

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

**MAKİNE TEZGÂH GÖVDELERİNİN TİTREŞİM
SÖNÜMLENMESİNDE KULLANILABİLECEK
KOMPOZİT MALZEME TASARIMININ GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Seda YILDIZ

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ**
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ali Osman KURT

Haziran 2021

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MAKİNE TEZGÂH GÖVDELERİNİN TİTREŞİM
SÖNÜMLENMESİNDE KULLANILABİLECEK
KOMPOZİT MALZEME TASARIMININ GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Seda YILDIZ

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ**

**Bu tez 21.06.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile
kabul edilmiştir.**

Jüri Başkanı

Üye

Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Seda Yıldız

21.06.2021

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Ali Osman KURT'a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar olanakları konusunda anlayış ve yardımlarını esirgemeyen Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Doç. Dr. Hüseyin DAL'a ve bölüm araştırma görevlilerine teşekkürü borç bilirim. Değerli fikirlerinden dolayı başta yöneticim Fatih KAR olmak üzere Kar Metal Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti. çalışanlarına ve takım arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde emekleri olan anne ve babama, desteklerini daima arkamda hissettiğim kardeşlerime teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan TÜBİTAK 2210-D Yurtiçi Sanayiye Yönelik Yüksek Lisans Burs Programına (Proje No: 1649B022001320) teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	v
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ÖZET	viii
SUMMARY	ix
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
LİTERATÜR TARAMASI	2
2.1. Makine Takım Tezgâhları.....	2
2.2. Kompozit Malzemeler	5
2.3. Polimer Beton.....	6
2.4. Mineral Döküm	10
BÖLÜM 3.	
MATERYAL VE YÖNTEM	18
3.1. Granüllerin Hazırlanması ve Kalıp Tasarımı.....	18
3.2. Epoksi Reçinesi	23
3.3. Deneysel Modal Analiz.....	24
3.4. Basma Testleri	28

BÖLÜM 4.

BULGULAR VE TARTIŞMA	30
4.1. Titreşim Sönümleme Testleri Sonuçları.....	30
4.2. Basma Testi Sonuçları.....	37

BÖLÜM 5.

SONUÇLAR	41
----------------	----

BÖLÜM 6.

ÖNERİLER	42
----------------	----

KAYNAKLAR.....	43
----------------	----

ÖZGEÇMİŞ	46
----------------	----

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

CNC	: Bilgisayar Destekli Numerik Kontrol
EPC	: Epoksi Polimer Beton
EPUAC	: Epoksi Poliüretan Akril Beton
FRF	: Frekans Cevap Fonksiyonu
MDF	: Orta Yoğunluklu Lif Levha
PC	: Polimer Beton
PB	: Yonga Levha
PMMA	: Poli Metil Metakrilat
WCF	: Ahşap Kompozit Panel

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Mineral döküm tezgah şasesi	3
Şekil 2.2. Polimer beton (üst) ile normal beton (alt) karşılaştırılması (Tabatabaei an,2019)	6
Şekil 2.3. Mineral döküm doldurulmuş tezgah şasesi	18
Şekil 3.1. Elek analizleri için kullanılan elekler	18
Şekil 3.2. Yıkama işlemi	19
Şekil 3.3. Kurutma işlemi	19
Şekil 3.4. Bir yüzeyine menteşe takılmış kalıplar	20
Şekil 3.5. Çanta kilidi takılmış kalıp	20
Şekil 3.6. İnce taşlama fırçası	21
Şekil 3.7. Taşlama işlemi	21
Şekil 3.8. Taşlama sonrası kalıplar	22
Şekil 3.9. 25x25 Kablo kanalı	24
Şekil 3.10. Titreşim testlerinde kullanılan numuneler ve ivmeölçer yapıştırılma noktaları	25
Şekil 3.11. Modal analiz deney sistemi ve giriş	25
Şekil 3.12. Brüel&Kjaer Type 8206-002 model darbe çekici	26
Şekil 3.13. Kuvvet zaman grafiği	26
Şekil 3.14. Aşırı yükleme hatası ekranı	27
Şekil 3.15. Modal analiz voltaj uyarı ekranı	27
Şekil 3.16. Basma cihazı	28
Şekil 3.17. Basma testi numuneleri	28
Şekil 3.18. Sınır yüzeyleri paralel olmayan 3c1 ve 3b3 numunesi	29
Şekil 4.1. 1 nolu reçete mod-frekans grafiği	30
Şekil 4.2. 1 Nolu reçete Mod frekansı – sönüm oranı grafiği	31
Şekil 4.3. 2 Nolu reçete mod-frekans grafiği	32
Şekil 4.4. 2 Nolu reçete mod frekansı – sönüm oranı grafiği	32
Şekil 4.5. 3 Nolu reçete mod-frekans grafiği	33

Şekil 4.6. 3 Nolu reçete mod frekansı – sönüm oranı grafiği	34
Şekil 4.7. Tüm numuneler için mod-frekans grafiği	34
Şekil 4.8. Tüm numuneler için 3.mod-frekans grafiği	35
Şekil 4.9. Tüm numuneler için mod frekansı-sönüm oranı grafiği	35
Şekil 4.10. Tüm numuneler için 1.mod frekansı-sönüm oranı grafiği	36
Şekil 4.11. Gerilme-gerinim grafiği	38
Şekil 4.12. Elastik modül sonuçları	38



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Agrega kimyasal bileşimi	18
Tablo 3.2. Katı agrega fiziksel özellikleri (İTÜ Maden Fak.)	19
Tablo 3.3. Agrega formları	22
Tablo 3.4. Karışım miktarları.(Rakamlar birim değeri ifade etmektedir)	23
Tablo 3.5. Karışımlarda kullanılan malzemelerin % oransal miktarları	23
Tablo 4.1. Karışım gruplarına bağlı olarak elastik modül sonuçları	37
Tablo 4.2. Basma testi numune yoğunlukları	39

ÖZET

Anahtar kelimeler: Mineral Döküm, Epoksi Reçinesi, Deneysel Modal Analiz, Elastik Modül

Makine tezgâhlarının taban ve gövdelerinde kullanılan malzemeler makine ile gerçekleştirilen işlemin hassasiyeti üzerine etkilidir. Makine kullanım ömrü ve ürün kalitesi açısından bu malzemelerin mekanik ve dinamik özelliklerinin bilinmesi ve özellikle titreşim yalıtım kabiliyeti iyi malzemelerin tercih edilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda sıkça kullanılan malzemeler dökme demir ve çelik verilebilir. Ancak son zamanlarda bu malzemelere alternatif olarak titreşim sönüm kabiliyeti daha yüksek olan polimer matrisli kompozit malzeme olan mineral döküm ile üretilen kompozit malzemeler geliştirilmiştir. Mineral döküm çeşitli formlardaki agregalar, silis kumu ve bağlayıcı olarak epoksi reçinesi içerir. Bu karışım oda sıcaklığında ve bekledikçe sertleşmektedir. Hassas ölçüm gerektiren tüm takım tezgâhlarında kullanılabilirken avantajları dolayısıyla yakın gelecekte mineral döküm modern yapı malzemesi olarak ta kullanılacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmada modern takım tezgâhlarında meydana gelen titreşim problemini minimum seviyeye indirmek üzere polimer matrisli kompozit sistem geliştirilmiş ve geliştirilen sistemin titreşim karakteristikleri ile elastik modül değerleri incelenmiştir. Bu amaçla farklı kompozit malzeme karışım reçeteleri hazırlanmış, çeşitli formlarda hazırlanan agrega ve kumlar endüstride kullanım sıklığı da dikkate alınarak bu çalışmada tercih edilmiştir. Titreşim testleri için karışım reçetelerinden 20x25x480 mm³ ebatlarında çeşitli sayılarda kiriş test numuneleri, basma testleri için ise aynı karışım reçetelerinden boyu 100 mm olan Ø50 mm'lik silindirik test numuneleri hazırlanmıştır. Deneysel modal analiz yöntemiyle her bir kirişin doğal frekans ve sönüm oranları, Frekans Cevap Fonksiyonu (FRF) yardımıyla sonuçlar elde edilmiş, basma test sonuçlarıyla elastik modül değerleri ile kıyaslanmıştır.

Araştırmada elde edilen bulgulara göre titreşim sönümlene verileri ile elastik modül değerleri dikkate alındığında kompozit yapının titreşim sönümlene kabiliyetine etki eden en önemli faktörün kompozit yapı içerisindeki çakıl taşı ve epoksi oranlarının olduğu sonucuna varılmıştır.

DEVELOPMENT OF COMPOSITE MATERIAL DESIGN MIGHT BE USED FOR VIBRATION DAMPING OF MACHINE BODIES

SUMMARY

Keywords: Mineral Casting, Epoxy Resin, Experimental Modal Analysis, Elastic Module

The materials used in the bases and bodies of the machine benches are effective on the precision of the process performed by the machine. In terms of machine service life and product quality, it is necessary to know the mechanical and dynamic properties of these materials and especially materials with good vibration isolation capability should be preferred. In this context, commonly used materials can be given cast iron and steel. However, as an alternative to these materials, composite materials produced by mineral casting, which is a polymer matrix composite material with higher vibration absorption capability, have been developed recently. Mineral casting contains aggregates in various forms, silica sand and epoxy resin as a binder. This mixture hardens at room temperature and while waiting. While it can be used in all machine tools that require precise measurement, it is thought that mineral casting will be used as a modern building material in the near future due to its advantages.

In this study, a polymer matrix composite system was developed in order to minimize the vibration problem occurring in modern machine tools, and the vibration characteristics and elastic modulus values of the developed system were investigated. For this purpose, different composite material mixture recipes were prepared, and aggregates and sands prepared in various forms were preferred in this study considering the frequency of use in the industry. Various numbers of beam test samples of 20x25x480 mm³ from mixture recipes for vibration tests, and for compression tests, cylindrical test samples of Ø50 mm with a length of 100 mm were prepared from the same mixture formula. With the experimental modal analysis method, the natural frequency and damping ratios of each beam were obtained with the help of the Frequency Response Function (FRF), and compared with the elastic modulus values with the compression test results.

According to the findings of the study, when the vibration damping data and elastic modulus values are taken into consideration, it has been concluded that the most important factor affecting the vibration damping capability of the composite structure is the pebble and epoxy ratios in the composite structure.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Makinelerin taban ve gövdelerinin makinelerin çalışma hassasiyeti üzerindeki önemi genellikle dikkate alınmamaktadır. Ultra hassas ölçüm ve işlemede, temel çerçeve statik ve dinamik olarak değişen termal yüklere, mekanik kuvvetlere ve torklara karşı sabit pozisyonunu korumalıdır. Taban çerçeveleri için yaygın olarak kullanılan malzemeler doğal taş, dökme demir, çelik ve seramiktir. Bu malzemelere bir alternatif polimer betondur. Polimer beton daha özgül bir karışım hazırlayarak oluşturulan makine taban çerçevesi mineral döküm olarak adlandırılır. Baz çerçeve olarak taşıma makineleri veya işleme merkezlerinde mineral döküm kullanılır. Yaratıcı tasarımlar ve son teknoloji uygulamalar için modern bir malzeme mineral Döküm makine tabanlarında titreşim sönümleme yapabilmesi için kullanılmaktadır. Mineral döküm (PC - polimer betonu), reçine ile bağlanmış bazalt, spodumen, uçucu kül, nehir çakılı, kum, tebeşir vb. gibi inorganik agrega parçacıklarından oluşan kompleks bir malzemedir.

Mineral döküm, dökme demire benzer şekilde, sıkıştırma ve gerginlikte farklı dayanım değerlerine sahiptir. Üç farklı boyutta granit taneciği karışımından oluşan agrega kullanımı yapının kompaktlığını artırırken gözenekliliği azaltır. Epoksi bağlayıcı, yapıya daha yüksek dayanım sağlayan granit parçacıklar arasında daha güçlü bir bağ sağlar. Genel olarak, karışımdaki %12 - %15 epoksi içeriği yapıya maksimum mekanik ve ısı özellikler katar. Mineral dökümün, dökme demirden 4 ila 7 kat daha yüksek titreşim sönümleme özellikleri sahiptir. Araştırmalar, yaygın olarak kullanılan dökme demirin, en yakın gelecekte mineral döküm gibi modern inşaat malzemeleriyle kısmen veya hatta tamamen değiştirilebileceğini göstermiştir. Hazırlanacak bu kompozit malzeme basma testine tabii tutulacak ve alınacak elastik modül sonuçlarına bağlı olarak titreşim sönümleme kabiliyeti ortaya çıkarılacaktır.

BÖLÜM 2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Makine Takım Tezgâhları

Makine taban gövdesinin makinelerin kesinliği üzerindeki önemi genellikle dikkate alınmamaktadır. Ultra hassas ölçüm ve işlemede, tezgâh gövdesi statik ve dinamik olarak değişen termal yüklere, mekanik kuvvetlere ve torklara maruz kalmaktadır. Bu şartlar altında yüksek sertlikte tüm alt sistemlerin sabit pozisyonunu korumak durumundadır. Uzun vadeli istikrar, makine tezgâhının önemli bir sorunudur. Tezgâh gövdesi için yaygın olarak kullanılan malzemeler doğal taş, dökme demir, çelik ve seramik olmakla birlikte kullanılan metalik malzemeler de özellikle mekanik karakteristikleri yönlerince kıyaslandığında diğer yapı malzemeleri anlamı büyük değer taşımaktadır ve ilerleyen dönemlerde değeri devam edecektir (Erbe, 2008; Orak, 1997). Malzemelerin mekanik karakteristiklerini bilebilmek kullanım alanlarına bağlı olarak malzemelerin karşılaşacağı zor şartlarda tedbir alabilmek adına önemlidir. Bu konuyla alakalı ilk çalışmaları sıvı içerisindeki küçük rijit bir küre civarındaki efektif viskoziteyi hesaplayan Albert Einstein 1906 yılında yapmıştır (Bayram, 1995). Yüksek mekanik dayanım, yüksek elastisite modülü ve düşük yoğunluk elde edebilmek malzemeler için önem arz etmektedir. Malzemeleri genellikle seramikleri, metaller ve plastikler olarak 3 önemli gruba ayırabiliriz. Bu üç grubun birbirlerine göre zayıflıkları ve üstünlükleri mevcuttur (Aztekin, 2010). Modern takım tezgâhlarının yüksek verimlilikle ilgili işlevsel gereksinimleri, işlemenin gerekli hassasiyetini ve tekrarlanabilirliğini korurken, artan hız ve işleme derinliği gerekmektedir. İşleme kararlılığını arttırabilmek için mevcut duruma çözüm arayışları başlamıştır. Buna çözüm olarak pasif ve aktif titreşim gidericiler veya uygun seçim yollarına gidilmiştir (Dunaj, 2020). Takım tezgâhlarından yüksek elastite modülü, akma dayanımı, mekanik ve aşınma direnci ve tokluğa sahip olması beklenmektedir.

Bu özelliklere ek olarak, bu malzemelerin, görevlerini gereken hassasiyetle yerine getirmek için azaltılmış termal genleşme katsayısı ve yüksek titreşim sönümleme kapasitesi sunması, dolayısıyla çalışma ortamının gereksinimlerine yanıt olarak daha az olası değişikliklere maruz kalması da istenmektedir (Piratelli-Filho, 2010). Makine taban gövdeleri genellikle gri dökme demirden veya kaynaklı çelik yapılar şeklinde yapılmaktadır. Bu, dinamik özelliklerini şekillendirme olasılığını önemli ölçüde sınırlar. Bunun nedeni, bu malzemelerin özelliklerinin (Young modülü, yoğunluk ve sönümleme) sınırlı bir şekilde değiştirilebilmesidir. Çelik veya gri dökme demirden yapılmış çerçeveler söz konusu olduğunda, yapının belirli bir noktasında veya belirli bir yönünde malzeme ilavesiyle meydana gelen ağırlık artışı sertlik artışına da sebebiyet verir. Sertlik ve kütlenin eşzamanlı değişimi, yapının dinamik özelliklerinin pratik olarak değişmeden kalmasına neden olabilmektedir (Dunaj P, 2020). Dökme demir, ısı genleşme ve daralmanın neden olduğu boyutsal değişiklikler ve oda sıcaklığındaki değişikliklerin neden olduğu yapı bozulmaları nedeniyle imalatta hatalara izin veren yüksek ısı genleşme ve iletkenlik sunar (Piratelli-Filho A, 2010). Geleneksel olarak, dökme demir, yüksek sertliği, yüksek sönümleme katsayısı ve mükemmel ısı transfer özellikleri nedeniyle, takım tezgâhı yapısal imalatında kullanılan malzemedir. Ancak, gelişmiş tezgâhların dökme demir yapılarında tespit edilen titreşim gibi doğal problemler takım ömrünü, takım bütünlüğünü etkilemektedir (Selvakumar, 2012).



Şekil 2.1. Mineral döküm tezgah şasesi

Temel Takım Tezgâhlarında yaygın olarak kullanılan gri dökme demir, nispeten yüksek sönümleme kapasitesini mikro yapısında gözlenen grafit lamellere borçludur ancak makine takım yapısına iletilen titreşimler gevşemeye neden olur ve işleme işlemleri sırasında bileşenler arasında konumsal hatalar geliştirir. Bu vesileyle ortaya çıkan ürünler için boyutsal yanlışlıklara ve düşük yüzey kalitesi meydana gelmektedir (Selvakumar, 2012; Piratelli-Filho, 2010). Dökme demir ve granit makine taban gövdelerinde kullanılan malzemelerden birkaçıdır. Dökme demir; ısı genleşme ve daralmanın neden olduğu boyutsal değişiklikler oda sıcaklığındaki değişikliklerin neden olduğu yapı bozulmaları nedeniyle imalatta hatalara sebebiyet vermektedir. Makine taban gövdesi inşa etmek için dökme demir ve granit yerine kompozit malzemelerin kullanılabilmesi öngörülmüştür.

Fritz Studer, makine taban gövdelerinde titreşim sönümleme kabiliyeti yüksek olan kompozit malzemeler geliştirmeyi amaç edinen bir bilim insanı olarak partikül granit ve epoksi reçineye dayalı Granitin bileşiğinin patentini almıştır. Boyut, homojenlik, seramik partikül saflığı ve polimer viskozitesi gibi özellikleri kompozitlerin en önemli değişkenlerinden bazılarıdır (Piratelli-Filho, 2010).

Günümüzde metalik malzemeler klasik malzemelerin birçok özelliği gelişen teknolojinin ihtiyaçlarını karşılayamamaya başlayınca, daha üstün özelliklere sahip kompozit malzemelerin üretimi ve geliştirilmesi de hız kazanmıştır. Tek bir malzemedeki optimum özellikleri toplamak veya yeni bir özelliği ortaya çıkarmak için aynı veya farklı malzeme gruplarında iki veya daha fazla malzemenin kombinasyonuna kompozit (karma) denir. Kompozit (karma) malzeme genellikle düşük modüllü ve güçlü reçineden veya bir metal matrisin diğer ana fazından ve burada dağılmış daha küçük bir takviye elemanından oluşur. Kompozit malzemelerin yüksek mukavemet/ağırlık ve rijitlik/ağırlık değerleri, sık kullanılan metalik malzemelerden daha hafif malzemelerin tasarlanmasını kolaylaştırmıştır. Dinamik özellikler taşıyan ve devamlı olarak değişen kompozit malzemeler, maliyetlerinin düşürülmesi ve verimliliklerini yükseltilmesi ile yapı ekipmanları, ulaşım, uzay, havacılık ve savunma sanayi gibi farklı alanlarda sıkça kullanılmaktadır (Koruvatan, 2008; Aztekin, 2010).

2.2. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzeme birçok alanda çoğunlukla karşımıza çıkmakta olan beton malzemesi örneğini gösterebiliriz. Beton; Su, çimento (cement), ve bazı durumlarda kullanılmakta olan katkı malzemeleri (kimyasal, fiber, mineral vb.) belirli koşullar ve oranlarda karılmasıyla (karıştırma) ortaya çıkan, başlangıçta plastik formda olduğunda şekil değiştirilebilen, süreç sonunda su ve çimento arasındaki kimyasal aktivitenin meydana gelmesiyle (hidratasyon) sertleşerek dayanım kazanan, agrega ve harç fazından meydana gelen kompozit bir sistemdir (Özel, 2017).

Dünya’da sudan sonra en çok tüketilen ikinci malzeme olan beton, özellikle gelişmekte olan ülkelerde inşaat sektörünün hızlı büyümesi nedeniyle giderek daha fazla kullanılmaktadır. Yüksek basma dayanımı, mükemmel elastik modülü ve dayanıklılığı ve düşük maliyetle yaygın kullanılabilirliği, temel avantajlarıdır (Ferdous, 2020). Geleneksel beton, su, agregalar, değişken oranlarda çimento içermektedir (Venkatesh, 2018).

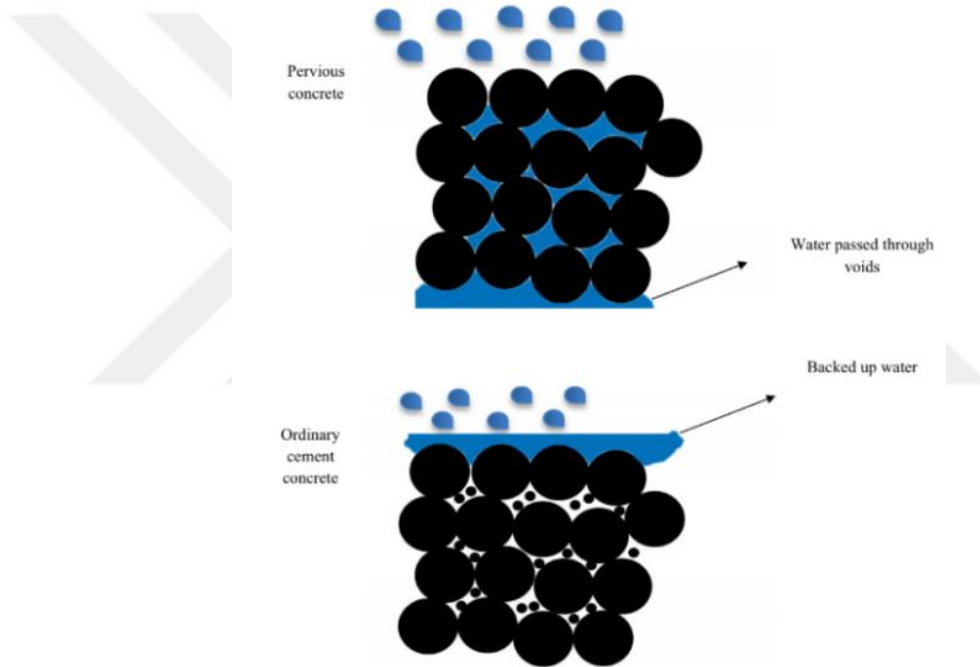
Betonun kuvvet altındaki karakteristikleri hakkında yapılan çalışmaların büyük bir kısmı kısa zamanlı yük bindirmesi altındaki elastiklik göstermeyen tutumunu içermektedir. Beton birden fazla fazlı heterojen bir yapıdır. Betonun elastik olmayan tutumu üzerinde en etken parametre agrega matris temas yüzeyinin en zayıf kısmı belirtmesidir.

Betona uygulanan herhangi bir basma çalışmasında ilk olarak bağ çatlaklarının durumu betonun zayıf bölümünü meydana getirdiğinden, agrega eklenmesi ile oluşturulan heterojenlik bağ çatlamasının çoğalmasına sebep olmaktadır. Su/çimento katkısı artışıyla agreganın betonun dayanımı için etkisi giderek düşmektedir. Agreganın yoğunluğu arttıkça basma dayanımını artmaktadır (Gümüş, 2010). Betonun elastisite modülünün bilinmesi yapılarda elastik şekil değiştirmelerin hesaplanmasına elveriş sağlamaktadır. Elastisite modülü herhangi bir problem olmadan önce yapılarda bir tedbir alabilmek adına bilinmesi önem arzeden bir malzeme katsayısıdır. Betonun içerisinde çimento hamuru şeklinde viskoz bir faz bulunur (Garan, 2010).

2.3. Polimer Beton

Betona dayanım ve sönümlenme özellik kazandırmak için polimer esaslı malzemelerin kullanımı giderek tüm dünyada rağbet gören bir uygulama olmuştur. Bu sayede ortaya polimer beton (polycrrete) ismiyle anılan yeni bir kompozit tasarım çıkmıştır. Betonda polimer kullanımı farklı şekillerde olmaktadır. Bunlar;

- a) polimer katkısı ilave edilen betonlar,
- b) yalnızca bağlayıcı fazın polimer katkısı içerdiği betonlar ve
- c) polimerle zenginleştirilmiş betonlardır (Chandra ve Ohama, 1994).



Şekil 2.2. Polimer beton (üst) ile normal beton (alt) karşılaştırılması (Tabatabaeian, 2019).

Polimer betonlar, ilk olarak Çekoslovak Bilimler Akademisi'nde 1959 tarihinde ortaya atılmıştır. O tarihlerde teorik anlamında çok fazla çalışma yapılmasına rağmen deney kısmında uygulama olmamıştır. Önce Amerika Birleşik Devletleri'nde uygulanmaya başlayan epoksi ve polyester bugünlere değin gelişimine, uygulama alanı kazanmaya devam etmiştir. Polimer betonların kalıcılıkları (durabilite) oldukça iyidir. Beton yüzeylere tasnif edildiğinde betonun dayanıklılığı iyi yönde etkilenmektedir(Soykan, 2014).

PC'nin temel avantajları şunlardır: malzemelerde tasarruf, daha düşük büzülme ve mükemmel drenaj özelliğidir (Tabatabaeian, 2019). Kompozit malzeme olarak kullanılan polimer beton betonun güçlendirilmesi, daha iyi kalite ve betonun dayanıklılığı, sentetik reçineli beton olarak da bilinen Polimer beton yama malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılmıştır (Venkatesh, 2018).

Betonun elastik modülünü etkileyen iki ana parametre yoğunluk ve basma dayanımıdır. Betonun birim ağırlığı, özellikle düşük yoğunluklu beton söz konusu olduğunda, elastik modülü tahmin etmek için önemli bir parametredir. Aynı basma dayanımında, polimer betonun elastik modülü normal betondan önemli ölçüde daha düşüktür (Darwin, 2016; Ferdous, 2020).

Polimer beton, normal betondan yaklaşık 5-10 kat daha pahalıdır ve bu nedenle, uygulamaları şu anda gelişmiş bir performansın daha yüksek maliyeti haklı kıldığı yapılarla sınırlıdır. Birçok bina ve inşaat uygulamasında kullanılmalarına rağmen, polimer beton için tasarım prosedürü oluşturma konusunda sınırlı girişim vardır. Reçine ve dolgunun türü ve içeriği, kürleme yöntemi, kürleme sıcaklığı, nem ve özellikle reçine-dolgu oranı ve matriks-agrega oranı gibi çeşitli parametreler polimer betonun özelliklerini etkilemektedir (Ferdous W, 2020). Polimer betonun yüksek mekanik özellikleri, hızlı kürleşme ve çimentoya mükemmel yapışma gibi üstün özellikleri katması sayesinde bina kaplaması gibi uygulamalar için uygundur (Ghassemi P, 2020). Polimer beton, artırılmış mukavemet özelliklerine, çevresel faktörlere karşı geliştirilmiş dirence ve daha hızlı kürlenme süresine sahiptir. Bu tür iyileştirilmiş özelliklerle, polimer beton hızla büyüyen bir araştırma alanı haline geldi. Bir monomerin veya agrega karışımının polimerizasyon işleminden kaynaklanan kompozit malzeme olarak polimer beton kullanılmaktadır (Harja, 2009). Polimer beton, çimento betonu karşılaştırıldığında avantajları nedeniyle yaygın uygulama alanı olan nispeten yeni yüksek performanslı bir malzemedir.

Polimer betonların sunduğu avantajlar arasında: mükemmel mekanik dayanım, hızlı kürleşme süresi, çok iyi yapışma özellikleri, aşınma ve hava koşullarına karşı direnç, su geçirmezlik ve iyi ses ve ısı yalıtım özellikleri sayılabilmektedir (Agavriloaie L, 2012). Makine imalat sektöründe özellikle takım tezgâhı üretimiyle ilgili ilerlemelerin arttığı bugünlerimizde, gelişmiş ülkelerin çoğunda araştırmaları devam etmekte olan güncel bir yapı imalat malzemesi polimer betondur. Bu malzeme çelik ve dökme demirlere alternatif olarak geliştirilmiştir.

Polimer betonun tezgâh gövdesi yapı ekipmanı olarak uygulanmasının artıları; kolay üretilir, hafif, yüksek korozyon direnci ve en önemlisi sönüm niteliğinin metalik malzemelere kıyasla çok büyük olmasıdır. Polimer betonun sönüm değerinin, dökme demire kıyasla 4-7 kat daha büyük olduğu fark edilmiştir (Orak, 1997).

Polimer betonlarda bağlayıcı anlamında poliyester-styrene, poliüretan, epoksi, uran ve metil metakrilat polimerleri kullanılmaktadır. Polimer bağlayıcısını az kullanmak maliyeti azaltmak anlamında önem arz etmektedir. Bu anlamda bağlayıcı oranını düşürüp agrega konsantrasyonu için granülometrik bileşim iyi hazırlanmalıdır. Kompozit malzeme olarak adlandırılan polimer betonun birçok farklı bağlayıcıları bulunmaktadır, bağlayıcılarına göre kullanım alanları değişmektedir. Bu bağlayıcılar fenolik reçine, polyester reçine, epoksi reçine, vinilester reçine ve silikon reçine olarak 5 farklı çeşittir (Soykan ve Özel, 2014). Üç farklı reçineyle (polyester, vinilester ve epoksi reçine) yapılan polimer betonları incelenmiş olup; epoksi ve vinilester reçinelerin polyestere kıyasla daha iyi mekanik özelliklere sahip beton ürettiğini gözlemlenmiştir. Farklı dolgu maddelerinin (uçucu kül ve silis dumanı) polimer betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisi ile alakalı olarak bazı çalışmalar yapılmıştır. Dolgu maddelerinin eklenmesiyle polimer betonun mekanik özelliklerini iyileştirildiği görülmüştür. Basma deneyleri sonucu polimerin sünekliliğinin reçine-dolgu oranındaki azalma ile önemli ölçüde azaldığı bilinmektedir. Bunun nedeni, matrisin mukavemetinin bağlı olduğu reçine ve dolgu maddesi arasındaki bağlanma kapasitesinin azalmasıdır (Ferdous, 2020).

Beton yapıların tasarımında en önemli mekanik özelliklerden biri basma dayanımıdır. Elastik modül, epoksi reçine konsantrasyonu arttıkça artma eğiliminde olmaktadır. Polimer betonun sertliğindeki artış, epoksi reçine konsantrasyonundaki artıştan kaynaklanmaktadır (Ghassemi, 2020). Üstün kimyasal ve mekanik özellikleri, epoksi malzemelere kıyasla daha düşük maliyetleri ve geniş ticari bulunabilirlikleri ile birleştiğinde, polyester reçineleri PC bileşimlerinde en yaygın kullanılan polimer yapar. Elastisite modülü, uçucu kül konsantrasyonları da arttıkça artma eğilimindedir. Bu dolgu maddesi konsantrasyonundaki artıştan kaynaklanan PC sertliğindeki artışla ilgilidir (Gorninski, 2004). Epoksi PC'nin, yapısal ve inşaat mühendisliği alanında mükemmel olan çimento betonuna kıyasla 10 kat daha güçlü eğilme dayanımını kanıtladığı hesaba katılmıştır. Epoksi PC, çoğunlukla, yollarda, endüstriyel yapılarda, aşınma ve yıpranma yapılarının yeniden yüzey kaplaması ve dış duvarlar için kullanılmaktadır (Abdulrezaq, 2016). Normal betonda polimer reçine ile basma dayanımını ve eğilme dayanımını arttırılabilir. Reçine içeriğinin %3'ten %5'e artışı işlenebilirlikte ve ayrıca basma dayanımı ve eğilme dayanımında iyileşme sağlamıştır (Harja, 2009). Epoksi-granit küçültülmüş boyutlu parçacıklar formunda, büyük miktarlarda granit ile elde edilen epoksi reçine kompozitleri oluşturmaktadır. Başlıca çekici özellikleri, karmaşık geometrili parçaların kolay kalıplanması ve yüksek titreşim sönümlemesinin yanı sıra, basit işlemleri, yüksek elastik modülü ve birim ağırlık başına mekanik dirençleridir (Piratelli, 2010). Yüksek mukavemetli epoksi reçine esaslı polimer betonlar oldukça fazla maliyete sahiptir ve bu sebeple sınırlı alanlarda kullanılabilmektedirler. Beton endüstrisi için geliştirilen yeni polimer türleri, maliyet ve performans oranını optimize etmeyi amaçlamaktadır. Polimer tipi epoksi poliüretan akril ve sertleştirici Iasi'den "Petrü Poni" idir. Epoksi poliüretan akril beton (EPUAC) yüksek mekanik özelliklerine yakın iyi dayanıklılık özellikleri, bu betonun yüksek performanslı hafif bir beton olduğunu göstermektedir (Agavriloaie, 2012). Yüksek titreşim sönümleme kapasiteleri nedeniyle, epoksi matris granül kompozit malzemeler günümüzde hassas işleme yapan özel CNC tezgâhlarında kullanılmaktadır. Epoksi matris malzemesi iki bileşenden oluşur: Bunlar reçine ve sertleştiricidir. İdeal kürlenme için üreticinin önerdiği ideal karışım oranına uymak önemlidir (Öztürk, 2019)

2.4. Mineral Döküm

Polimer betonu çimento katkısı olmadan polimer malzeme olarak epoksi reçinesi kullanma sonucunda mineral döküm ismini alan metot ortaya çıkmıştır. Bu yöntem mineralguss, epoksi granit (granitan) olarak da adlandırılmaktadır. Dökme demir için alternatif bir malzeme olarak, mineral döküm (epoksi granit) yapılarının, daha düşük bir ağırlıkta yüksek sertlik ve sönümleme oranı gibi iyi mekanik özellikler gösterdiği bulunmuştur (Selvakumar, 2012). Taban tezgâhı gövdesi olarak taşlama makineleri veya işleme merkezlerinde mineral döküm kullanılır (Erbe, 2008). Mineral döküm, dökme demire benzer şekilde, sıkıştırma ve gerginlikte farklı dayanım değerlerine sahiptir (DEY H.J, 1991). Mineral döküm parçaların imalatında kullanılan teknoloji, dökme demir teknolojisine benzemektedir fakat burada sertleştirme işlemi soğutma yoluyla değil reçinenin kürlenmesi yoluyla yapılmaktadır. Mineral dökümü karakterize etmenin pek çok zorluğu vardır; farklı dolgu faktörleri, tanecik büyüklüğü dağılımları ve tanecik malzemeleri, kullanılan reçineler, katkı maddeleri, doğal ürünlerin dağılımı gibi parametreler sonuçta ortaya çıkacak olan bileşiğin özelliklerini etkilemektedir. Tarama sonuçları göstermektedir ki epoksi granit (granitan) veya diğer bir adıyla mineral döküm malzemeler pasif titreşim sönümleme konusunda oldukça başarılılardır. Granül boyutları çeşitliliği ve kullanılan reçine çeşitliliğiyle yapılan kompozit malzemelerin oluşturduğu tezgâhlar başarılı örnekleri sunmaktadır (Öztürk, 2019).

Mineral Döküm Özellikleri (Jackisch, 2002)

- Olağanüstü malzeme titreşim sönümleme kabiliyeti,
- Yüksek termal kapasite,
- Düşük ısı iletimi,
- Düşük yoğunluklu,
- Aşındırıcı olmayan,
- Elektrik izolatörü,
- Düşük su emme.

Mineral dökümün makine yatakları için bir yapı malzemesi olarak kullanılmasıyla, bir yandan birincil enerji talebi ve üretim maliyetleri önemli ölçüde azaltılabilir. Öte yandan, mineral dökümün mekanik ve ısı özellikleri proses güvenilirliğinde ve dinamik üretim işlemlerinin verimliliğinde oldukça artış sağlar ancak içerisindeki agregalar dolayısıyla mineral döküm numunelerini işlemek güçtür (Uhlmann, 2016). Polimer ve epoksi beton takım tezgâhı yapılarının imalatında kullanılan mineral döküm teknikleri, yüksek sönümlenme katsayısı ve yeterli mekanik özelliklere sahip parçalar üretir. Aynı sertlik için, bir mineral döküm yapısının ağırlığının dökme demirinkinden daha düşük olduğu bulunmuştur. Mineral döküm kompozit yapılar düşük ısı iletimi, düşük su emilimi ve düşük yoğunluk gibi olumlu özellikler gösterir (Erbe, 2008).

Epoksi Granit, seçilmiş, dereceli ve karışık granit agregaları ile birlikte, bağlayıcı ajan, reaksiyon reçinesi ve sertleştiricinin soğukla tepkimesi sonucu meydana gelmektedir. Epoksi granit, 'Sentetik granit' olarak da bilinir. Epoksi granit bileşimleri, makine tezgah gövdelerinde ve hassas makine tezgahlarında kullanılır. Dökme Demirden 10 kat daha büyük, granitten 3 kat daha büyük bir iç sönümlenme faktörüne sahiptir (Kailas, 2017).

Basma gerilmesi altındaki bir beton numunesinin deformasyonu ölçülerek statik elastik parametreler, beton içerisinde yayılan elastik dalgalar kullanılarak ise dinamik elastik parametreler belirlenmektedir. Ancak statik testlerde, sıkıştırma kuvvetleri numunenin hacminde bir azalmaya neden olan deformasyonlar üretirken, dinamik testler çok az deformasyona neden olmakta veya deformasyona neden olmamaktadır. Dinamik yöntemler ise basit, hızlı ve daha ekonomik olması nedeniyle oldukça avantajlıdır.

Sismik hızların numune şeklinden etkilenmemesi nedeniyle küp ve silindirik numunelerde veya yerinde ölçü alınabilme imkânına da sahiptir (Ekin, 2020)

Ateş ve ark yaptığı çalışmada kuvars tozları ile meydana gelmiş epoksi kompozitlerin dinamik davranışlarını incelemişlerdir. Elek analizleri ile kuvars tozları 106 μm ve 125 μm ölçülerindedir ve epoksi reçine ile 30 dakika boyunca oda sıcaklığında 2 dakika boyunca karıştırılmıştır. Oluşturulan kompozit malzemenin elastik modülü bulunmuştur. Basma testi için deney numune boyutu, polimer beton ve uygulamaları için DIN 51290 – Bölüm 3, ISO 2736- 2, ISO 4012 standartlarında olmak üzere, çap ve yükseklik ölçüleri 50mm ve 100 mm şeklinde tasarlanmıştır. Kompozit deney numuneler, çelik ve kestamit esaslı malzemelerden üretilmiş olan kalıplara dökülmüştür. Kalıpların yüzeylerine 2 kez vaks uygulanmış ve 20 dakikalık süreyle bekletilip parlatılmışlardır. Polyester reçine katkılı polimer beton şeklinde üretilen malzemelerin destek elemanı olmak üzere çalışma gerçekleştirilmiştir. Epoksi, polyester ve Polimetil metakrilat (PMMA) reçineli betonların küçülmesi 500x90x10 mm ölçülerindeki numunelerde incelenmiş olup reçine oranı %20 olarak belirlenmiştir. Deney sonuçları, zamana bağlı olarak büzülme şiddetti epoksi reçineli katkılı betonda 0,5mm/m, PMMA reçine katkılı betonda 5mm/m değerindedir. Bu kapsamda hassas parça üretiminde epoksi reçine katkılı beton önerilmektedir (Ateş ve Aztekin, 2011).

Soykan ve ark. mermer tozu ve tane boyutlarının değişimine bağlı olarak basma ve eğilme mukavemeti gibi mekanik özelliklerin değişimini incelemişlerdir. En büyük eğilme, basma ve schmidt şiddetleri 0.150-0.180 mm tane boyut skalasındaki mermer tozunun olduğu polimer betonlardan meydana gelmiştir. Bu ölçülerde yapılan polimer betonlar, mermer tozlarının en az boyut farkının oluşturduğu elekler arası mermer tozlarını içermektedir (Soykan, 2012).

Ferdous ve ark. üç farklı reçineyle (polyester, vinilester ve epoksi reçine) yapılan polimer betonları incelemiş ve epoksi ve vinilester reçinelerin polyestere kıyasla daha iyi mekanik özelliklere sahip beton ürettiğini gözlemlemiştir. Farklı dolgu maddelerinin (uçucu kül ve silis dumanı) polimer betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Dolgu maddelerinin eklenmesinin polimer betonun mekanik özelliklerini iyileştirdiği sonucuna varmışlardır.

Su absorpsiyonunun epoksi reçine sisteminin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelendiğinde emilen sudaki artışla birlikte gerilme özelliklerinde kademeli bir azalma bulunmuştur. Bununla birlikte, reçine-dolgu oranı ve matris-agrega oranının etkileri belirsizliğini korumaktadır, ancak bu parametreleri optimize etmenin önemli performans ve maliyet etkileri olabilir. Beton silindirin nominal boyutu 50 mm çap ve 100 mm yüksekliğindeyken, kiriş numunesi 25×25×250 mm ve 200 mm açıklıkta test edilmiştir. Reçine, agregaları birbirine bağlar ve polimer betona mukavemetini verdiği gözlemlenmiştir. Düşük reçine içeriğine sahip polimer beton, kırılğan bir ürünle sonuçlanmış olup, çok kuru üzerinde çalışılması zor bir materyal olmuştur. Epoksi bazlı polimer matriks hava, su, tuzlu su çözeltisi ve hidrotermal ortamlara karşı mükemmel dayanıklılık göstermektedir. Optimum reçine-dolgu oranı, katmanlı bir kompozit malzeme elde etmek için 70:30 ve homojen bir agregalar dağılımı ile homojen bir malzeme elde etmek için 60:40 olduğu bilinmektedir. Ayrıca, performans ve maliyet arasında iyi bir denge sağlamak için optimum matris-toplam oranı 1:1.35'tir. Karışım tasarımında reçine-dolgu oranı ve matris-agrega oranının dikkatli bir şekilde seçilmesi, epoksi polimer betonun maliyet, koku ve toksisite gibi bazı sınırlamaların azaltılabileceğini göstermişlerdir.

Ghassemi ve ark. Epoksi polimer betonu (EPC), bağlayıcı içeriğinin rolünü değerlendirebilmek için ağırlıkça % 10 ve 12 epoksi reçineyi agregalarla karıştırarak yapmışlardır. Her epoksi reçine oranı için reçine ve sertleştirici yaklaşık 5 dakika karıştırılarak homojen bir karışım elde etmişlerdir. EPC'nin sertliğindeki artış, epoksi reçine konsantrasyonundaki artıştan kaynaklanmaktadır. Epoksi polimer beton genel olarak, bir yıl maruz kaldıktan sonra sıradan çimento betonuna kıyasla kimyasal saldırılara karşı daha iyi direnç göstermiştir. Asidik ve alkali ortamların beton numunelerin basma ve çekme dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuşlardır.

Harja, PC'nin bileşimindeki reçine miktarının hem sıkıştırma hem de eğilme mukavemeti üzerinde büyük etkisi olduğunu, %20 ve %25 reçine içeren PC numunesinin maksimum basma, eğilme mukavemeti ile sonuçlandığını bildirmiştir.

Kaba ve ince agrega, karışımının en az boşluk içeriğine ve en yüksek numune yığın yoğunluğuna sahip olması için orantılıdır. Epoksi reçine içeriği toplam çimento ağırlığının %3'ü ve %5'i alınmıştır. Sonuç olarak normal betonda polimer reçine ile basma dayanımını ve eğilme dayanımını arttırılabilir. Reçine içeriğinin %3'ten %5'e artışı işlenebilirlik, basma dayanımı ve eğilme dayanımında iyileşme sağlandığını göstermiştir.

Agavriloaie ve ark. çalışmalarında polimer tipi epoksi poliüretan akril ve sertleştiricisini kullanmışlardır. İki tür agregalar karıştırmışlardır, ardından agrega karışımı kalıplara yerleştirilip ve kalıpları reçine ile doldurmuşlardır. Bir titreşim masası, karışımların sıkıştırılmasını gerçekleştirmiştir. Elastisite modülünü belirlemek için 25×25×80 mm'lik üç numune kullanılmıştır. Epoksi poliüretan akril beton (EPUAC) yüksek mekanik özelliklerine yakın iyi dayanıklılık özellikleri, bu betonun yüksek performanslı hafif bir beton olduğunu göstermiştir. Mikro yapı homojendir ve boşlukların çapı küçüktür ve homojen olarak dağılmıştır, termal iletkenlik için uygundur. Yüksek mekanik ve dayanıklılık özelliklerine sahip bu tip polimer beton (EPUAC), kimyasal ve termal korumanın gerekli olduğu endüstriyel binalar gibi farklı inşaat alanlarında veya şoklara maruz zeminleri gerçekleştirmek için yalıtım veya su yalıtım malzemesi olarak kullanılabilirliği gösterilmiştir.

Piratelli ve ark. granit kompozitlere (agregalara) ağırlıkça %15 ve %20 olmak üzere iki farklı epoksi oranıyla karışım hazırlamışlardır. Daha sonra malzeme, granit parçacıklarının epoksi ile ıslanmasına ve karışımın homojenleşmesine izin verecek şekilde granit parçacık topaklanmasını önlemek amacıyla 20 dakika boyunca karıştırılmıştır. Çalışmalarının referansı Fritz Studer'in Granitan patentiyile aldığı üründür. %15 epoksi oranıyla hazırladıkları numunelerine A ismini, %20 epoksi oranıyla hazırladıklarına numunelerine B ismini vermişlerdir. A ile B numunelerinin sönümleme kapasitelerini ölçerek A, 0.014'lük logaritmik azalmanın standart sapmasını sağlamış, B' numunesi ise 0.007 olduğu gözlenmiştir. İncelenen granit-epoksi numunelerinin logaritmik azalma değerleri, yaklaşık üç kat oranında dökme demire göre daha yüksek olduğu aynı hacimde malzeme için gri dökme demirden önemli ölçüde daha yüksek bir sönümleme etkisine sahip olduğunu gösterilmiştir.

Literatür çalışmalarıyla kıyaslandığında epoksi reçineli polimer betonun maliyetli olmasına rağmen titreşim sönümlleme söz konusu olduğunda bu amaca uygun olduğu görülmüştür.

Öztürk, yoğunluğu $2,8 \text{ gr/cm}^3$ Bazalt granülleri ve yoğunluğu $2,32 \text{ gr/cm}^3$ silis kumu kullanmıştır. Epoksi reçinesi olarak bisephanol A epoksi matriks malzemesi, reçine ve aktivatör olmak üzere iki ayrı komponentten oluşmaktadır. Epoksi oranını katı karışımının ağırlıkça %12 ve %20 seçmiştir. Kalıp içerisine kompozit malzemesinin doldurduktan sonra çekme deneyine tabii tutan yazar çekme testi ve titreşim sönümlleme testi numunelerinin hazırlığında cam elyaf katkılı ve cam elyaf katkısız olmak üzere iki çeşitte hazırlamıştır. %12 matriks malzeme oranından düşük yüzdelerde matriks malzeme numune hacimlerinin tamamını dolduramadığını gözlemlemiştir. Bu durumda sağlıklı sonuçlar alınamayacağı için alt sınır olarak %12 matriks malzeme içeriği belirlenmiştir. Üst sınır olarak %20 lik epoksi matriks malzeme sınırının belirlenmesinde esas neden matriks malzemenin kalıp derinliğini aşarak, homojen olmayan bir yapıya sebebiyet vermesidir. Titreşim sönümlleme testlerinde epoksi granit malzemenin yüksek oranda olan sönüm kabiliyeti doğrulanmıştır. Epoksi matriks malzemenin oranındaki artış ile birlikte titreşim sönümlleme noktasında da iyi sonuçlar vermiştir.

GG26 kır dökme demir ile karşılaştırıldığında 3 kat daha fazla titreşim sönümlleme kabiliyetine sahiptir. Epoksi granitin sertlik değeri dökme demirle kıyaslandığında düşük olduğu görülmüştür bu ise tezgâh kullanımları için sorun teşkil etmemektedir. Ateş yaptığı çalışmada hazırladığı polimer betonlar için polyester ve epoksi reçine, kuvars kullanmıştır. Eğilme dayanımının, granülometri dağılımı ve reçine oranlarıyla tiplerine bağlı olarak değiştiği belirlenmiş ve karışını optimizasyonu inceleyerek şu sonuçlara varmıştır. Dolgu malzemesi (reçine) miktarı düştükçe dayanım düşmektedir. Eğilme yük değerleri iki reçine türü için benzer değerlerdedir. Ancak eğilme gerilmesi farklılık göstermektedir. Dolgu malzemesi içeriğinin değişimin tane büyüklüklerinin homojen olmaması sebebiyle bazen çok, bazen daha az etkilediği görülebilmektedir.

Gürsoy çalışmasında kompozit çubukların çekme-basma, eğilme ve burulma durumlarındaki elastisite, kayma modüllerini ve modal sönüm oranlarını deneysel titreşim analizi yardımıyla belirlemiştir. Kompozit çubukların elastisite ve kayma modülleri bulunurken frekans bölgeleri incelemeleri yapılmış, modal sönüm oranları bulunurken Fourier dönüşümden yola çıkılmıştır. Çalışma sonucunda deneysel titreşim analizi ile elde edilen elastisite ve kayma modülü değerleri ile mekanik deneylerle elde edilen elastisite ve kayma modülü değerlerinde oldukça iyi uyum olduğunu gözlemlemiştir.

Daoui ve ark. üzerinde çalıştıkları materyallerin titreşim bölgesindeki elastite modülünün belirlenmesi için bir metot sunmuşlardır. Bu metot, elastik kirişler teorisine dayanan doğal titreşimlerden kaynaklanan doğal frekans spektrumunun araştırılmasına ve yorumlanmasına dayanmaktadır. Çalışma, doğal frekansları gözlemlemek için yeterince uzun olan doğal kompozit kirişlerin uzunlamasına titreşimlerinin klasik testlerinden oluşmaktadır. Bu tanımlama yöntemi teorik ve deneysel değerler arasında, özellikle rezonans frekansları için modal parametrenin değerlendirilmesi ve kullanılan malzemelerin esneklik modülünün tanımlanması arasında iyi bir ilişki olduğunu göstermişlerdir.

Klausbruckner çalışmasında doğal frekansların ve mod şekillerinin kesit alanı üzerindeki bağımlılığına ve analitik analizi ile ilişkilendirilmiştir. C-kiriş davranışı çalışmasında, sonlu elemanlar yöntemi, levha deformasyonlarının yanı sıra burulma, dönme ve eğilme gibi küresel kiriş hareketleri de dikkate alınmıştır. Mod şekilleri ve ilişkili frekanslar sağlar ve bu teknikten elde edilen rezonans verileri genellikle deneysel sonuçlarla iyi bir şekilde karşılaştırılabilmektedir. Cho (Cho ve ark. 2011) yaptığı çalışmada, takım tezgâhlarının yüksek performansını sağlamak için bileşenlerin kütlesini, mevcut yapının ağırlığını azaltmak, yapısal sertliği ve sönümleme kapasitesini artırmak için karbon/epoksi kompozitler ve reçine beton kullanılarak küçük bir masa üstü takım tezgâhı yapısı tasarlamış ve üretmişlerdir. Çalışma sonucunda yapının %36,8 daha hafif olduğunu ve daha yüksek kayıp faktörleri (%2,82–3,64) ile yapısal sertliğin %16 arttığını göstermişlerdir.

Guan (Guan ve Ark. 2017) çalışmalarında deneysel modal analiz yöntemi ile, üç farklı kalınlıktaki (12, 15 ve 18 mm) üç tam boyutlu orta yoğunluklu lif levha (MDF) ve üç tam boyutlu yonga levha (PB) panel üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneysel modal testin sonuçları, teorik bir modal analizin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda ise dört düğümlü desteğin, tam boyutlu WCP'lerin elastik özelliklerini belirlemek için serbest titreşim testinde kullanılabileceğini göstermektedir.

Antunes (Antunes ve ark. 2020) çalışmalarında değişken sertlikteki kompozit laminatın titreşim modlarını, deneysel modal analiz ile elde edilip ve teorik/matematiksel modellerden elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. Doğal frekansları, modal sönümleme oranları ve titreşim mod şekilleri tanımlanmıştır. Sonuç olarak değişken sertlik kompozit lamine plakaların teorik modellerini doğrulamak için kullanılabilir olduğu kanısına varılmıştır. Arıoğlu (Arıoğlu, 1999) yaptığı çalışmada iri agrega basma mukavemetinin betonun elastite modülü anlamındaki etkisini çeşitli amprik yaklaşımlar oluşturarak incelemiş ve çeşitli sonuçlar elde etmeyi başarmıştır.



Şekil 2.3. Mineral döküm doldurulmuş tezgâh şasesi.

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Granüllerin Hazırlanması ve Kalıp Tasarımı

Sakarya İnci Beton firmasından üç farklı ölçülerde agregalar temin edilmiştir. Taşlar Geyve taş ocağında öğütülmüştür. Agregalar çakıl, orta boyutlu ve ince kum olarak adlandırılmaktadır. Agregaların ölçüleri sırasıyla 2-4mm, 0,5-2mm ve 0,5mm den küçük olacak şekilde elek analizlerinden geçirilmiştir. Agrega bileşimleri tayin edilirken TS-EN 1744-1 + A1:2013, TS-EN 1367-2:2010 standartlarından yararlanılmıştır.



Şekil 3.1. Elek analizleri için kullanılan elekler.

Elek analizleri için Şekil 3.1.'de gösterilen Dinç makine firmasının paslanmaz çelikten üretilmiş elekleri kullanılmıştır. 0,5mm-2mm-4mm'lik eleklerden sırasıyla geçen agregalar katı karışımı oluşturmuştur.

Tablo 3.1. Agrega kimyasal bileşimi.

SO ₃	S	Cl	MgSO ₄
%0,07	%0,06	%0,001	%1

Tablo 3.2. Katı agrega fiziksel özellikleri (İTÜ Maden Fak.)

Özellik	Değer
Kuru birim hacim ağırlığı	2,53 gr/cm ³
Doygun birim hacim ağırlığı	2,61 gr/cm ³
Su emme (%)	3,2
Sertlik (Mohs)	3
Tek eksenli basınç direnci	799 kg/cm ²

Kullanılacak olan granüllerin üstünde bulunan tozların temizlenmesi gerekmektedir. Granüller üzerinde bulunan toz zerrecikleri, granüller temizlenmediği takdirde granül ile matris malzeme arasında bir sınır tabakası oluşturarak, granül ile matris malzemenin adhezyon bağı oluşturmasını engelleyecektir. Bu nedenle agregalar kompozit karışım hazırlanmadan önce su ile yıkanmış (Şekil 3.2.) ve fırın yardımıyla 175°C'de 1 saat süre ile kurutulmuştur (Şekil 3.3.).



Şekil 3.2. Yıkama işlemi.



Şekil 3.3. Kurutma işlemi.

Basma deney testi için oluşturulan numunenin boyutları, polimer beton ve uygulamaları için DIN 51290 – Bölüm 3, ISO 2736- 2, ISO 4012 standartları, çap 50mm ve yükseklik 100 mm olacak şekilde kalıplar hazırlanmıştır. Kalıp olarak Ø60 Ø51 ölçülerinde ST 37 malzemedan kesilmiş borular kullanılmıştır. Etli boru ilk olarak 100mm ölçüsünde testere ile kesilmiştir. Ardından enine kesilerek ikiye ayrılan boruların bir taraflarına menteşe kaynatılarak kalıp formuna getirilmiştir (Şekil 3.4.).



Şekil 3.4. Bir yüzeyine menteşe takılmış kalıplar.

Kalıbın diğer açık kalan kısmına ise çanta kilidi takılarak (kaynatılarak) kalıbın açılıp kapanması sağlanmıştır (Şekil 3.5.).



Şekil 3.5. Çanta kilidi takılmış kalıp.

Kalıpların iç yüzeyine doldurma esnasında kolay yapışması, çıkarılma esnasında da kolay çıkarılması için ince taş ile taşlanmıştır (Şekil 3.6. ve Şekil 3.7.).



Şekil 3.6. İnce taşlama fırçası.



Şekil 3.7. Taşlama işlemi.

Kalıplara doldurulan mineral döküm numuneleri 1 tam gün sonra kalıptan çıkarılmıştır. Bazı numunelerde epoksi karışımının kalıbın kapandığı kısımlara dolması sebebiyle kalıptan çıkarımı güç olmuştur.

İç duvar yüzeyleri ince taş ile taşlanan kalıplarda parlak, kaygan bir görüntü elde edilmiştir (Şekil 3.8.). Bu sayede kalıp ayırıcı kullanımı ardından yapılan döküm işleminden sonra parça kolaylıkla kalıptan ayrılmaktadır.



Şekil 3.8. Taşlama sonrası kalıplar.

Tablo 3.3. Agrega formları.

Malzeme	Elek aralığı (mm)
Çakıl Taşı	2-4
Orta Boyutlu Kum	0,5-2
İnce Kum	<0,5<

Tablo 3.3.'de elek aralıkları verilen malzemelerin çalışma içerisinde kullanılan isimleri gösterilmektedir. Farklı formlarda aynı malzemedan öğütülmüş Tablo 3.1.'de kimyasal bileşimi verilen malzemenin yoğunluğu $2,82 \text{ gr/cm}^3$, ince kum ismiyle belirtilen malzemenin yoğunluğu ise $2,27 \text{ gr/cm}^3$ 'tür. Bu çalışmada kullanılan tüm test numuneleri ve kompozit karışım reçeteleri Tablo 3.4.'de verilmiştir.

Tablo 3.4. Karışım miktarları. (Rakamlar birim değeri ifade etmektedir. Birim değer gram olarak alınmıştır.)

Numune Kodu	Orta Boyutlu Kum Miktarı (Birim)	Çakıl Taşı Miktarı (Birim)	İnce Kum Miktarı (Birim)	Epoksi Reçine Miktarı (Birim)	Toplam Miktar (Birim)
1A	50	25	25	8	108
1B	50	25	25	12	112
1C	50	25	25	16	116
2A	55	10	30	15	110
2B	55	20	30	15	120
2C	55	30	30	15	130
3A	60	25	10	15	110
3B	60	25	20	15	120
3C	60	25	30	15	130

Tablo 3.4.'de rakamlar birim değeri ifade etmektedir. Bu çalışmada birim değer gram olarak alınmıştır. Basma ve titreşim testleri için hazırlanan reçetenin yüzde ifadeleri Tablo 3.5.'de verilmiştir.

Tablo 3.5. Karışımlarda kullanılan malzemelerin % oransal miktarları.

Numune Kodu	Orta boyutlu Kum Oranı (%)	Çakıl Taşı Oranı (%)	İnce Kum Oranı (%)	Epoksi Reçine Oranı (%)	Toplam Miktar (%)
1A	46,3	23,1	23,1	7,4	100,0
1B	44,6	22,3	22,3	10,7	100,0
1C	43,1	21,6	21,6	13,8	100,0
2A	50,0	9,1	27,3	13,6	100,0
2B	45,8	16,7	25,0	12,5	100,0
2C	42,3	23,1	23,1	11,5	100,0
3A	54,5	22,7	9,1	13,6	100,0
3B	50,0	20,8	16,7	12,5	100,0
3C	46,2	19,2	23,1	11,5	100,0

3.2. Epoksi Reçinesi

Epoksi reçinesi olarak Marker firmasının ACHY SYSTEM A350 marka ürünü kullanılmıştır. İdeal kürlenme için üreticinin tavsiye ettiği uygun karışım 2/1 oranı sağlanmalıdır. Bu oran 2/1 şeklindedir. Polyester reçine ile epoksi reçinenin cam değişim ısıları kıyaslandığında farklılık gözlenmektedir. Polyester epoksiye göre daha çok toksiklidir. Polyester reçinenin çevresel dayanıklılığı düşük düzeydedir. Epoksi reçinede ise çevresel dayanıklılık yüksek düzeydedir.

3.3. Deneysel Modal Analiz

Modal analiz, bir yapının doğal dinamik özelliklerini; doğal frekanslar, sönüm değerleri, Mod şekillerini belirlemek için yapının dinamik davranışı üzerinde matematiksel bir model oluşturarak, kullanma sürecidir. Modal analiz hem teorik hem deneysel teknikler içermektedir (Baldan, 2018). Titreşim testleri ile elde edilen verilerin yorumlanması için RT Photon PRO programı ve verilerin toplanması için ise Brüel&Kjaer Photon + Dynamic Signal Analyzer cihazı kullanılmıştır. Deneysel modal analiz yöntemiyle her bir kirişin doğal frekans ve sönüm oranları, FRF (Frekans Cevap Fonksiyonu) fonksiyonları yardımıyla elde edilerek kıyaslamalar yapılmıştır. Tablo 3.3.'de verilen karışım oranlarına göre 20x25x480 ölçülerinde 9 adet test numunesi hazırlanmıştır.

Titreşim testleri için hazırlanan numuneler için kablo kanalı kalıp olarak kullanılmıştır (Şekil 3.9.). Her bir karışımdan üç adet numune dökülmüş ve bunların test ve analiz sonuçlarının ortalamaları değerlendirmeye alınmıştır.



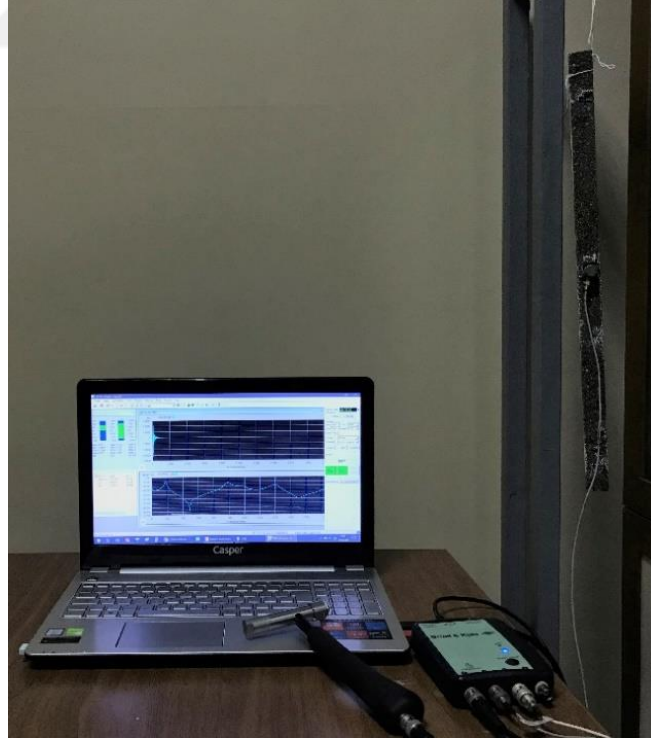
Şekil 3.9. 25x25 Kablo kanalı.

Deneyler kapsamında Brüel&Kjaer 8206-002 model darbe çekici, Brüel&Kjaer 4517-002 ve 4533-B-002 model ivmeölçer kullanılmıştır. İvmeölçerin hassasiyeti sırasıyla 10,25 mV/g ve 482,7 mV/g'dir. İvmeölçerler Şekil 3.10.'da gösterilen P1, P2 ve P3 noktalarına yapıştırılıp, vuruş noktası P1 seçilmiştir.

Titreşim verilerinin toplanabilmesi için Brüel&Kjaer Photon+ Dynamic Signal analizörü kullanılmıştır. Titreşim testleri ile elde edilen FRF'ler, Bruel&Kjaer RT Pro Photon yazılımı ile elde edilerek yorumlanmıştır. Frekans çözünürlüğü 1Hz seçilmiştir. Örnek modal analiz deney ekipmanları Şekil 3.10.'da, Modal analiz deney sistemi Şekil 3.11.'de ve Darbe Çekici ise Şekil 3.12.'de verilmiştir.



Şekil 3.10. Titreşim testlerinde kullanılan numuneler ve ivmeölçer yapıştırılma noktaları.



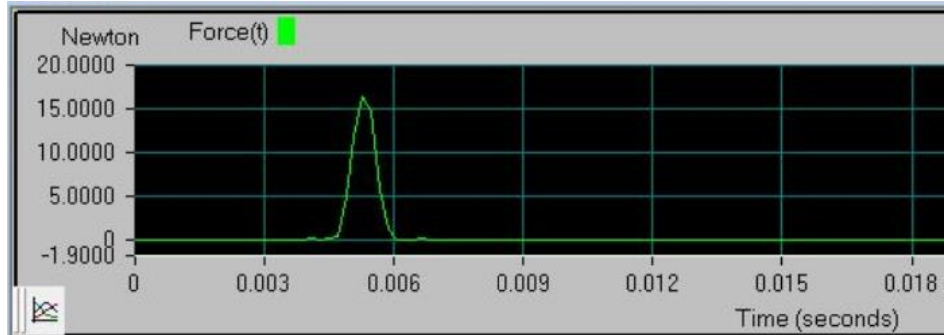
Şekil 3.11. Modal analiz deney sistemi ve giriş.



Şekil 3.12. Brüel&Kjaer Type 8206-002 model darbe çekici.

Deney düzeneğinde, test numuneleri tek noktadan pamuk ipliği ile asılarak serbest halde hareket etmeleri ve çekiç ile darbe verildiğinde salınımın numune tarafından sönümlenmesi ve salınım esnasında ivme sensörünün ve sensör kablusunun sonuçları etkilemeyecek şekilde serbest halde konumlandırılması sağlanmıştır. İvme sensörü numuneler üzerine Japon yapıştırıcısı ile sabitlenmiştir.

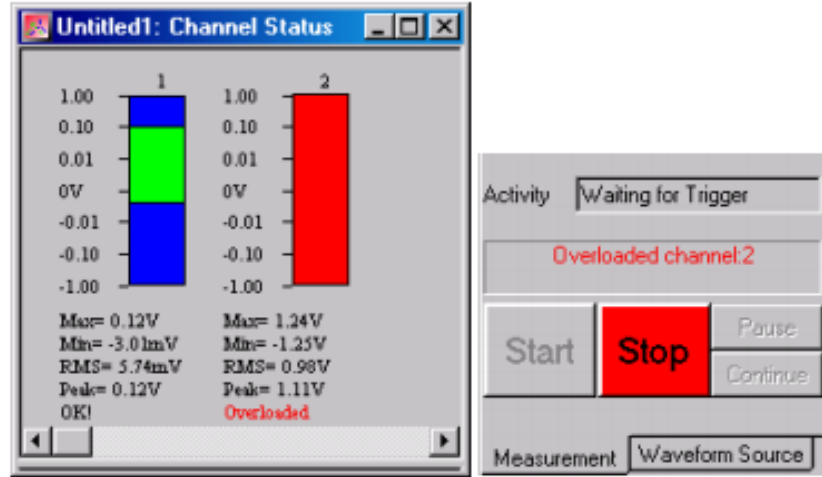
Darbe çekici ile numuneye uygulanan darbenin tek bir darbe olması, darbe büyüklüğünün grafikte tek bir düzgün pik olması gerekmektedir (Şekil 3.13.).



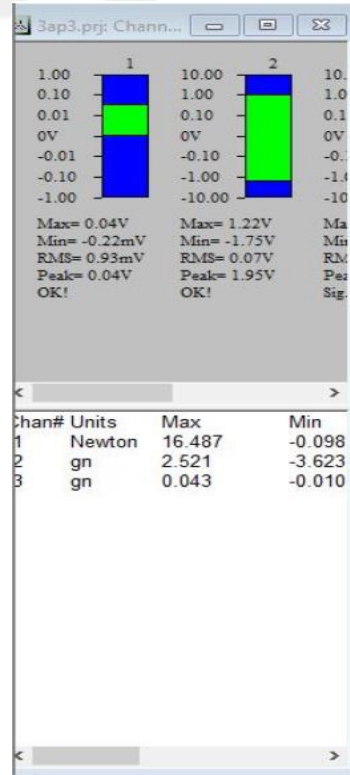
Şekil 3.13. Kuvvet zaman grafiği.

Takip edilmesi gereken bir başka koşul da aşırı yüküdür. Bu, uyarma veya yanıt seviyesi çok yüksek olduğunda, sensör analizördeki maksimum giriş kanalı voltaj limitinden daha büyük bir voltaj ürettiğinde meydana gelmektedir.

Cihazda darbe çekicinin (*hammer*) ya da ivmeölçerin fazla yüklenmesi durumunda aşırı yükleme (*overload*) hatası vermektedir (Şekil 3.14.). Vuruş esnasında şiddet yüksek değerlere çıkar ise ivmeölçer ya da darbe çekici sensörü aşırı yük uyarısı vermekte ve vuruşun tekrarlanması gerekmektedir. Deneyler esnasında ivmeölçerde ve darbe çekicinde aşırı yükleme olmamasına dikkat edilmiştir (Şekil 3.15.).



Şekil 3.14. Aşırı yükleme hatası ekranı.



Şekil 3.15. Modal analiz voltaj uyarı ekranı.

3.4. Basma Testleri

Basma testi için bilgisayar kontrollü 250 kN kapasiteli DARTEC marka çekme/basma test cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.16.).



Şekil 3.16. Basma cihazı.

Cihazda basma testi için ASTM D638 standardı uygulanmıştır. Basma testlerinde, 9 farklı reçete için 27 numune hazırlanmıştır (Şekil 3.17.).



Şekil 3.17. Basma testi numuneleri.

Üretilen numunelerin paralellliği önem arz etmektedir. Alt ve üst sınır yüzeyleri birbirine paralel olmayan numunelerin test sonuçları dikkate alınmamıştır.



Şekil 3.18. Sınır yüzeyleri paralel olmayan 3c1 ve 3b3 numunesi.

Numune yüzeyleri birbirine paralel olması sağlanması amacıyla ince taşlama cihazı yardımıyla bazı numunelerinin sınır yüzeyleri taşlanmıştır.

Basma test numuneleri karışım hazırlanırken öncelikle agregalar birbiri içerisinde karıştırılmıştır. Epoksi ve epoksi sertleştirici ayrı bir kapta birbiri içerisinde etkileşim vermek üzere karıştırılıp, katı karışıma ilave edilmiştir. Epoksi ve epoksi sertleştiricisi karıştırılırken gaz kabarcıklarının oluşmamasına dikkat edilmiştir.

Karıştırma esnasında oluşan hava kabarcıklarının karışım içerisinden vakum ile uzaklaştırılması tavsiye edilmektedir. Ancak vakum sistemimizin var olmaması nedeniyle hava kabarcıklarının kompozit sistemden tümü ile uzaklaştırılması mümkün olamamıştır. Bununla birlikte tüm test numunelerinin aynı koşullarda hazırlanmış olması nedeniyle ve elde edilen verilerin mukayeseli analizlerinin yapılacağı göz önüne alındığında vakum sisteminin kullanılamamış olmasının sonuçların mukayesesinde bir sorun teşkil etmeyeceği değerlendirilmiştir.

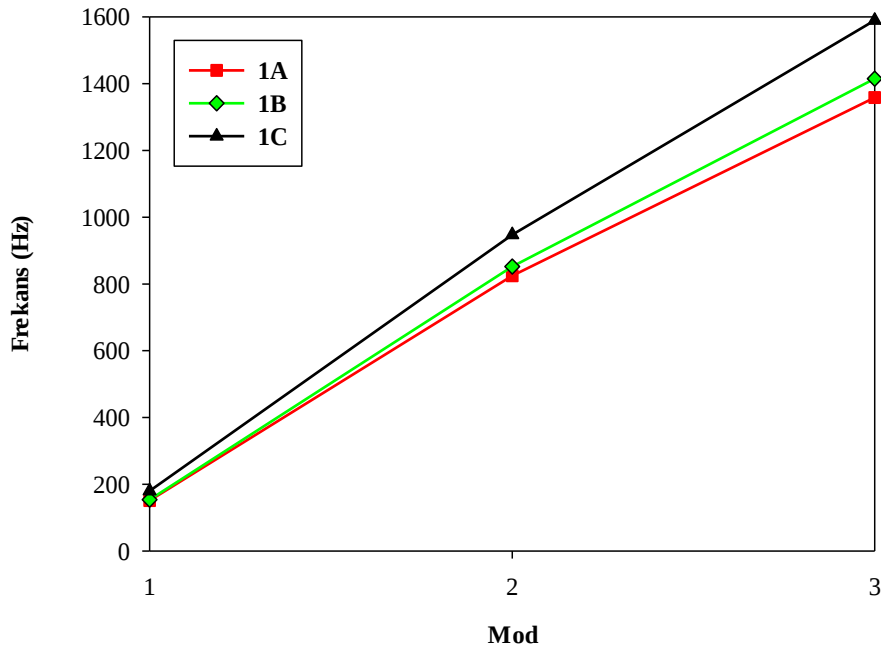
Hazırlanan 9 farklı grup için oluşan 27 adet numunenin elastik modül ve yoğunluk değerlerinin ortalamaları alınarak raporlanmıştır.

BÖLÜM 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Titreşim Sönümleme Testleri Sonuçları

Üç farklı grup ve 9 farklı reçete sonucu oluşan 9 adet numunenin deneysel modal analiz verileri incelenerek, her bir numune için Mod frekansları ve sönüm oranları değerleri üzerine kıyaslamalar yapılmıştır. Epoksi reçinesine oranının değişimine ait inceleme sonuçları Şekil 4.1. ve Şekil 4.2.'de gösterilmiştir.

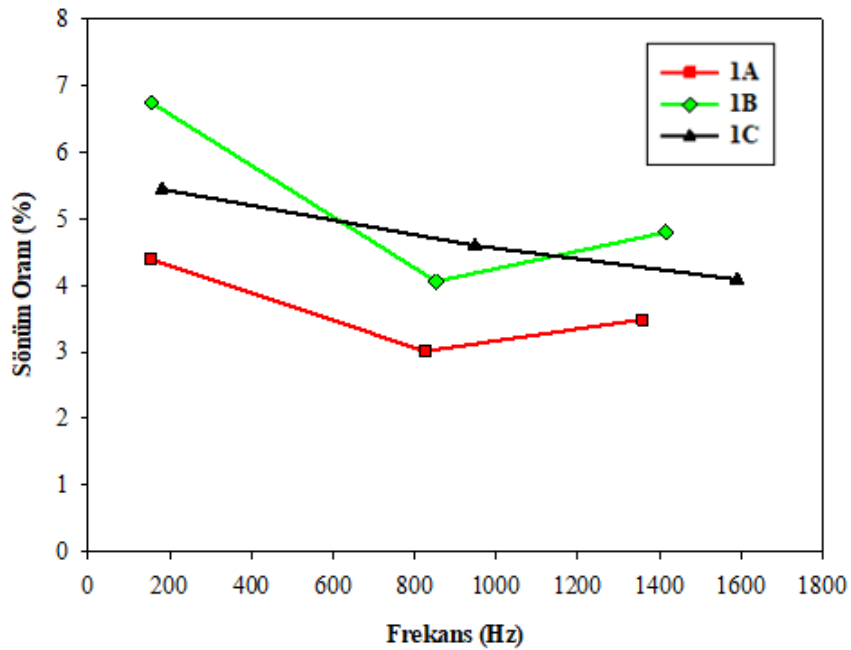
Şekil 4.1.'e göre epoksi reçinesi oranının artışı ile kiriş test numunesinin doğal frekansı da yükseltmektedir. Yüksek frekanslarda ürünün rijitliği arttırmaktadır. 1A ve 1B numunelerinin frekansları birbirine yakınken epoksi reçinesi miktarı en yüksek olan (bk. Tablo 3.3.) 1C numunesinin frekansı tüm modlarda diğer grup reçetelere göre gözle görülür bir şekilde yüksek gerçekleşmiştir (Şekil 4.1.). Böylelikle epoksi reçine oranının artışı ile malzeme rijitliği de artmaktadır.



Şekil 4.1. 1 nolu reçete mod-frekans grafiği.

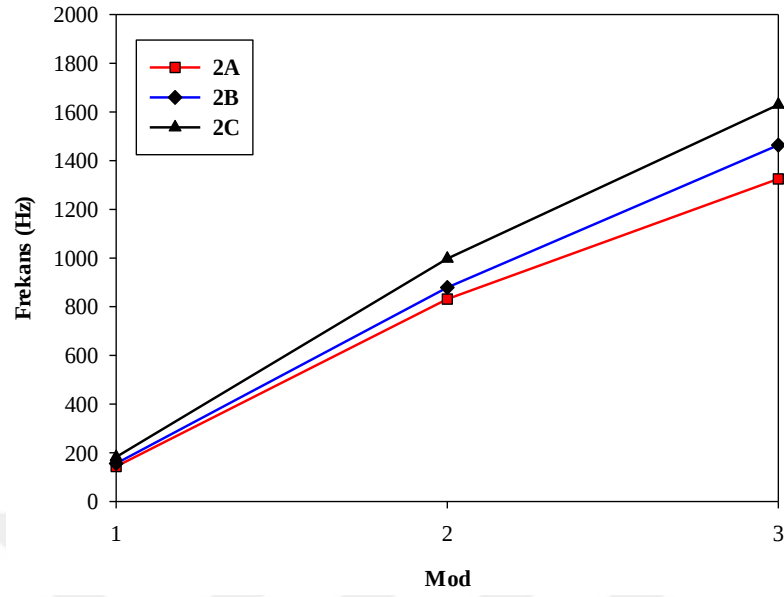
Şekil 4.2.'de epoksi reçine katkısının malzeme içerisindeki sönüm oranına etkisi incelenmektedir. Epoksi reçine oranının, numunenin sönüm oranına olumlu katkı yaptığı görülmektedir. Epoksi oranının artması ile sönüm oranı da her karışım için artmıştır

Epoksi reçine katkısının %4 artışı sönüm oranını yaklaşık %2 oranında arttırmaktadır. Ancak daha fazla epoksi-reçine katkısı sönüm oranının farklı frekanslarda etkisinin değişmesine neden olmaktadır. Bu da kütle artışından ve reçine etkisinden kaynaklanmaktadır.



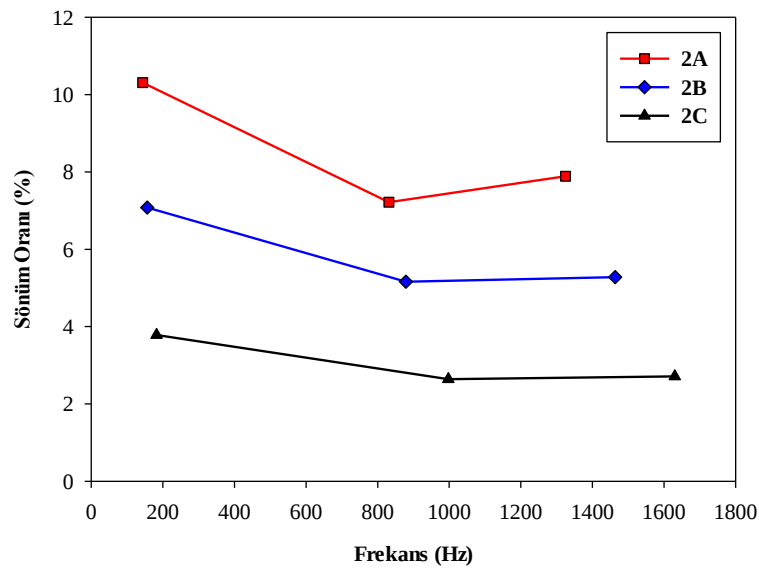
Şekil 4.2. 1 Nolu reçete Mod frekansı – sönüm oranı grafiği.

Çakıl taşı katkısının dinamik özelliklere etkisi Şekil 4.3. ve Şekil 4.4.'de verilmiştir. Şekil 4.3. incelendiğinde, sabit epoksi-reçine karışımında, çakıl taşı miktarının artması doğal frekansın artmasına neden olmaktadır. Çakıl taşının frekansa etkisi yüksek frekanslarda daha fazladır. Frekans yükseldikçe, çakıl taşı ürünü daha rijit hale getirmektedir. Çakıl taşı oranının artışıyla frekansın artışı orantısaldır.



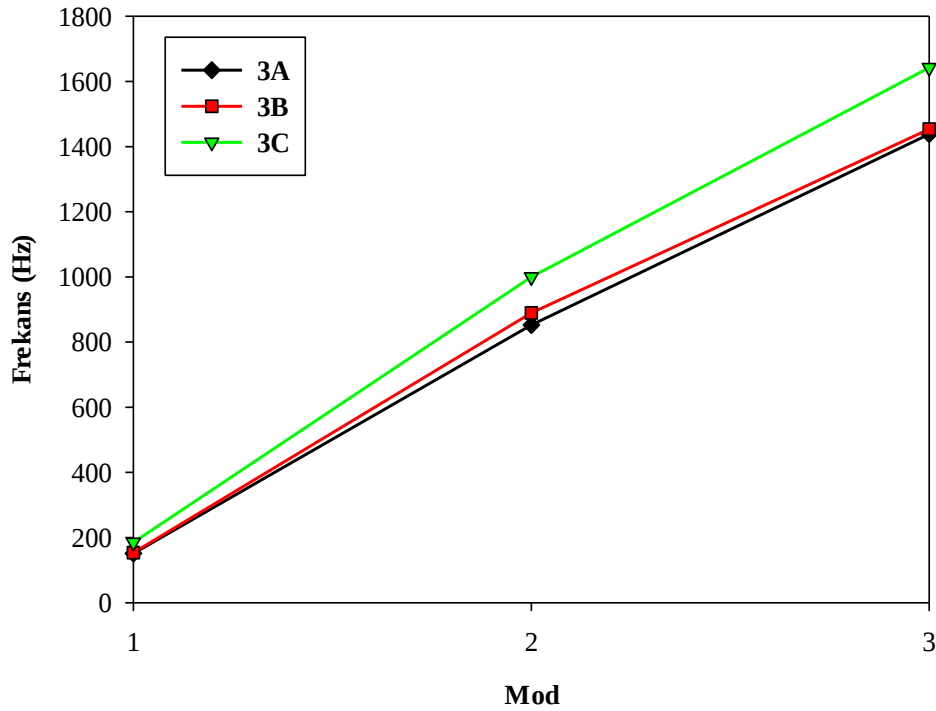
Şekil 4.3. 2 Nolu reçete mod-frekans grafiği.

Karışım içerisindeki çakıl taşı içeriğinin artışı frekansı artırmakla birlikte sönüm oranını düşürmektedir (Şekil 4.4.). Çakıl taşının sönüm oranına etkisi frekans arttıkça düşmektedir. Çakıl taşı miktarının iki katına çıkması sönüm oranını yaklaşık %2 azaltmaktadır. Çakıl taşının sönüme katkısı tüm frekanslarda orantılı olarak değişmektedir. Daha yüksek sönüm tercih edilen makinelerde çakıl taşı oranını düşürmek yararlı olacaktır.



Şekil 4.4. 2 Nolu reçete mod frekansı – sönüm oranı grafiği.

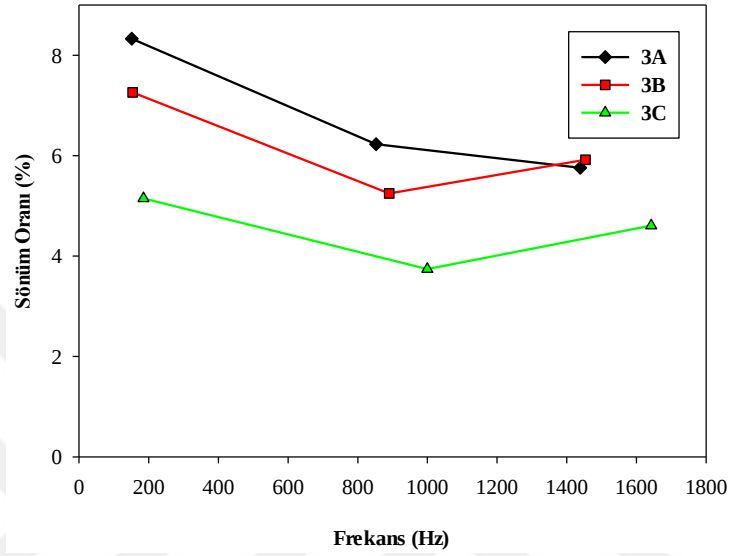
Kompozit kiriş içeriğindeki ince kum karışımının titreşim karakteristiklerine etkisi Şekil 4.5. ve Şekil 4.6.'da verilmiştir. Çakıl taşına benzer şekilde kompozit kirişteki ince kum miktarının artması malzemeyi daha rijit hale getirmektedir (Şekil 4.5.). İnce kum miktarının 2 katına çıkması frekansı çok değiştirmezken, 3 katına çıkması frekansı daha fazla etkilemektedir. Önceki reçetelerde olduğu gibi, ince kum miktarının frekansa etkisi de yüksek frekanslarda daha belirgin hale gelmektedir. Örneğin 1. Mod frekansı tüm numunelerde yaklaşık 185 Hz iken, 2. Mod frekansları arasındaki fark yaklaşık 150 Hz, 3. Mod frekansları arasındaki fark ise yaklaşık 200 Hz'e çıkmaktadır (Şekil 4.5.).



Şekil 4.5. 3 Nolu reçete mod-frekans grafiği.

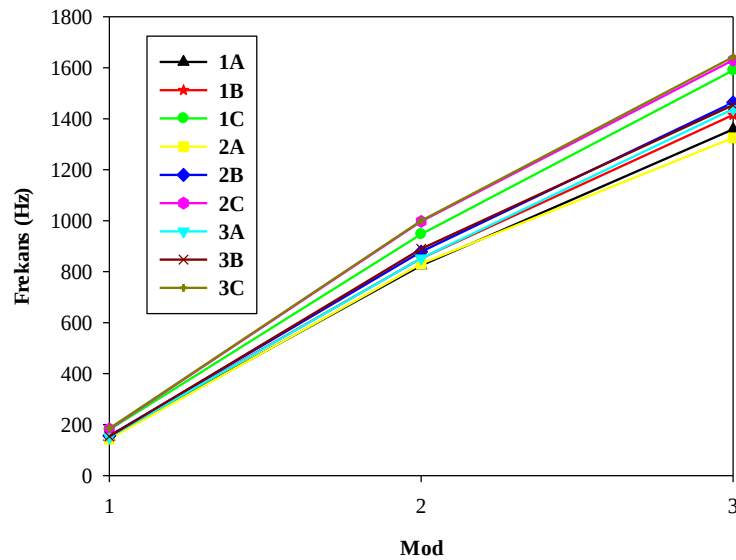
Doğal frekansın yükselmesine sebep olmasının aksine, kompozit kirişte ince kum miktarının artması sönüm oranını olumsuz olarak etkilemektedir (Şekil 4.6.). Dolayısıyla ince kum miktarının artması malzemenin sönüm kabiliyetini azaltmaktadır. 3C reçetesine sahip numunenin sönüm oranları 3A ve 3B reçetelerinden belirgin şekilde ayrılırken, 3A ve 3B reçetelerinin sönüm oranları yüksek mod frekanslarında birbirine yaklaşmaktadır.

Rezonansa yakın hızlarda ve yüksek titreşimli ve gürültülü çalışan makine gövdelerinde kullanılan kompozit kiriş malzemelerinde ince kum miktarının azaltılması, titreşim seviyesini düşüreceğinden dolayı makinenin ömrünü arttıracaktır.



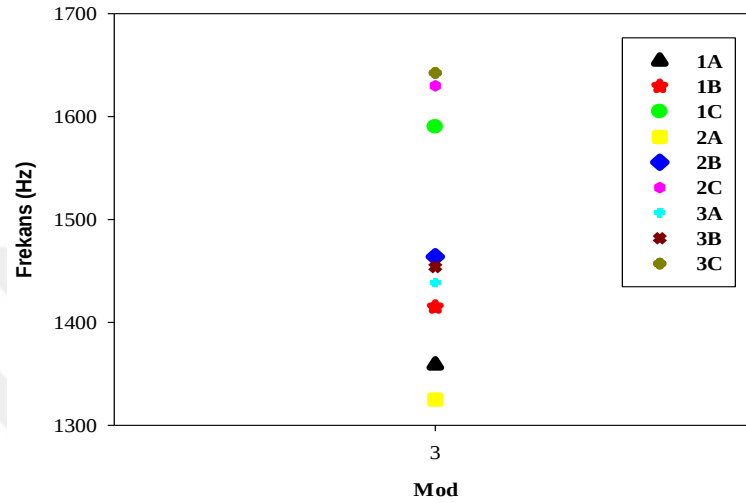
Şekil 4.6. 3 Nolu reçete mod frekansı – sönüm oranı grafiği.

Tüm test numunelerine ait frekans ve sönüm parametrelerinin değişiminin incelenmesinde fayda vardır. Tüm numunelerde mod frekansının artışı hemen hemen lineerdir. Düşük frekanslarda tüm numunelerin dinamik rijitliği birbirine çok yakınken, frekans yükseldikçe malzeme rijitlikleri farkı artmaktadır (Şekil 4.7.).



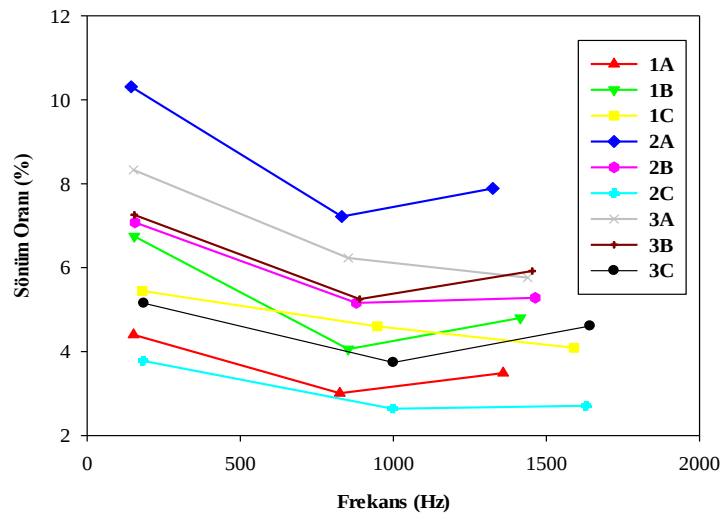
Şekil 4.7. Tüm numuneler için mod-frekans grafiği.

Tüm reçetelere ait numuneler için sadece 3. Mod frekanslarının değişimi Şekil 4.8’de daha ayrıntılı olarak görülmektedir. Buna göre epoksi katkısının en fazla olduğu 1C numunesi ile çakıl taşı ve ince kum katkısının en fazla olduğu 2C ve 3C numunelerinin en fazla frekansa sahip olduğu anlaşılmaktadır. Buradan da epoksi, çakıl taşı ve ince kumun rijitliği artırdığı doğrulanmaktadır.



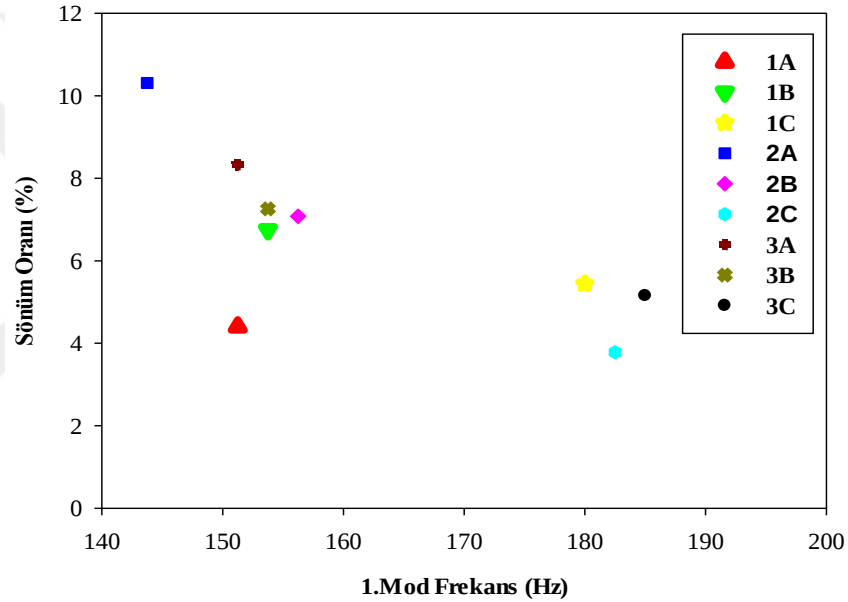
Şekil 4.8. Tüm numuneler için 3.mod-frekans grafiği.

Tüm numunelerin malzeme içeriklerinin sönüm oranlarına olan etkisi Şekil 4.9’da bir arada verilmiştir. Şekil 4.9.’da epoksi reçinesinin sönüm oranını arttırdığı, çakıl taşı ve ince kumun sönüm oranını azalttığı genel olarak anlaşılmaktadır. Numuneler ancak birbiri içerisinde değerlendirildiğinde mantıklı sonuçlar vermektedir. Gruplar karma olarak karşılaştırılmamalıdır.



Şekil 4.9. Tüm numuneler için mod frekansı-sönüm oranı grafiği.

Kompozit kırılgarların sadece 1.mod frekanslarındaki sönüm oranlarının değişimi Şekil 4.10'da detaylıca görülmektedir. Çakıl taşının en fazla olduğu reçete ürünü olan 2C numunesinin sönüm oranı %3,78 ile en az, çakıl taşının en az olduğu reçete ürünü 2A numunesinin sönüm oranı %10,31 ile en fazladır. Buna göre 1. modda sönüm oranını en fazla etkileyen parametrenin çakıl taşının olduğu anlaşılmaktadır. Çakıl taşıyla birlikte epoksi miktarının fazlalığı da sönüm oranını en fazla arttıran değişkenlerdendir. İnce kum katkısının artması da sönüm oranını azalttığı anlaşılmaktadır. Şekil 4.10.'da görüldüğü gibi 3A numunesi sönüm oranı %8 iken 3C numunesi sönüm oranı %4'dür.



Şekil 4.10. Tüm numuneler için 1.mod frekansı-sönüm oranı grafiği.

Titreşim test sonuçları genel olarak yorumlandığında tezgâhların kullanım alanları ve çalışma şartları dikkate alınarak agrega formları ve karışım oranları irdelenmesi gerekmektedir.

Titreşim minimum seviyede istenen makine tezgâhları için 2A reçetesi tavsiye edilirken sönümleme yapılması istenmeyen tezgâhlar için 2C reçetesi tavsiye edilebilir.

Tezgâh çalışma koşullarına göre sönüm değerleri incelenmelidir. Frekans değerleri ise makinelerin rezonansa girdiği frekans değerine göre ilişkilendirilebilir.

4.2. Basma Testi Sonuçları

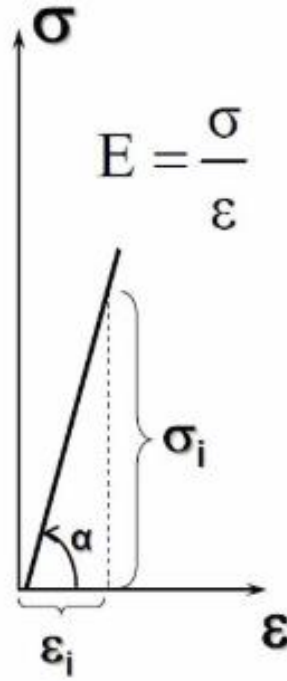
Tablo 4.1. Karışım gruplarına bağlı olarak elastik modül sonuçları.

Karışım grubu	Elastik Modül (MPa)
1A	417,33
1B	640,33
1C	647,24
2A	593,90
2B	615,00
2C	882,66
3A	556,33
3B	583,50
3C	439,54

Elastisite modülü; bir malzeme üzerine uygulanan düşük yükler altında meydana gelen şekil değişiminin, gerilmeyi meydana getiren yükün kaldırılmasıyla malzemenin eski şekline gelme özelliğini anlatan sabit bir katsayıdır. Gerilme ile orantılı olarak değişen şekil değişimine elastik şekil değişimi (deformasyon) adı verilir. Gerilme – gerinim eğrisinde doğrusal olan bu kısmın eğimi elastisite modülü E 'ye karşılık gelir. Bir başka ifade ile, malzemeye yük uygulanması ile meydana gelen şekil değişimi yükün kaldırılması ile ortadan kayboluyorsa (malzeme eski haline dönüyorsa), malzeme elastik deformasyona uğramıştır

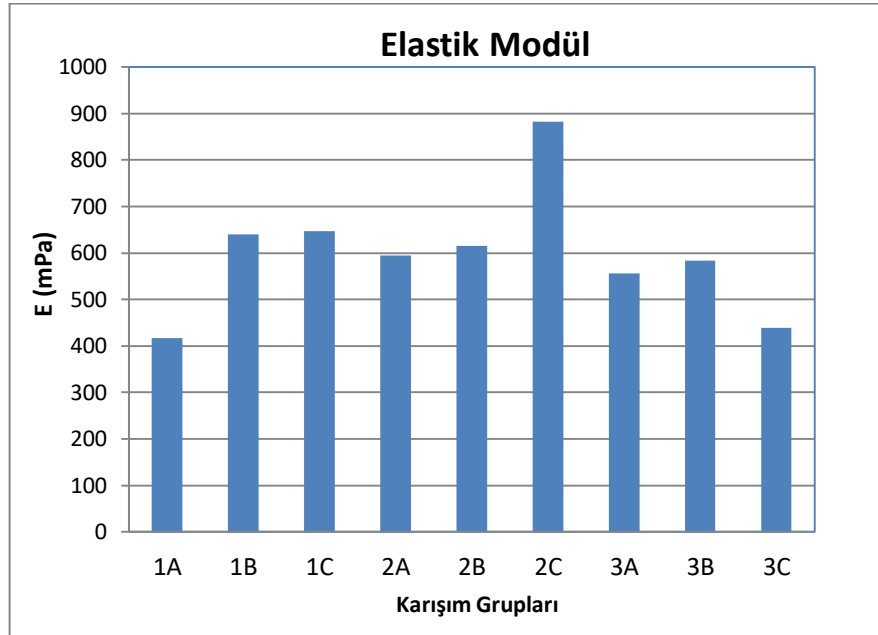
Elastik modül değeri soğuk deformasyon şiddeti, kimyasal bileşim ve sıcaklıkla artıp azalmaktadır. Ferromanyetik özellikler ve yapı hataları elastisite modülüne etki etmektedir. Alaşım eklenmesi ile eğer ergime noktası değeri artıyorsa böylece elastik modülünde artacağı beklenir. Elastisite modülünün değeri artan sıcaklıkla azalma eğilimi göstermektedir.

Genelde bu azalma ergime sıcaklığının yarısına kadar doğrusaldır. Bu noktadan sonra azalma artmaktadır. Malzemenin dayanımının elastisite modülü üzerinde bir etkisi bulunmamaktadır.



Şekil 4.11. Gerilme-gerinim grafiği.

Hazırlanan her gruptan 3 adet değerin ortalaması alınarak toplamda dökülen 27 adet basma numunesinin elastik modül değerleri Tablo 4.1.'de verilmiştir.



Şekil 4.12. Elastik modül sonuçları.

Çakıl taşı ve epoksi oranının artışının elastik modül değerini arttırdığı görülmektedir (Şekil 4.12.). Elastik modül değeri ortalama 0,7 GPa civarlarında gelmektedir. Bu değeri etkileyen parametrelere çalışmada kullanılan çakıl taşı malzemesinin (formu) boyutları ve epoksi-epoksi sertleştiricisi karışımı hazırlanırken gaz boşluklarının oluşması örnek verilebilir.

Elastik modül değerine en çok etkileyen parametrenin çakıl taşı olduğu söylenebilir. 2C karışımı (çakıl taşı oranının en yüksek olduğu reçete) ile en yüksek elastik modül değerine ulaşıldığı Şekil 4.12.'de görülmektedir.

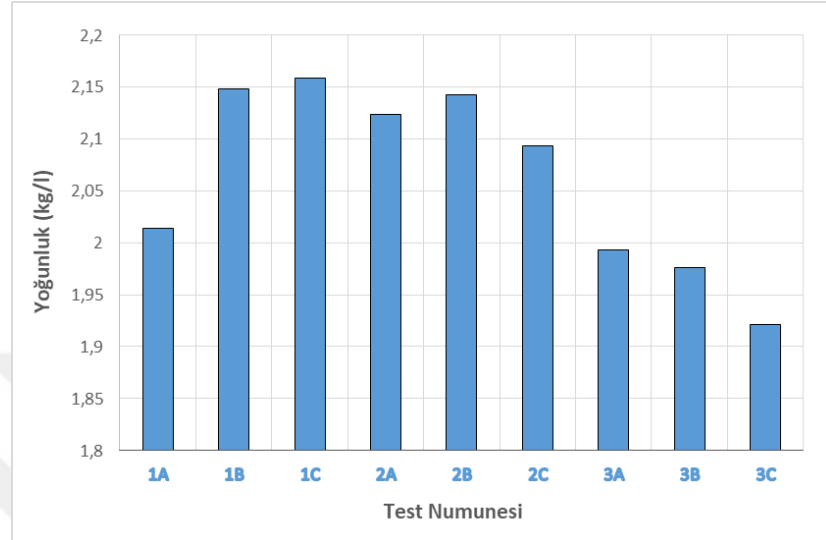
Betonun elastite modülü iri agrega türünün çeşidi için önem arzederken, agreganın elastite modülüne yakından ilişkilidir. Betonun elastite modülü uygulanan beton için iri agreganın mekanik özelliklerinin bir değişkenidir. Beton mukavetinde artan agrega basma mukavemetiyle elastite modül büyümektedir (Arıoğlu, 1999).

Basma test numuneleri yoğunlukları tayini yapılmıştır ve sonuçlar Tablo 4.2.'de sunulmuştur.

Tablo 4.2. Basma testi numune yoğunlukları.	
Numune No	Yoğunluk (kg/l)
1A	2,014
1B	2,147
1C	2,158
2A	2,123
2B	2,142
2C	2,093
3A	1,993
3B	1,976
3C	1,921

Literatürdeki çalışmalara göre mineral döküm yoğunluğunun genel 2-2,3 gr/cm³ civarlarında olduğu görülmekteydi. Çalışmada çıkan sonuçlar literatüre oldukça yakın değerlerdir.

Epoksi artışıyla yoğunluğun arttığı, ince kum oranının artışıyla da yoğunluğun azaldığı görülmektedir (Şekil 4.13.)



Şekil 4.13. Basma testi numuneleri yoğunlukları.

Birim hacimdeki madde miktarına yoğunluk denir. Numune ağırlığının gerçek hacme oranı olarak hesaplanıp yukarıdaki tablo oluşturulmuştur.

İkinci grup numuneleri incelendiğinde çakıl taşı oranının artışıyla yoğunluğun artması beklenmekteydi ve 2A ve 2B numuneleri bu beklentiyi karşılamaktadır. Ancak 2C numunesindeki azalış durumun yoruma açık olmayışını göstermektedir. Bu kapsamda doğrulama deneyleri yapılması gerekmektedir.

Üçüncü grup numuneleri ince kum oranının artışıyla yoğunluğun azaldığını desteklemektedir. Bu süreçte bu grup numunelerinin karışım hazırlanmasında yanlış bir durumun olmadığını göstermektedir.

BÖLÜM 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada makine ve takım tezgâhlarında kullanılabilecek nitelikte 9 farklı polimer matrisli kompozit malzemeden 27 farklı kompozit kiriş numunelerinin deneysel modal analizleri ve basma testleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel modal analizler sonucunda kompozit kirişlerin titreşim karakteristikleri belirlenmiştir. Buna göre;

-Kirişlerin titreşim karakteristikleri üzerinde en etkili parametrenin kompozit sistemdeki çakıl taşı varlığı ve yapı içerisindeki oranı olduğu bulunmuştur. En yüksek sönüm oranı değeri %10,31 ile %10 çakıl taşı miktarına sahip 2A reçetesi ve en düşük sönümü ise %3,78 oran ile %30 çakıl taşı miktarına sahip 2C reçetesi sağlamıştır.

- Bu çalışmada genel olarak çakıl taşı katkısı ile ince kum katkısının azaltılması sönüm oranını arttıran bir etki yapmıştır. Mineral kompozit yapı içerisindeki epoksi miktarının arttırılması ise sönüm miktarını arttırmaktadır. Benzer şekilde çakıl taşı ve ince kum rijitliği artırmakta epoksi ise rijitliği düşürmektedir.

- Test numunelerinin yoğunlukları incelendiğinde; epoksi oranının artışıyla kompozit yapıların yoğunlukları artmakta, ince kum oranının artışıyla da kompozit yapıların yoğunlukları azalmaktadır.

- Çakıl taşı oranının kompozit yapıların elastik modül değerine doğrudan etki ettiği görülmüştür. Bu sonuçlara göre; makine titreşimlerinin azaltılarak makinelerin kullanım ömrünün arttırılması ve hassas ürün kalitesinin elde edilebilmesi adına makine gövdeleri için geliştirilen/geliştirilecek olan mineral kompozit yapıların içeriğindeki ince kum ve çakıl taşı miktarının mümkün olduğunca azaltılması ve epoksi miktarının ise arttırılmasının yarar olabileceği değerlendirilmiştir.

BÖLÜM 6. ÖNERİLER

Bu çalışmada elde edilen bulgular ışığında aşağıdaki öneriler yapılmıştır;

- Bu çalışmada 9 farklı reçetede ve oranlarda hazırlanan çakıl taşı, orta boyutlu kum, ince kum ve epoksi reçinesi karışımlarının test ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Çakıl taşı, orta boyutlu kum, ince kum ve epoksi reçinesi malzemelerinin sisteme boyutlarını büyütürerek ilave edilmesi suretiyle elde edilecek mineral döküm kompozit yapılarının titreşim sönümleme etkileri ve elastisite değerleri araştırılabilir.
- Elde edilecek mineral kompozit yapıları hazırlamak üzerine kullanılan granüllerin kimyasal özelliklerinin ve kompozit yapı oluşturmak için kullanılan karıştırma tekniği ile analiz edilmesi ve bu sonuçların ürün titreşim davranışları üzerine etkilerinin araştırılması önerilir.
- Bu çalışmada hazırlanan karışım oranlarıyla gruplar kendi içerisinde kıyaslanabilir olmuştur ancak geliştirilecek farklı karışım oranlarıyla gruplar birbiriyle kıyaslanabilir ve böylelikle optimum sonuç veren reçete için karışım oranlarının etkilerinin araştırılması önerilir.

KAYNAKLAR

- Abdulrezzaq, R., Mohamed, M. R. and ALdeen, S. N. (2016). A Study of compression strength and flexural strength for Polymer Concrete. Iraqi Journal of Science, Volume 57, Issue 4B, Pages 2677-2684.
- Agavriloaie, L., Oprea, S., Barbuta, M. and Luca, F. (2012). Characterisation of polymer concrete with epoxy polyurethane acryl matrix. Construction and Building Materials, Volume 37, Pages 190-196.
- Antunes, M. A., Ribeiro, P., Rodrigues, J. D. and Akhavan, H. (2020). Modal analysis of a Variable Stiffness Composite Laminated plate with diverse boundary conditions: Experiments and modelling. Composite Structures, Volume 239, 111974.
- Arioğlu, N. ve Arioğlu, E. (1999). İri agrega basma dayanımının beton elastik modülüne etkisi. 2 Ulusal Kırmataş Sempozyumu'99, (s. 177-190). İstanbul.
- Ateş, E. ve Aztekin, K. (2011). Parçacık ve fiber takviyeli polimer kompozitlerin yoğunluk ve basma dayanımı özellikleri. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 26(2).
- Aztekin, K. (2010). Termoset polyester matrisli kompozitlerin işlenebilirliğinin AISI 1050 ile karşılaştırmalı olarak araştırılması. Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi.
- Baldan, E. (2018). Otomotiv fan kanadının dinamik karakteristiğinin deneysel ve teorik modal analiz metotları ile incelenmesi. Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Chandra, S. and Ohama, Y. (1994). Polymer in Concrete. CRC Pres, 204 p. Boca Raton.
- Cho, S. K., Kim, H. J. and Chang, S. H. (2011). The application of polymer composites to the table-top machine tool components for higher stiffness and reduced weight. Composite Structures 93(2), 492-501.
- Daoui, A. and Zerizer, A. (2018). Identification of elasticity modulus by vibratory analysis (Application to a natural composite: Aleppo pine wood). In MATEC Web of Conferences (s. Vol. 149, p. 01045). EDP Sciences.
- Darwin, D. (1984). Causes Evaluation And Repair Cracks In Concrete. American Concrete Journal, vol.no.9., p: 224.
- Dey, H. J. (1991). Das Verformungs-und Bruchverhalten von Reaktionsharzbeton und die Auswirkungen auf Maschinenbauteile. Hanser.

- Dunaj, P., Powalka, B., Berczyński, S. and Okulik, T. (2020). Increasing lathe machining stability by using a composite steel-polymer concrete frame. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Volume 31, Pages 1-13.
- Ekin, N. (2020). Betonların Elastik Modül Hesabında Poisson Oranının Önemi. *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*, 6(2), , 239-252.
- Erbe, T., Krol, J. and Theska, R. (2008). Design guidelines for mineral casting as a material for base-frames of precision-machines. n *Prospects in mechanical engineering: proceedings*; 53. IWK, Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, (Vol. 53)., 8-12.
- Ferdous, W., Manalo, A., Wong, H. S., Abousnina, R., AlAjarmeh, O. S., Zhuge, Y., et al. (2020). Optimal design for epoxy polymer concrete based on mechanical properties and durability aspects. *Construction and Building Materials*, 232, 117229.
- Garan, Y. S. (2010). Çakıl agregalı betonlarda agrega konsantrasyonunun betonun mekanik özelliklerine etkisi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Ghassemi , P. and Toufigh, V. (2020). Durability of epoxy polymer and ordinary cement concrete in aggressive environments. *Construction and Building Materials*, 234, 117887.
- Gorninski, J. P., Dal Molin, D. C. and Kazmierczak, C. S. (2014). Study of the modulus of elasticity of polymer concrete compounds and comparative assessment of polymer concrete and portland cement concrete. *Cement and concrete research*, 34(11), 2091-2095.
- Guan, C., Zhang, H., Wang, X., Miao, H., Zhou, L. and Liu, F. (2017). Experimental and theoretical modal analysis of full-sized wood composite panels supported on four nodes. *Materials*, 10(6), , 683.
- Guray, K. V. (2017). A review paper on Mechanical and Thermal Properties of Granite and its Industrial Applications.
- Gürsoy, H. (2011). Kompozit malzemelerin mekanik ve modal özelliklerinin titreşim analiziyle belirlenmesi. Uşak Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Jackisch, U. V. (2002). Mineralguss für den Maschinenbau: Herstellung und Eigenschaften eines modernen Werkstoffs für hochpräzise Maschinengestelle. Verlag Moderne Industrie.
- Klausbruckner, M. J. and Pryputniewicz, R. J. (1995). Theoretical and experimental study of coupled vibrations of channel beams. *Journal of Sound and Vibration*, 183(2), 239-252.

- Koruvatan, A. (2008). Farklı kür sıcaklığı ve sürelerinde üretilen tabakalı kompozit plakaların pimli/civatalı bağlantılarının hasar analizinin incelenmesi. Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi.
- Orak, S. (1997). Poliester Recineli Polimer Betonun Sönüm Yeteneği Üzerine Bir Araştırma. Eskişehir.
- Özel, C. ve Kaplan, A. N. (2017). Kendiliğinden yerleşen beton özellikleri üzerinde agrega özelliklerinin etkisi. Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi, 1-6.
- Öztürk, H. (2019). Tezgâh gövdesi için mineral kompozit malzemesinin mekanik ve titreşim özelliklerinin deneysel incelenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Piratelli-Filho, A. and Levy-Neto, F. (2010). Behavior of granite-epoxy composite beams subjected to mechanical vibrations. Materials research, 13(4), 497-503.
- Selvakumar, A., Ganesan, K. and Mohanram, P. V. (2013). Dynamic analysis on fabricated mineral cast lathe bed. roceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 227(2), 261-266.
- Soykan, O ve Özel, C. (2012). Mermer tozu tane boyutunun polimer beton özelliklerine etkisi. SDU International Technologic Science. Vol. 4, No 3, 102-111.
- Tabatabaeian, M., Khaloo, A. and Khaloo, H. (2019). An innovative high performance pervious concrete with polyester and epoxy resins. Construction and Building Materials, 228, 116820.
- Venkatesh, B. and Ramesh kumar, G. B. (2018). Experimental study on strength characteristics of polymer concrete with epoxy resin. International Journal of Pure and Applied Mathematics Volume 119 No. 17, 3129-3138.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Seda Yıldız

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	2021
Lisans	Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Makine Mühendisliği	2019
Lisans	Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	2018
Lise	Yaşar Dedeman Lisesi	2010

İŞ DENEYİMİ

Yıl	Yer	Görev
2019-Halen	Kar Metal Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti	ARGE Mühendisi.

YABANCI DİL

İngilizce

ESERLER (makale, bildiri, proje vb.)

1. ‘AISI 1040 Malzemesinin şerit testere ile kesiminde işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin taguchi metoduyla incelenmesi.’ 2nd International Applied Sciences Congress March 27-28, 2021 İzmir – Turkey.
2. ‘Makine parçalarının titreşim sönümlenmesinde kullanılabilecek kompozit sistem tasarımı.’ ISSRIS’21. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar ve Yenilikçi Çalışmalar Sempozyumu.

