamak için Define menüsünden Section Properties ; Frame Sections; Frame Properties; Add New Property komutlarını seçilir. Açılan pencereden Steel malzemesi ve rectangular tipi seçerek kesit özellikleri tanımlanır; bkz Şekil 3.5.



Şekil 3.5. Sac dış yüzün kiriş elemanı olarak tasarlanması

Daha sonra ivme ölçer ağırlığı (yapıştırıcı ile beraber yaklaşık 2 gr.) modele ilave edilmiştir. Bunun için Assign menüsünden Joint Loads seçilir buradan modelin uç noktası seçilerek Gravity yönüne 2 gr lık ivme ölçer ağırlığı tanımlanır; Bkz Şekil 3.6.

Assign Joint Forces

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X: 0 N

Force Global Y: 0 N

Force Global Z: -0.01964 N

Moment about Global X: 0 N-mm

Moment about Global Y: 0 N-mm

Moment about Global Z: 0 N-mm

Options

☐ Add to Existing Loads

☒ Replace Existing Loads

☐ Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Şekil 3.6. İvme ölçerin ağırlık olarak tanımlanması

Sap2000 programında XPS için malzeme özellikleri de define>materials> add new material komutlarından XPS malzemesi anizotrop malzeme olarak tanımlanır; bkz Şekil 3.7.

Material Property Data

Material Name: XPS

Material Type: Other

Symmetry Type: Anisotropic

Modulus of Elasticity

E1: 6,33

E2: 4,41

E3: 2,4

Poisson

U12: 0,35

U13: 0,35

U23: 0,35

U14: 0,

U24: 0,

U34: 0,

U15: 0,

U25: 0,

U35: 0,

U45: 0,

U16: 0,

U26: 0,

U36: 0,

U46: 0,

U56: 0,

Shear Modulus

G12: 4,32

G13: 4,

G23: 3,31

Coeff of Thermal Expansion

A1: 1,170E-05

A2: 1,170E-05

A3: 1,170E-05

A12: 0,

A13: 0,

A23: 0,

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 2,800E-07

Mass per Unit Volume: 2,854E-11

Units: N, mm, C

Advanced Material Property Data

Nonlinear Material Data...

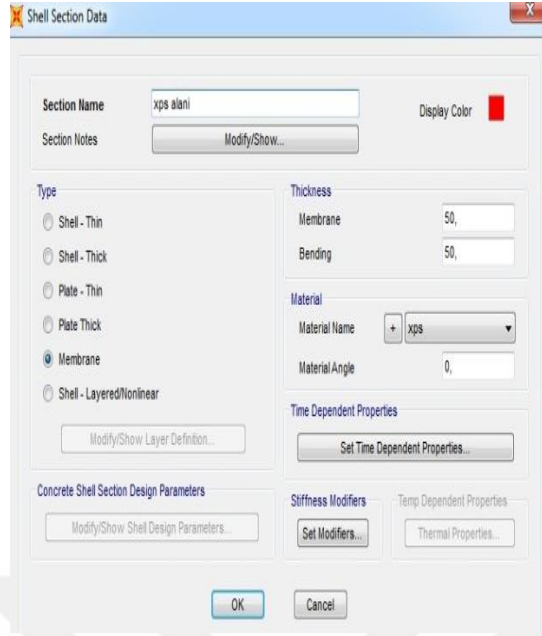
Material Damping Properties...

Time Dependent Properties...

Thermal Properties...

Şekil 3.7. XPS için malzeme özelliklerinin tanımlanması

Daha sonra “Define” menüsünden adım sırasıyla Section Properties >Area Sections >Shell > Membrane komutları seçilerek membran malzemesi tanımlanır; bkz Şekil 3.8.



Şekil 3.8. XPS'in membran olarak tanımlanması

3.4. Titreşim Deney Düzeneği

İmal edilen sandviç kiriş numuneler deney düzeneğine $L=500$ mm uzunluğunda konsol olacak şekilde mesnetlenmiş ve uçlarına ADXL345 marka bir ivme ölçer yerleştirilerek titreşim frekansları ölçülmüştür, bkz. Şekil 3.9.

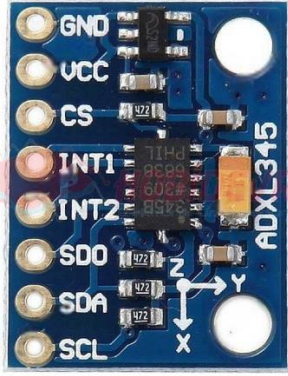


Şekil 3.9. Titreşim deney düzeneği

Şekil 3.9'da gösterildiği üzere, numuneler iki metal plaka arasında 4 adet bulon kullanarak mesnetlenmişlerdir. Mesnetleme sırasında rijit köpük çekirdeğe hasar vermemek için köpük çekirdeğin sıkışma miktarı kumpas ile ölçülerek kontrol edilmiştir. Ayrıca, konsol kirişin serbest ucuna ağırlık asılarak deplasman ölçümü yapılmış ve kirişin ankastre mesnet şartına ne derece uyduğu belirlenmeye çalışılmıştır. Ancak, rijit köpük malzemede yük uygulandıktan çok kısa süre sonra oluşan sünme deformasyonları

sebebiyle sağlıklı netice alınamamıştır. Bu sebeplerden dolayı, ileride yapılacak çalışmalarda mesnetlenme bölgesinde uygulanan kuvvetin de ölçüleceği daha hassas bir mesnetleme düzeneği geliştirilmesi planlanmaktadır.

Çalışmada kullanılan ADXL345 marka ivmeölçer Şekil 3.10'da ve Arduino Uno kartı Şekil 3.11'de gösterilmektedir. İvmeölçer-kartı üzerindeki GND, SDA ve SCL kodlu noktalar Arduino kartı üzerindeki aynı kodlu noktalara, VCC ise +5V'a bağlanmıştır. İlgili Arduino kodu EK-1'de verilmiştir.



Şekil 3.10. ADXL345 dijital ivmeölçer



Şekil 3.11. Arduino Uno R3 marka mikrodenetleyici kartı

Deneyler sırasında, konsol giriş serbest ucuna ağır bir metal parça ile künt bir darbe vasıtasıyla tahrik edilmiş ve örnekleme frekansı 912 Hz olacak şekilde toplam 250 zaman-ivme verisi kullanılan Arduino kartı aracılığıyla bilgisayara kaydedilmiştir.

3.5. FFT Analizi

FFT (Fast-Hızlı Fourier Dönüşümü) analizleri, Octave programında yazılmış bir yazılım ile gerçekleştirilmiş ve Cooley vd. (1967) tarafından geliştirilen Welch Yöntemi kullanılmıştır. FFT analizi ile ilgili Octave/Matlab kodu EK-2’de verilmiştir. Octave programında “pwelch” built-in fonksiyonunun bulunmaması sebebiyle “fft” fonksiyonun kullanılması gerekeceğini not ediniz.

FFT, bir sinyalin frekans bileşenlerini belirlemek için kullanılan etkili bir algoritmadır. Zaman tanım alanındaki sinyalleri frekans tanım alanına dönüştürerek, sinyalin frekans yapısını analiz etmeyi sağlar. FFT ile ilgili temel kavramlar aşağıda özetlenmiştir:

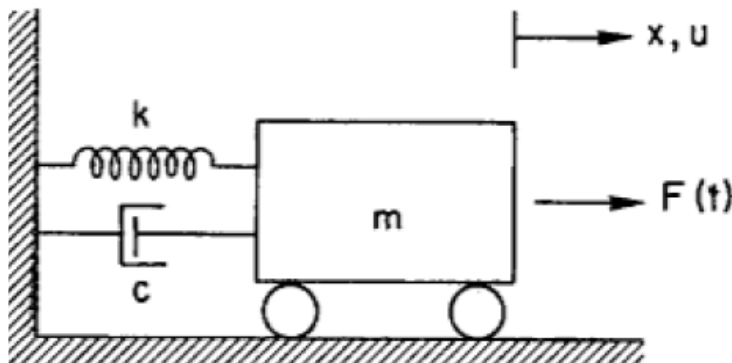
Fourier Dönüşümü: Sürekli veya kesikli bir sinyalin, frekans bileşenleriyle temsil edilmesini sağlar. Fourier dönüşümü, bir sinyalin frekans spektrumunu elde etmek için kullanılır. FFT Fourier dönüşümünü hesaplamanın hızlı bir yolu olup, özellikle büyük veri setleri için etkilidir. FFT analizi sonucunda elde edilen spektrum, frekansların genlikleri ile gösterilir. Bu bilgi, sinyalin yapısını, temel frekanslarını, harmoniklerini ve olası parazit kaynaklarını anlamak için kullanılabilir. FFT analizinin avantaj ve dezavantajları aşağıda özetlenmiştir;

Avantajlar: Hızlı ve verimli bir analiz sağlaması ve büyük veri setleri ile çalışabilmesidir.

Dezavantajlar: Zaman alanındaki değişiklikleri kaybetme riski vardır. Düşük frekanslı bileşenler için çözünürlük kaybı yaşanabilir.

3.5. Sönüm Oranının Belirlenmesi

İlgili değişkenleri tanımlamak için öncelikle Şekil 3.12’de gösterilen bir yay-sönümleyici üzerindeki yoğunlaştırılmış kütleyle ele alalım.



Şekil 3.12. Tek serbestlik dereceli titreşim problemi

Serbest titreşim halinde sistem titreşim başladıktan sonra dışarıdan bir etki olmadan zamana bağlı olarak hareket eder. Bu halde, diferansiyel denklem sönümün titreşim hızına bağlı olduğu varsayılarak şöyle yazılır.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (3.1)$$

Burada, x : deplasman, m : kütle, c : sönüm katsayısı, k : yay katsayısı ve $m\ddot{x}$: atalet kuvveti, $c\dot{x}$: viskoz sönüm kuvveti, kx : elastik yay kuvvetidir.

(3.1) diferansiyel denkleminin çözümü için aşağıdaki gibi bir fonksiyon seçilebilir;

$$x(t) = u(t) = U \cdot e^{st} \quad (3.2)$$

Yukarıdaki çözüm fonksiyonu (3.1) denkleminde yerine koyulursa karakteristik polinom elde edilir.

$$ms^2 + cs + k = 0 \quad (3.3)$$

Aşağıdaki parametreleri tanımlar ve (3.3) denkleminde yerine koyarsak tek serbestlik dereceli sistemin çözümünü tamamlamış oluruz.

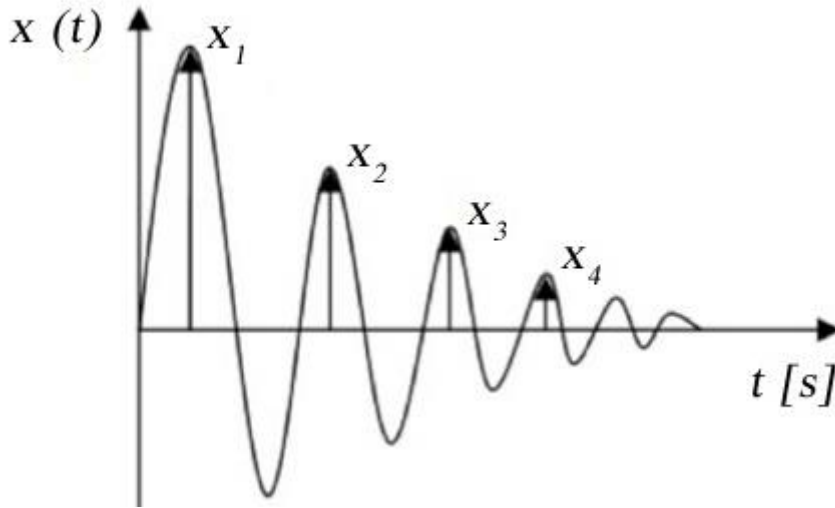
$$\omega_1^2 = \frac{k}{m} \quad (\omega_1: \text{sönümsüz dairesel/açısal öz-frekans}) \quad (3.4)$$

$$\xi = \frac{c}{2m\omega_1} \quad (\xi: \text{sönüm oranı}) \quad (3.5)$$

Denklem (3.5)'de tanımlanmış olan az sönümlü sistemlerde sönüm oranı ξ , deney verileri kullanılarak şöyle hesaplanabilir;

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{\delta}\right)^2}}, \quad \delta = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{X_0}{X_n} \right). \quad (0 < \xi < 1) \quad (3.6)$$

Konsol kiriş titreşim deney deticelerini kullanarak sönüm oranını belirlemek için logaritmik azalma yöntemi kullanılmıştır; bkz. Chopra (1995).



Şekil 3.13. Sönümlü sistemde tepe noktaları

Burada X_n ve X_0 sırasıyla göz önünde bulundurulan ilk ve son tepe noktalarındaki genlikler ve n ise birbirini takip eden tepe noktası sayısıdır; bkz. Şekil 3.13. Az sönümlü sistemler, dış etkilere karşı belirli bir miktar sönümleme (enerji kaybı) gösterirken, bu

kaybın oldukça düşük olduğu sistemlerdir. Sönüm sistemin dinamik hareketinin zamanla azalmasıdır. Sönümlü sistemlerde, enerji kaybı nedeniyle hareket zamanla azalır. Az Sönümlü Sistemler ise sönüm oranı düşük olan ve bu nedenle titreşimlerinin uzun süre devam etmesine neden olan sistemlerdir. Genellikle sönüm katsayısı ξ 0 ile 0.05 arasında olan sistemler bu kategoriye girer. Az sönümlü sistemler, dışsal bir etki veya darbe sonrası titreşimlerini belli bir süre sürdürebilirler.

Elde edilen deney neticelerini sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilmiş olan neticeler ile mukayese edebilmek için sönümsüz titreşim açısal frekansları, ω_n ,

$$\omega_n = \frac{\omega_d}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (3.7)$$

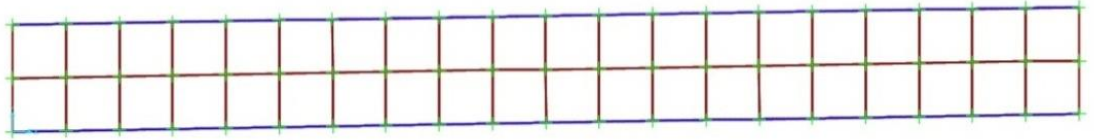
formülü kullanılarak hesaplanmıştır. Burada ω_d deneysel olarak elde edilmiş olan sönümlü titreşim hali için açısal frekanstır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

İmal edilmiş olan sandviç kiriş numuneleri için elde edilen deneysel ve sayısal neticeler bu bölümde sunulmuştur.

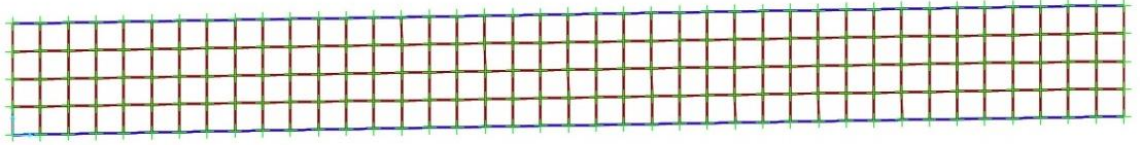
4.1. Sayısal Neticeler

Sandviç kiriş için sonlu elemanlar modeli önce kalınlık boyunca 2 eleman ve 4 eleman olacak şekilde yapılmıştır. İlk sandviç kiriş modeli için model için örnek titreşim mod şekli Şekil 4.1’de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Sandviç kiriş için 1. titreşim mod şekli

Yapılan sıklaştırılmış ikinci model ile elde edilmiş olan örnek 1. Titreşim mod şekli aşağıda Şekil 4.2’de gösterilmektedir.

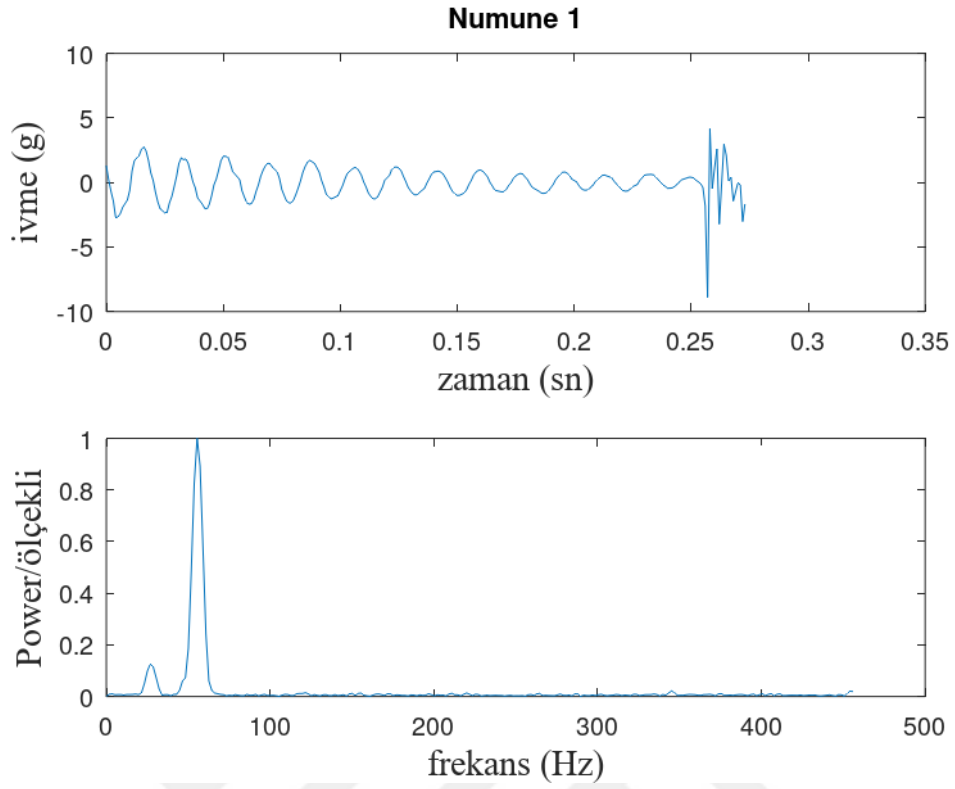


Şekil 4.2. Sandviç kiriş için 1. titreşim mod şekli (2. model)

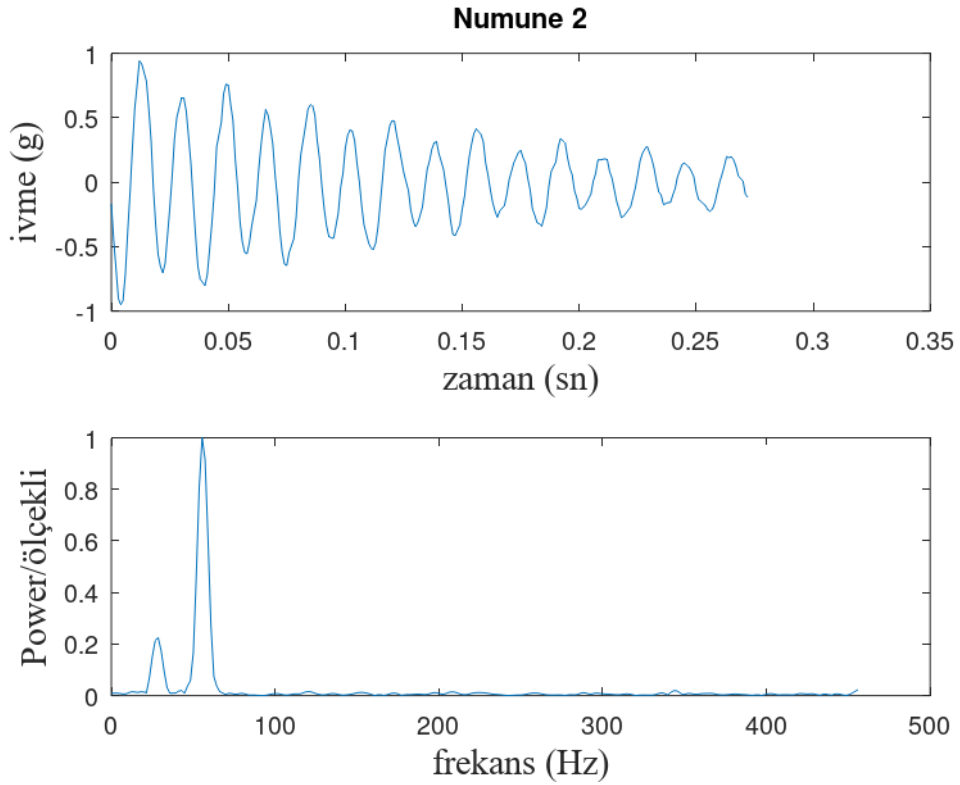
Elde edilen temel titreşim frekansı değerleri titreşim deney neticeleri ile mukayeseli olarak bir sonraki alt bölümde sunulmuştur. Sunulmuş olan neticeler sıklaştırılmış 2. model ile elde edilmiştir.

4.2. Titreşim Deneyleri

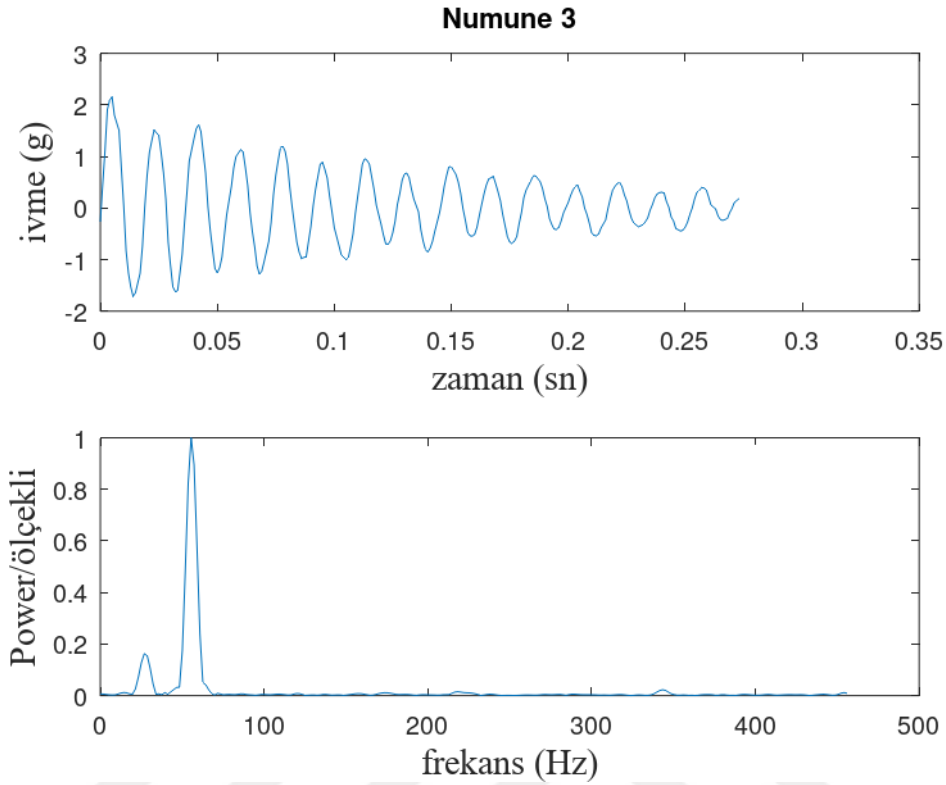
Yapılan titreşim deney ve FFT analiz neticeleri Şekiller 4.3, 4.4 ve 4.5’de numuneler 1,2, ve 3 için verilmiştir. Her bir numune için en az 3 deney yapılmış ve frekans hesabı yapılırken bağlı standart sapmaları en düşük olan ilk 3 deney neticesinin ortalaması alınmıştır.



Şekil 4.3. Numune-1 için deneysel neticeler ve FFT neticesi.



Şekil 4.4. Numune-2 için deneysel neticeler ve FFT neticesi.



Şekil 4.5. Numune-3 için deneysel neticeler ve FFT neticesi.

Yapılan titreşim deneylerinden elde edilen neticeler aşağıda Çizelge 4.1’de sayısal neticeler ile mukayeseli olarak verilmiştir.

Çizelge 4.1. Elde edilen deneysel ve sayısal neticeler

Numune	f_d (Hz)	f_n (Hz)	f_n (Hz)
	Deney	Deney	Sap2000
1	59.24	59.27	61.82
2	61.04	61.07	61.62
3	61.04	61.07	61.49

Çizelge 4.1’den görülebileceği üzere deneysel ve sayısal serbest titreşim frekansları arasında %5’in altında fark vardır. 1. numune için fark yaklaşık %4 iken 2. ve 3. numuneler için farkın % 4 civarında olduğu görülebilir.

Ayrıca, deneysel olarak elde edilmiş olan sönümlü ve Denklem (3.7) kullanılarak hesaplanmış sönümsüz serbest titreşim frekansları arasında çok az bir fark olduğu görülebilir. O halde, bilinmeyen çekirdek kayma modülü veya dış yüz elastisite modülü değerlerinden birinin konsol kiriş titreşim deneyi ve sonlu elemanlar modeli kullanarak belirlenmesinin mümkün olduğu söylenebilir.

Bu maksatla kiriş uzunluğu değiştirilerek (mümkünse uzatılarak) titreşim deneyleri tekrarlanabilir ve böylece elastisite modülü ve kayma modülü gibi iki farklı malzeme parametresi bir arada hesaplanabilir. Ancak, Denklem (3.4)'den görülebileceği üzere titreşim frekansı rijitlik/kütle oranının kareköküne eşittir. Bu yüzden statik deneyler ile sağlanabilecek hassasiyetin dinamik deneyler ile sağlanması mümkün olmayabilir.



5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, metal dış yüzölçü sandviç kirişlerin malzeme özelliklerinin belirlenmesi veya gerektiğinde kontrol edilebilmesi için bir titreşim testi yapılmıştır.

Bahse konu rijit köpük çekirdekli kirişlerde sünme sebebiyle statik testlerden genellikle iyi netice alınamaması ve numuneye hasar vermemek için bu yola gidilmiştir. Bu maksatla düşük maliyetli dijital bir ivme ölçer kullanılarak sandviç kiriş numuneleri üzerinde konsol kiriş titreşim deneyleri yapılmıştır. Elde edilen veriler yine düşük maliyetli bir mikrodeneyleyici kart vasıtasıyla bilgisayara aktarılmıştır.

Daha sonra Sap2000 yapısal analiz programı ile sandviç kiriş düzlem sonlu elemanlar modelleri yapılmış ve temel titreşim frekansları kiriş uzunluğu $L=500$ mm için elde edilmiştir. Dış yüzler kiriş sonlu elemanları ve çekirdek membran kabulü yapılarak kabuk sonlu elemanları kullanılarak modellenmiştir. Ayrıca, çözüm ağı sıklaştırması da yapılmıştır.

Son olarak deneysel neticeler ile mukayese yapılmış ve sandviç kiriş dış yüzü üstte olacak şekilde yapılan deneyler ile çekirdek malzeme kayma modülü değerinin veya dış yüz elastisite modülünün belirlenebileceği veya başka deneyler ile elde edilmiş değerlerin kontrol edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- i) Konsol kiriş titreşim deneyi ile sandviç kiriş malzeme parametrelerinin (çekirdek kayma modülü veya dış yüz elastisite modülü) belirlenmesinin mümkün olabileceği görülmüştür.
- ii) Elde edilen deneysel neticeler bir sonlu elemanlar paket programı ile elde edilmiş olan sayısal neticeler ile mukayese edilmiş ve deneysel ve sayısal neticeler arasında iyi bir uyum olduğu belirlenmiştir.
- iii) Sandviç kiriş yapısal modeli için düzlem model ile yeterli hassasiyetin sağlanabileceği ve bu yüzden daha karmaşık 3 boyutlu bir model yapılmasına gerek olmadığı söylenebilir.
- iv) Elde edilen neticeler deneysel çalışmada kullanılmış olan düşük maliyetli ivmeölçerin yeterli hassasiyette netice verdiğini göstermektedir.
- v) Bu çalışmada kullanılan dijital ivmeölçerin örnekleme frekansının 900 Hz civarında olduğu gözlemlenmiştir. Bu yüzden ileride yapılacak benzer çalışmalarda numune uzunluğunun artırılması veya daha yüksek hassasiyetli bir ivmeölçer kullanılması gerekebilir. Bunun yerine daha uzun (veya narin) numune geometrisi seçilmesi yoluna da gidilebilir.
- vi) Konsol kiriş deney numunelerinin ankastre uçlarının mesnetlenmesi için numunelere hasar vermeyen gelişmiş bir mesnetleme düzeneği tasarlanması gerektiği düşünülmektedir. Konsol kiriş yerine basit mesnetli kiriş deneyi yapılarak da bu problem çözülebilir. Ancak, aynı kiriş malzeme özellikleri ve

geometrisi için basit mesnetli kiriş titreşim frekansının konsol kirişe kıyasla çok daha yüksek olması sebebiyle ölçüm hassasiyeti düşebilir.

İlerde yapılacak olan çalışmalarda kompozit dış yüzlü sandviç kirişlerin malzeme özelliklerinin de benzer şekilde elde edilmesi planlanmaktadır. Ancak, statik deneylerden elde edilen hassasiyetin titreşim deneyleri ile sağlanmasının pek mümkün olmadığı ve bu yüzden malzeme özelliklerini belirlemede öncelikle statik deneylere başvurulması gerektiği göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu çalışmada kullanılmış olan mikrodenetleyici karta kıyasla çok daha yüksek veri depolama kapasitesine sahip ama benzer maliyetli kartların satışa sunulduğu görülmüştür. Benzer deneysel çalışmalarda bu yeni tip kartların tercih edilmesi yerinde olacaktır.



5. KAYNAKLAR

- Abarcar, R. B., & Cunniff, P. F. 1972. The vibration of cantilever beams of fiber reinforced material. *Journal of Composite Materials*, 6(4), 504-517.
- Albarbar, A., Badri, A., Sinha, J. K., Starr, A. 2009. Performance evaluation of MEMS accelerometers. *Measurement*, 42(5), 790-795.
- Baba, B. O., & Thoppul, S. 2009. Experimental evaluation of the vibration behavior of flat and curved sandwich composite beams with face/core debond. *Composite Structures*, 91(1), 110-119.
- Çağdaş, İ. U., Aliyev, R. 2020. Metal Yüzlü Sandviç Konsol Kirişlerde Numune Boyunun Ölçülen Temel Titreşim Frekansına Etkisi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 8(2), 237-244.
- Cagdas, I. U., Taskin, M. 2020. A modified analytical expression to determine the quasi-static pre-indentation loads of metal-faced sandwich beams. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 22(5), 1404-1425.
- Cagdas, I. U., Saeedi, S. 2022. Structural behavior of MDF beams reinforced by unidirectional glass fiber reinforced thermoset polyurethane outer layers. *Composite Structures*, 295, 115848.
- Chopra, A. K. 1995. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Prentice Hall. Inc., Upper Saddle River, NJ.
- Cooley, J. W., Lewis, P. A., & Welch, P. D. 1967. Historical notes on the fast Fourier transform. *Proceedings of the IEEE*, 55(10), 1675-1677.
- Guan, C., Zhang, H., Hunt, J. F., & Yan, H. 2016. Determining shear modulus of thin wood composite materials using a cantilever beam vibration method. *Construction and Building Materials*, 121, 285-289.
- Hyer, M. W., Anderson, W. J., Scott, R. A. 1978. Non-linear vibrations of three-layer beams with viscoelastic cores, II: Experiment. *Journal of Sound and Vibration*, 61(1), 25-30.
- Rizos, P. F., Aspragathos, N., Dimarogonas, A. D. 1990. Identification of crack location and magnitude in a cantilever beam from the vibration modes. *Journal of sound and vibration*, 138(3), 381-388.
- Sokolinsky, V. S., Von Bremen, H. F., Lavoie, J. A., Nutt, S. R. 2004. Analytical and experimental study of free vibration response of soft-core sandwich beams. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 6(3), 239-261.
- Taskin, M., Sargin, T., Aliyev, R., Cagdas, I. U. 2022. A modified three rail shear test procedure for rigid foamed materials. *Journal of Cellular Plastics*, 58(3), 515-539.

- Toledo, E., Cury, A., & Landre, J. 2021. Assessment of low-cost wireless sensors for structural health monitoring applications. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 14(2), e14213.
- Varanis, M., Silva, A. L., Brunetto, P. H. A., Gregolin, R. F. 2016. Instrumentation for mechanical vibrations analysis in the time domain and frequency domain using the Arduino platform. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 38(1).
- Varanis, M., Silva, A. L., & Mereles, A. G. 2018. On mechanical vibration analysis of a multi degree of freedom system based on arduino and MEMS accelerometers. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 40(1).
- Yıldırım, Ö. 2019. Cam Elyaf Takviyeli Poliüretan Yüzlü Kompozit Sandviç Kirişlerin Yapısal Analiz ve Testleri, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Ünivesitesi, Antalya, 28 s.
- Yoshihara, H. 2011. Measurement of the Young's modulus and shear modulus of in-plane quasi-isotropic medium-density fiberboard by flexural vibration. *BioResources*, 6(4).

6. EKLER

6.1. EK-1: Arduino Kodu

```
#include <Wire.h> // I2C library, gyroscope

// Accelerometer ADXL345
#define ACC (0xA7>>1) //ADXL345 ACC address
#define A_TO_READ (6) //num of bytes we are going to read each time (two bytes for
each axis)
int ledPin = 13;          // LED connected to digital pin 13
int counter=0;
float remainder;
int ax[101],ay[101],az[101],zaman[101];

void initAcc() {
  //Turning on the ADXL345
  writeTo(ACC, 0x2D, 1<<3);
  writeTo(ACC, 0x31, 0x0B);
  writeTo(ACC, 0x2C, 0x0F); // (0x0F)=> sampling rate=3200 Hz
  //by default the device is in +-2g range reading
}
void getAccelerometerData(int * result) {
  int regAddress = 0x32; //first axis-acceleration-data register on the ADXL345
  byte buff[A_TO_READ];
  readFrom(ACC, regAddress, A_TO_READ, buff); //read the acceleration data from
the ADXL345
  //each axis reading comes in 10 bit resolution, ie 2 bytes. Least Significat Byte first!!
  //thus we are converting both bytes in to one int
  result[0] = (((int)buff[1]) << 8) | buff[0];
  result[1] = (((int)buff[3])<< 8) | buff[2];
  result[2] = (((int)buff[5]) << 8) | buff[4];
}
void setup() {
  pinMode(ledPin, OUTPUT);    // sets the digital pin as output
  Serial.begin(9600);
  Wire.begin();
  initAcc();
}
void loop() {
  unsigned long time;
  //delay(2000); // 1 sn. bekle
  int hx,hy,hz;
  int acc[3];

  getAccelerometerData(acc);
  hx = acc[0];
```

```
hy = acc[1];
hz= acc[2];
time = millis();
ax[counter] = hx;
ay[counter] = hy;
az[counter]= hz;
zaman[counter]=time;
// 10 milisaniye bekle!
delay(10);// 100 veriyi toplam 1 sn.'de oku.
counter++;
remainder=counter % 100; // 100 adet veri aldıktan sonra ekrana yazıyor.
if (remainder==0) {
    counter=0;
    for (int index=0; index<=100;index++){
        Serial.print(" index=");
        Serial.print(index);    // kaçınıcı okuma olduğunu yazdır.

        Serial.print(" Zaman: ");
        Serial.print(zaman[index]); // ivme okumasının yapıldığı zamanı yazdır.
        zaman[index]=0;
        // ivme değerlerini yazdır.
        Serial.print(" AX=");
        Serial.print(ax[index]);
        ax[index]=0;
        Serial.print(" AY=");
        Serial.print(ay[index]);
        ay[index]=0;
        Serial.print(" AZ=");
        Serial.println(az[index]);
        az[index]=0;
    } //for
    remainder=1000;// döngüden çık
    digitalWrite(ledPin, HIGH); // sets the LED on
    delay(1000); // 1 sn. bekle
    digitalWrite(ledPin, LOW); // sets the LED off
    delay(1000); // 1 sn. bekle
    digitalWrite(ledPin, HIGH); // sets the LED on
    Serial.println(" 1 sn sonra OKUMAYA BAŞLAR");
    delay(1000); // 1 sn. bekle
    digitalWrite(ledPin, LOW); // sets the LED off
} // if
}
//----- Functions
//Writes val to address register on ACC
void writeTo(int DEVICE, byte address, byte val) {
    Wire.beginTransmission(DEVICE); //start transmission to ACC
    Wire.write(address); // send register address
    Wire.write(val); // send value to write
```

```
Wire.endTransmission(); //end transmission
}
//reads num bytes starting from address register on ACC in to buff array
void readFrom(int DEVICE, byte address, int num, byte buff[]) {
Wire.beginTransmission(DEVICE); //start transmission to ACC
Wire.write(address); //sends address to read from
Wire.endTransmission(); //end transmission

Wire.beginTransmission(DEVICE); //start transmission to ACC
Wire.requestFrom(DEVICE, num); // request 6 bytes from ACC
int i = 0;
while(Wire.available()) //ACC may send less than requested (abnormal)
{
buff[i] = Wire.read(); // receive a byte
i++;
}
Wire.endTransmission(); //end transmission

//delay(1000);
}
```

6.2. EK-2: FFT Kodu

% numune 1 test 2

clear

clc

% veriler: Kullanıcı girecek.

zaman=[0:85];

```
ivme=[0      0      4      8      2      4      6      8      4      12      8
      8      10     -4096 -4096 4094 -1634 -2636 1336 2470 -160 -1332
      -770 -428 -892 -1144 -668 -826 -960 -874 -878 -842 -820
      -648 -762 -648 -660 -694 -534 -418 -462 -524 -466 -454
      -486 -320 -322 -348 -240 -210 -90 -120 -68 64 448
      528 756 928 974 1084 1114 1156 1068 952 872 734
      682 450 54 6 -26 -170 -96 -256 -384 -484 -540
      -566 -574 -516 -520 -474 -256 -142 -84 58];
```

ivme=ivme/1-1; % Yerçekimi ivmesini çıkar

T = 1.1164e-3;

% Sample time (milisaniye) – Örnekleme süresi

Fs = 1/T;

% Sampling frequency (329 Hz) – Örnekleme frekansı

Le = 240;

% Length of signal – Sinyal uzunluğu

tt = zaman/1000;

% Time vector (milisaniye)

n=0;

ivme1=(ivme).*hanning(length(ivme)); % windowing

ivme1=[ivme1 zeros(1,84+512*n)]; % zero padding

fft_ivme1=pwelch(ivme1,512*(n+1)); % Octave’da fft kullanılır.

ivme1_MAG=abs(fft_ivme1);

ivme1_PHASE=angle(fft_ivme1);

subplot(2,1,1)

plot(tt,ivme);

aa=xlabel('time (s)');

set(aa,'fontName','TimesNewRoman','FontSize',14);

bb=ylabel('acceleration (g)');

set(bb,'FontName','TimesNewRoman','FontSize',14);

subplot(2,1,2)

%plot([1:256+256],ivme1_MAG(1:256+256)/max(ivme1_MAG));

plot(ivme1_MAG)

cc=xlabel('frequency (Hz)');

set(cc,'FontName','TimesNewRoman','FontSize',14);

dd=ylabel('Power/scaled');

set(dd,'FontName','TimesNewRoman','FontSize',14);

```
% Extract frequencies (interpolasyon ile maksimum frekansı elde et)
aa=find(ivme1_MAG==max(ivme1_MAG))
f1=aa*Fs/(512*(n+1))
alp=ivme1_MAG(aa-1);
bet=ivme1_MAG(aa);
gam=ivme1_MAG(aa+1);
p=1/2*(alp-bet)/(alp-2*bet+gam)
fn_max=(aa+p)*Fs/(512*(n+1))
```



ÖZGEÇMİŞ

Raphig Aliev

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2022-2024	Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans	Azerbaycan Mimarlık ve İnşaat Üniversitesi
2007-2011	Çevre Mühendisliği Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Azerbaycan (Bakü)