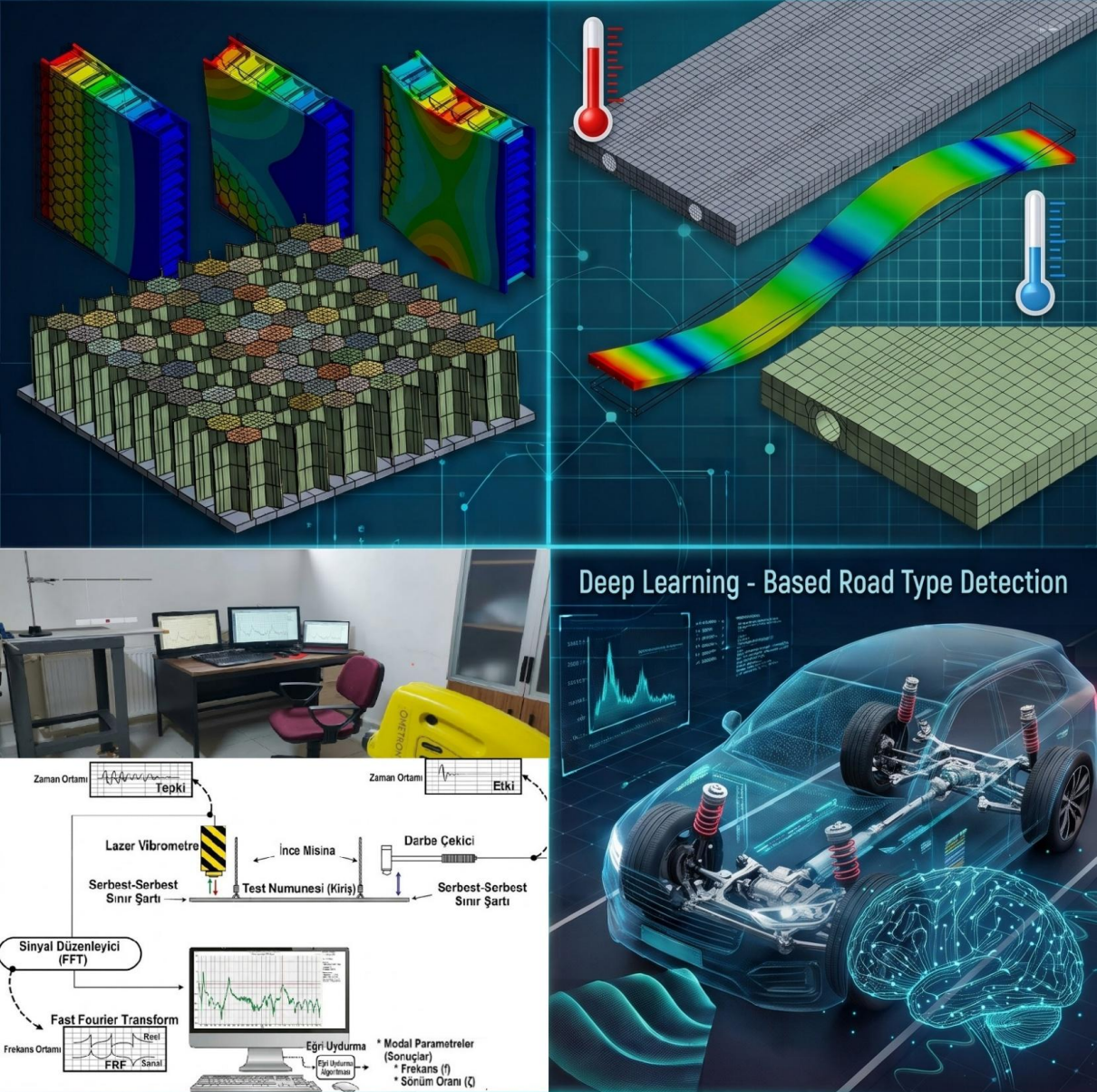


EDİTÖR: Doç. Dr. Muhammet Raci AYDIN

İLERİ MÜHENDİSLİK MALZEMELERİ VE AKILLI DİNAMİK SİSTEMLER

Mekanik, Dinamik, Termal ve Sayısal Yaklaşımlar



yaz
yayınları

İLERİ MÜHENDİSLİK MALZEMELERİ VE AKILLI DİNAMİK SİSTEMLER

Mekanik, Dinamik, Termal ve Sayısal Yaklaşımlar

Editör

Doç. Dr. Muhammet Raci AYDIN

yaz
yayınları
2026

İLERİ MÜHENDİSLİK MALZEMELERİ VE AKILLI DİNAMİK SİSTEMLER

**Mekanik, Dinamik, Termal ve Sayısal
Yaklaşımlar**

Editör: Doç. Dr. Muhammet Raci AYDIN

ORCID: 0000-0002-4120-1816

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-8926-54-5

DOI doi.org/10.5281/zenodo.23207589

Ekim 2026 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/ AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

İLERİ MÜHENDİSLİK MALZEMELERİ VE AKILLI DİNAMİK SİSTEMLER: MEKANİK, DİNAMİK, TERMAL VE SAYISAL YAKLAŞIMLAR

*ADVANCED ENGINEERING MATERIALS AND
INTELLIGENT DYNAMIC SYSTEMS: MECHANICAL,
DYNAMIC, THERMAL, AND NUMERICAL APPROACHES*

ÖNSÖZ

Mühendislik bilimlerinde son yıllarda yaşanan hızlı teknolojik gelişmeler; ileri mühendislik malzemelerinin geliştirilmesi, bu malzemelerin mekanik, dinamik ve termal davranışlarının belirlenmesi, karmaşık mühendislik yapılarının sayısal yöntemlerle modellenmesi ve akıllı sistemlerin geliştirilmesi arasındaki etkileşimi giderek daha önemli hâle getirmiştir. Özellikle kompozit malzemeler, eklemeli imalat, yapısal dinamik, termal yönetim, sonlu elemanlar analizi ve yapay zekâ tabanlı kontrol sistemleri, günümüz mühendislik araştırmalarının öne çıkan çalışma alanları arasında yer almaktadır.

Bu kitap, “İleri Mühendislik Malzemeleri ve Akıllı Dinamik Sistemler: Mekanik, Dinamik, Termal ve Sayısal Yaklaşımlar” başlığı altında, söz konusu araştırma alanlarında gerçekleştirilen güncel ve özgün çalışmaları bir araya getirmek amacıyla hazırlanmıştır. Eser; kompozit ve sandviç yapıların dinamik davranışından vasküler kompozitlerin ısıl yönetim koşullarındaki performansına, eklemeli imalatla üretilen malzemelerin mekanik, dinamik ve termal özelliklerinden baskı oryantasyonunun deneysel modal davranış üzerindeki etkilerine ve derin öğrenme tabanlı akıllı araç kontrol sistemlerine kadar uzanan disiplinler arası bir kapsam sunmaktadır.

Kitabın **birinci bölümünde**, farklı oranlarda poliüretan köpüklerle doldurulmuş intraply hibrit kompozit yüzeyli sandviç panellerin modal davranışı ele alınmaktadır. Sandviç yapılar; yüksek özgül dayanım ve rijitlik, düşük ağırlık ve enerji sönümleme gibi özellikleri nedeniyle havacılık, otomotiv, savunma, denizcilik ve çeşitli yapısal uygulamalarda önemli bir kullanım alanına sahiptir. Bu bölümde, hibrit kompozit yüzeyler ile köpük çekirdek arasındaki etkileşimin yapının dinamik karakteristikleri üzerindeki etkisi incelenmekte ve sandviç yapıların titreşim davranışının belirlenmesine yönelik sayısal bir yaklaşım sunulmaktadır.

İkinci bölümde, son yıllarda gelişmekte olan vasküler kompozitler ve ısıl yönetim uygulamaları ele alınmaktadır. Cam elyaf takviyeli vasküler kompozitlerin ısı yönetimi koşulları altındaki dinamik davranışının incelenmesi, kompozit yapıların yalnızca mekanik yükler altında değil, sıcaklık ve akışkan etkilerinin birlikte bulunduğu çoklu fiziksel ortamlarda da değerlendirilmesinin önemini ortaya koymaktadır. Bu bölüm, kompozit yapıların ileri fonksiyonel uygulamalarına yönelik güncel araştırma alanlarından birine odaklanmaktadır.

Kitabın **üçüncü bölümünde**, öncelikle eklemeli imalat teknolojisiyle üretilen malzemelerin **mekanik, dinamik ve termal davranışları** güncel literatür ışığında incelenmektedir. Eklemeli imalatın tasarım özgürlüğü, karmaşık geometrilerin üretilmesi, malzeme kullanımındaki verimlilik ve kişiselleştirilebilir üretim olanakları, bu teknolojiyi geleneksel imalat yöntemlerine önemli bir alternatif hâline getirmiştir. Bununla birlikte, üretim parametreleri ve özellikle baskı oryantasyonu, eklemeli imalatla üretilen parçaların anizotropik özellikleri ve dinamik davranışları üzerinde belirleyici olabilmektedir. Bu genel değerlendirmeye ek olarak, bölüm kapsamında **PLA filament kullanılarak eklemeli imalat yöntemiyle farklı baskı oryantasyonlarında üretilen**

numunelerin deneysel modal analizleri gerçekleştirilmiştir. Numuneler **0° ve 90° baskı oryantasyonlarında** üretilmiş ve deneysel modal analiz yöntemiyle dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar iki farklı baskı oryantasyonu açısından karşılaştırılarak, üretim yönünün numunelerin titreşim ve modal davranışları üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Böylece üçüncü bölüm, mevcut bilimsel literatürün derlendiği çalışmaya ek olarak, **literatür bilgisi ile özgün deneysel bulguları bir araya getiren bütünleşik bir çalışma** niteliğindedir. Deneysel çalışmaya ait laboratuvar ve test görüntülerinin de sunulması, elde edilen sonuçların deneysel süreçle birlikte değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Kitabın **dördüncü ve son bölümünde** ise mühendislik sistemlerinin yapay zekâ ve gömülü sistem teknolojileriyle bütünleştirilmesine odaklanılmaktadır. PWM kontrollü yarı aktif bir süspansiyon sisteminin derin öğrenme tabanlı yol tipi algılama yaklaşımıyla birlikte ele alınması; araç dinamiği, yapay zekâ, gömülü sistemler ve akıllı kontrol teknolojilerinin keşişiminde güncel bir araştırma yaklaşımı sunmaktadır. Yol koşullarının algılanması ile süspansiyon kontrolünün ilişkilendirilmesi, araçların farklı yol koşullarına daha etkin biçimde uyum sağlayabilmesine yönelik önemli bir potansiyel taşımaktadır.

Kitapta yer alan dört bölüm farklı mühendislik problemlerine odaklanmakla birlikte, tamamını bir araya getiren temel yaklaşım; **ileri mühendislik malzemelerinin ve karmaşık mühendislik sistemlerinin mekanik, dinamik ve termal davranışlarının deneysel ve sayısal yöntemlerle incelenmesi ve yeni nesil akıllı teknolojilerle bütünleştirilmesidir**. Bu yönüyle eser; kompozit malzemeler, yapısal dinamik, sonlu elemanlar analizi, vasküler kompozitler, eklemeli imalat, deneysel modal analiz, termal yönetim, araç dinamiği ve yapay zekâ tabanlı kontrol sistemlerini aynı bilimsel çerçeve de buluşturmaktadır.

Bu kitabın; makine mühendisliği, malzeme bilimi, kompozit malzemeler, yapısal dinamik, eklemeli imalat, deneysel modal analiz, sonlu elemanlar yöntemi, termal yönetim, araç dinamiği ve yapay zekâ alanlarında çalışan akademisyenlere, araştırmacılara, lisansüstü öğrencilere ve mühendislik profesyonellerine yararlı bir bilimsel kaynak olması temennisiyle, eserin hazırlanmasına katkı sağlayan tüm araştırmacılara teşekkür ederim.

Editör

Doç. Dr. Muhammet Raci Aydın

İÇİNDEKİLER

Farklı Oranlarda Poliüretan Köpükle Doldurulmuş Intraply Hibrit Kompozit Yüzeyli Sandviç Panellerin Modal Analizi	1
<i>Muhammet Raci AYDIN</i>	
Isı Yönetimi Koşulları Altında Cam Elyaf Takviyeli Vasküler Kompozitlerin Dinamik Davranışı.....	19
<i>Muhammet Raci AYDIN</i>	
Eklemeli İmalatla Üretilen Malzemelerin Mekanik, Dinamik ve Termal Davranışları: Baskı Oryantasyonunun DeneySEL Modal Parametrelere Etkisi	41
<i>Muhammet Raci AYDIN</i>	
An Embedded Prototype for A PWM-Controlled Semi-Active Suspension System with Deep Learning-Based Road Type Detection	61
<i>Muhammet Raci AYDIN, Servet GÜNEŞ</i>	

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

FARKLI ORANLARDA POLİÜRETAN KÖPÜKLE DOLDURULMUŞ INTRAPLY HİBRİT KOMPOZİT YÜZEYLİ SANDVİÇ PANELLERİN MODAL ANALİZİ¹

Muhammet Raci AYDIN²

1. GİRİŞ

Sandviç panel yapılar, olağanüstü mukavemet-ağırlık oranları ve çok yönlü tasarım olanakları sayesinde modern endüstriyel uygulamalarda vazgeçilmez yapı elemanları haline gelmiştir. Bu çalışma kapsamında, değişen oranlarda poliüretan köpük ile doldurulmuş Alüminyum bal peteği çekirdeklere sahip sandviç kompozit panellerin dinamik davranışı sayısal modal analiz yapılarak ele alınmıştır. Sandviç yapının yapısal özelliklerini amacıyla, yüzey plakası olarak karbon/aramid elyaf takviyeli intraply hibrit kompozit levhalar kullanılmıştır. Çalışma kapsamında katı modelleme işlemi SolidWorks® programıyla yapılmıştır. ANSYS Workbench® paket programı kullanılarak sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Her bir numune grubu için ‘Ankastre-serbest-serbest-serbest’ sınır koşulu dikkate alınarak üç farklı mod şekli ve bu mod şekillerine ait doğal frekans değerleri belirlenmiştir. Çekirdek yapıdaki köpük dolgu oranının artmasıyla sandviç panellerin mod şekillerinde önemli bir değişiklik görülmemiştir. Buna karşılık bu mod şekillerine ait doğal frekans değerlerinde azalma eğilimi tespit edilmiştir. Bu

¹ Bu çalışmanın bir kısmı özet olarak “4th International Mardin Scientific Research And Innovation Congress, October 23-24, 2025 / Mardin” kongresinde sunulmuştur.

² Doç. Dr., Iğdır Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, ORCID: 0000-0002-4120-1816.

çalışma, titreşime duyarlı ortamlarında kullanılan sandviç kompozit yapıların optimizasyonuna ilişkin sayısal bulgular sunarak, gelecekte yapılacak deneysel çalışmalar için bir temel oluşturmaktadır.

Malzeme bilimindeki gelişmelere paralel olarak sandviç panel yapıların endüstriyel uygulamalarda yapı malzemesi olarak kullanımı her geçen gün daha fazla yaygınlaşmaktadır. Bu yapılar genellikle iki adet yüksek mukavemetli dış yüzey tabakasının arasına hafif ve kalın bir çekirdek yapının yerleştirilmesi ile elde edilmektedir. Bu yapılar sayesinde eğilme dayanımı en üst düzeye çıkarılırken ağırlık en aza indirilir [1-2]. Bu durum havacılık, otomotiv ve deniz mühendisliği gibi sektörlerde yakıt verimliliği ve performans artışına sebep olduğu için kritik öneme sahiptir. Alüminyum (Al) bal petekli çekirdekler, yüksek özgül sertlikleri ve enerji emme kapasiteleri nedeniyle bu uygulamalar için sıklıkla tercih edilmektedir [1-3]. Bununla birlikte, dolgusuz petek yapılar genellikle sınırlı sönümlenme özellikleri sergiler ve bu durum, dinamik yüke ve titreşime maruz kalan çalışma ortamlarında sorun oluşturabilir. Bu sınırlamaları gidermek amacıyla araştırmacılar, petek çekirdeğin hücreleri içine poliüretan köpük (PUF) gibi viskoelastik dolgu maddelerinin entegrasyonunu incelemişlerdir [1-2, 4].

Sandviç yapılarda çekirdek modifikasyonlarının yanı sıra, yüzey tabakası malzemesinin seçimi de son derece önemlidir. Geleneksel kompozitler genellikle tek bir elyaf türüne dayanır; ancak hibrit kompozitler farklı elyafların üstün özelliklerini bir araya getirme imkânı sunar.

Karbon ve aramid elyafların tek bir kumaş yapı içinde plain dokuma şeklinde birleştirilmesiyle elde edilen hibrit kumaşlar kullanılarak oluşturulan intraply hibrit kompozitler oluşturulur. Bu sayede karbon elyaflarının yüksek çekme mukavemeti ve sertliği, aramid elyafların mükemmel darbe

direnci ve tokluğu tek bir kompozit yapıda elde edilmiş olur [5]. Bu çalışma kapsamında, Al bal peteği çekirdek yapı ve karbon/aramid intraply hibrit kompozit plakalar kullanılmıştır. Dört farklı doluluk oranına sahip bal peteği çekirdek yapılar ve sekiz tabakalı karbon-aramid intraply kompozit plakalar birleştirilerek oluşturulan sandviç yapıların sayısal modal analizi yapılmıştır. Böylece gelecekteki tasarım ve deneysel doğrulama çalışmalarına katkı sağlamak ve bu sandviç yapıların dinamik tepkisini karakterize etmek mümkün olmuştur.

2. LİTERATÜR

Sandviç panellerin dinamik karakterizasyonu, yapısal mekanik, malzeme bilimi ve titreşim teorisini bir araya getiren çok yönlü bir alandır. Sandviç yapılar, temelde yapısal işlevleri birbirinden ayırmak üzere tasarlanmıştır: kaplama tabakaları eğilme direnci sağlar ve düzlem içi yükleri taşıırken, çekirdek tabakalar arasındaki mesafeyi korur, kesme direnci sağlar ve darbe sırasında enerjiyi emer [1-2].

2.1. Petek çekirdeklerin ve poliüretan köpük

Al petek çekirdekler, düzlem dışı yüksek sertlik ve mukavemet sağlayan altıgen hücre yapısıyla öne çıkmaktadır. Ancak bu hücrelerin içi boş olduğu için düşük iç sönümleme özelliklerine sahiptir. Bu yapılardaki titreşimler, yorulma hasarına, gürültü yayılımına ve yapısal hassasiyetin azalmasına neden olabilir. Buna karşı, hücrelerin PUF ile doldurulması umut verici bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. PUF, viskoelastik bir malzemedir; yani deformasyona uğradığında hem viskoz hem de elastik özellikler sergiler. Bu davranış, mekanik enerjiyi ısı olarak dağıtmasına olanak tanıyarak tüm panelin sönümleme oranını önemli ölçüde artırır [1]. Son yıllarda yapılan çalışmalar, PU köpük dolgusunun sönümleme ve enerji emiliminde ciddi artışlara sebep olduğunu göstermiştir [1,3]. Ayrıca Khondabi ve

ark. [6], tarafından yapılan çalışmada sandviç yapıların blast (patlama) yükleri altındaki davranışında fonksiyonel/kademeli köpük çekirdek tasarımının önemli bir tasarım parametresi olduğu belirlenmiştir.

2.2. Modal analiz

Modal analiz, yapısal sistemlerin dinamik özelliklerinin frekans tabanında incelenmesiyle yapılmaktadır. Bir sandviç panel için bu özellikler, doğal frekansları (yapının doğal olarak salınım gösterdiği frekanslar) ve mod şekilleri (belirli bir doğal frekansta yapının deforme olmuş şekli) ile tanımlanabilir. Matematiksel olarak çok serbestlik derecesine sahip bir yapının serbest titreşim davranışına ait genel hareket denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Denklem 1,[7]).

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{0\} \quad (\text{Denklem 1})$$

Burada [M] kütle matrisi, [C] sönümlleme matrisi ve [K] sertlik matrisidir. Doğal frekans ve mod şekli gibi modal özellikler doğrudan yukarıdaki özelliklerle (M, C, K,) ilgilidir. Köpük dolgusunun karakteristik özelliklerinden dolayı [C] matrisi doğrudan sandviç yapının sönüm özelliklerini etkiler. Aynı zamanda çekirdeğe PUF eklenmesiyle, yapının hem kütlesi (M) hem de sertliği (K) değişir. Buna bağlı olarak doğal frekans üzerindeki etki, sertlik ve kütledeki değişime ve bu değişen parametrelerin dominant olmasına göre farklılık gösterebilir. Birçok yumuşak çekirdekli sistemde kütle artışı daha baskındır ve bu da doğal frekans değerlerinde azalmaya yol açabilmektedir [1,7].

2.3. Elyaf takviyeli intraply hibrit kompozitler

Hibritleştirme işlemi bir kompozit yapıda iki veya daha fazla elyaf türünün kullanılmasıyla yapılır. Intraply hibrit kompozitlerin üretiminde farklı elyaf türleriyle oluşturulan hibrit

kumaşlar kullanılır. Karbon elyafları olağanüstü sertlik ve çekme mukavemeti sağlarken, aramid elyafları üstün darbe direnci ve titreşim sönümleme özelliğine sahiptir [5,8]. Mevcut çalışmada $0^{\circ}/90^{\circ}$ oryantasyon açısına sahip, 8 tabakalı, düz (plain) dokuma kumaş kullanılmıştır. Yapısal bütünlüğü korumak için karbonun yüksek mukavemet değerlerinden, dinamik tepkisini geliştirmek için aramidin tokluğundan ve yüksek enerji absorbe edebilme kabiliyetinden faydalanılmıştır. Bu konu ile ilgili malzeme kombinasyonunu özelleştirmenin sandviç plakaların mekanik, termal ve titreşim davranışlarını önemli ölçüde etkileyebileceğini gösteren bulunmaktadır [9,10].

3. YÖNTEM

Sayısal analiz kapsamında hibrit sandviç panelin yapısal karmaşıklığının doğru bir şekilde temsil edilmesini sağlayan titiz bir modelleme ve uygun bir iş akışıyla sayısal modal analizler gerçekleştirilmiştir.

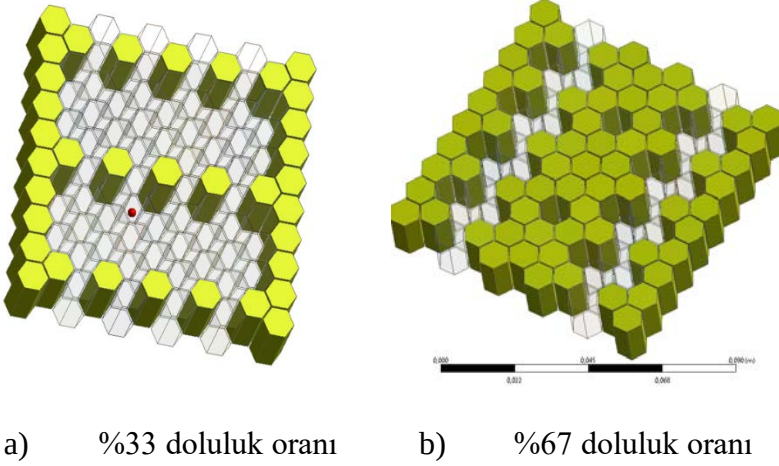
3.1. SolidWorks®'te geometrik modelleme

Geometrik parametreler, endüstriyel standart test numunelerini yansıtacak şekilde seçilmiştir. Sandviç kompozit yapı, orta kısımda çekirdek yapı olarak düzgün altıgen prizmalardan oluşan Al bal peteği çekirdek ve dış yüzeylerde iki adet kompozit plakadan oluşmaktadır. Çekirdeği oluşturan düzgün altıgenlerden bir tanesinin kenar uzunluğu 15.81 mm ve duvar kalınlığı 0.5 mm olacak şekilde modellenmiştir.

- Yüzey Katmanı Yapısı: Her bir yüzey plakası 2.05 mm kalınlığında, 100 mm x 100 mm ebatlarında olacak şekilde tasarlanmıştır.
- Çekirdek Geometrisi: Al bal peteği çekirdeği temsil etmek için 100 mm x 100 mm ebatlarında, 20 mm

kalınlığında 105 ayrı eşdeğer altıgen hücreden oluşan bir yapı oluşturulmuştur.

- Dolgu Oranları: Çekirdek yapının dört farklı durumu için (%0, %33, %67 ve %100 doluluğa göre) PUF oranları değiştirilerek aşağıdaki katı modeller oluşturulmuştur.
- %0 (Dolgunsuz): Boş Al bal peteği çekirdek
- %33 Dolgulu: Köpük, hücre hacminin üçte birine dağıtılmıştır. (Şekil 1.a)
- %67 Dolgu: Köpük, hücre hacminin üçte ikisine dağıtılmıştır. (Şekil 1.b)
- %100 (Tamamen Dolgulu): 105 hücrenin tamamı PUF ile doldurulmuştur.



Şekil 1. Çekirdek yapının iki farklı durumu için PUF doluluk oranlarını gösteren katı modeller.

3.2. Malzeme özellikleri ve sonlu elemanlar yöntemi varsayımları

Sonlu elemanlar modelinin doğruluğu, geometrik model, başlangıç ve sınır şartlarıyla beraber malzeme özelliklerinin de gerçek durum ile uyumlu olmasıyla sağlanabilir. Bu çalışmada yüzey elemanı olarak kullanılan intraply hibrit kompozit malzeme özellikleri yazar tarafından daha önce yapılmış deneysel bir çalışmadan elde edilmiştir [5]. 8 tabakalı, 0°/90° yönlenme açısına sahip plain (düz) dokuma şeklinde, karbon/aramid elyafli hibrit kumaşlar ile üretilen intraply hibrit kompozit plakanın malzeme özellikleri Şekil 2’te gösterilmiştir.

Engineering Data: Material View

 **Aramid/Carbon**  

Fibers only

Density 1,4349e-06 kg/mm³

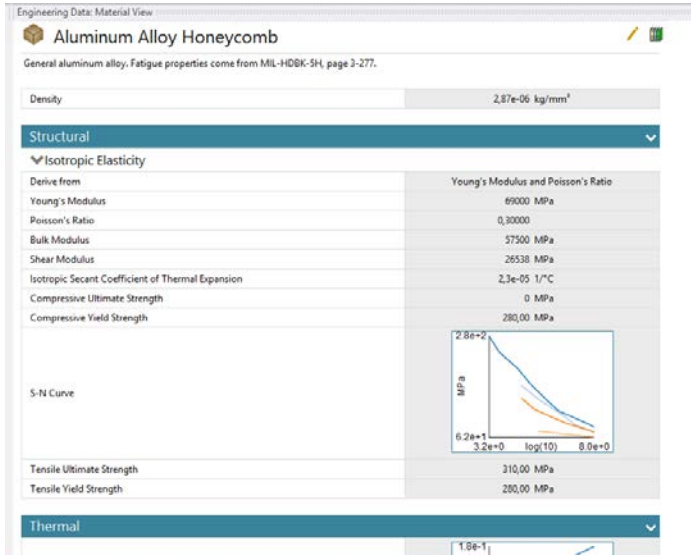
Structural

▼ Orthotropic Elasticity

Young's Modulus X direction	18800 MPa
Young's Modulus Y direction	19000 MPa
Young's Modulus Z direction	3400,0 MPa
Poisson's Ratio XY	0,28000
Poisson's Ratio YZ	0,28000
Poisson's Ratio XZ	0,35000
Shear Modulus XY	1300,0 MPa
Shear Modulus YZ	1300,0 MPa
Shear Modulus XZ	7000,0 MPa

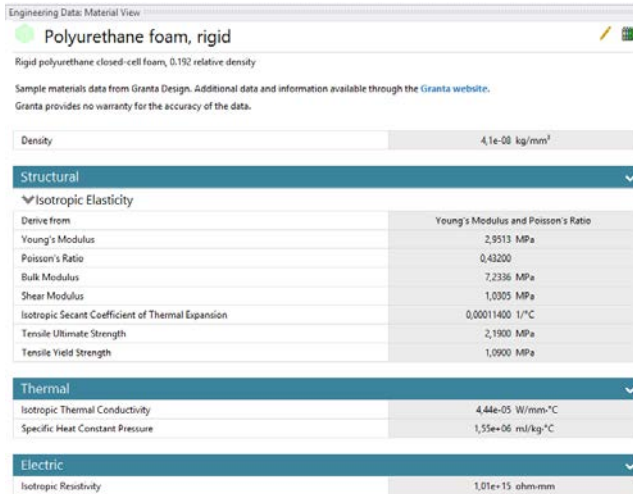
Şekil 2. Karbon-aramid elyafli intraply hibrit kompozit plakaların malzeme özellikleri [5]

Çekirdek yapı olarak kullanılan Al bal peteğine ait malzeme özellikleri Şekil 3’te gösterildiği gibi ANSYS’in malzeme kütüphanesinden alınmıştır [11].



Şekil 3. Al bal peteği çekirdek yapıya ait malzeme özellikleri [11]

- Poliüretan Köpük: Hafif bir viskoelastik katı madde olarak modellenmiştir. Yoğunluk ve elastik modül, orta yoğunluklu yapısal PUF için ANSYS'in kütüphanesinden alınan değerler Şekil 3'te gösterilmiştir [11].

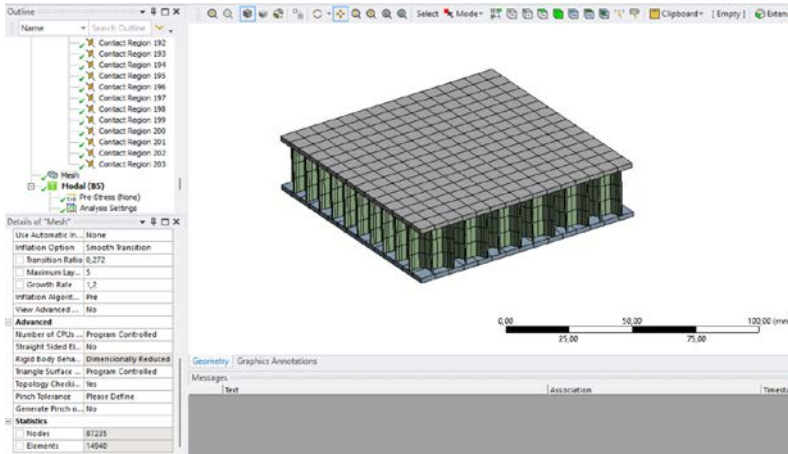


Şekil 4. PUF yapıya ait malzeme özellikleri [11]

3.3. ANSYS Workbench® Modal Analiz

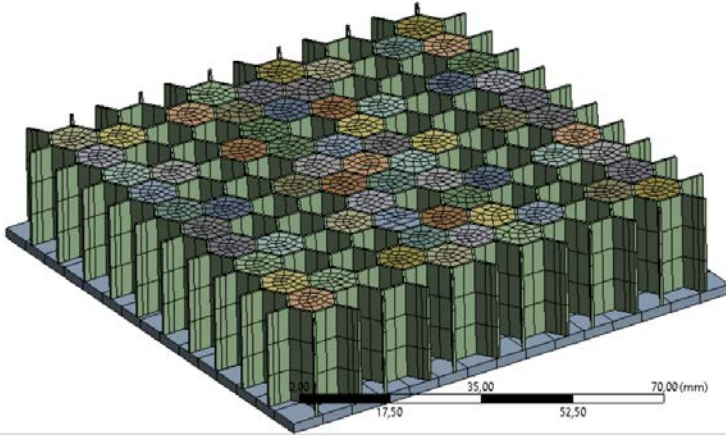
Sayısal modal analizler, yapısal dinamik kabiliyetleri ile ön plana çıkan, sonlu elemanlar yöntemine göre çözüm üreten ANSYS Workbench® paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

- Ağ Yapısı Oluşturma (Mesh): Mod şekillerini ve deformasyon yönündeki değişimleri belirlemek amacıyla, petek hücre duvarlarına ve çekirdeğin bu yüzeyler ile ortak kenarları arasındaki arayüzlere yüksek yoğunluklu bir ağ yapısı uygulanmıştır (Şekil 5). Genel olarak yüksek mertebeli, 3 boyutlu ve 20 düğümlü (node) bir katı eleman olan SOLID186 kullanılmıştır. Temas, kontak yüzeylerde ise TARGE170 ve CONTA174 ile ağ yapısı oluşturulmuştur.



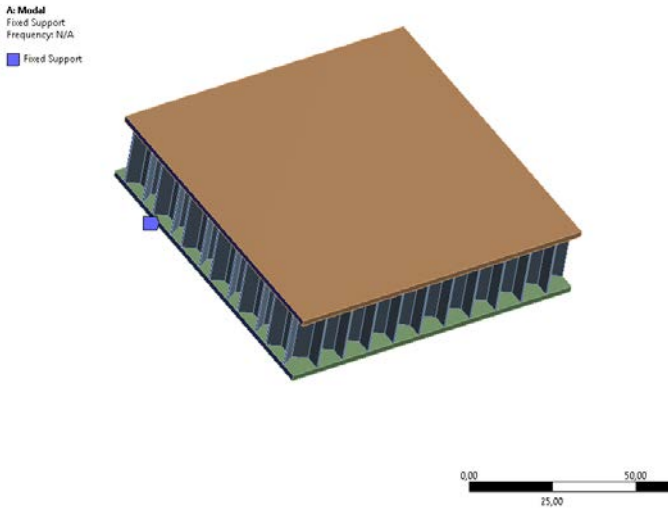
Şekil 5. Sandviç yapıya ait ağ yapısı

Örnek olarak %67 doluluk oranı için oluşturulan bir ağ yapısı Şekil 6'da gösterilmiştir. Burada ağ yapısının; malzeme türü ve kontak yüzeyleri dikkate alınarak yüzey plakası, Al bal peteği ve PUF yapı için farklı tür ve yoğunluk ile oluşturulduğu görülmektedir (Şekil 6).



Şekil 6. %67 doluluk oranı için oluşturulan ağ yapısı (mesh)

- Sınır Koşulları: Sandviç kompozit panelin 100 mm'lik üst- alt kenar kalınlığı (2.05 mm) ve Al bal peteğinin o yüzeyler ile ortak kenarlarının tüm serbestlik dereceleri kısıtlanarak (Fixed Support) diğer kenarlar serbest bırakılmıştır. Böylece sayısal modal analiz yapılırken 'Ankastre-serbest-serbest-serbest' sınır koşulu uygulanmıştır (Şekil 7).

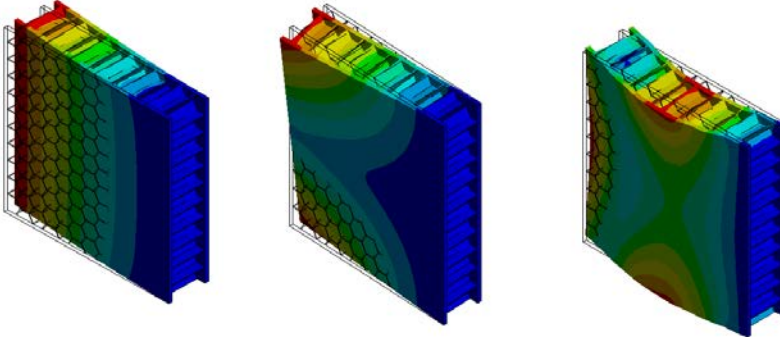


Şekil 7. Ankastre-serbest-serbest-serbest sınır şartı

- Çözücü Yöntem: Sayısal modal analiz için Block Lanczos yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, yapısal modal analizde tipik olarak görülen büyük ve simetrik özdeğer problemleri için oldukça yaygın olarak kullanılır.

4. SANDVIÇ PANELLERİN KARAKTERİZASYONU

Dinamik karakterizasyon, sadece frekans ve sönüm oranlarını belirlemekten ibaret değildir; bu kavram aynı zamanda her modla ilişkili fiziksel deformasyonu anlamayı gerektirir. Bu kapsamda yapılan sayısal analiz ile üç farklı mod şekli ve bu modlara ait doğal frekans değerleri elde edilmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. Doğal frekans sonuçları karşılaştırılan modlar (soldan sağa doğru 1., 2. ve 3. mod)

4.1. Düzlem için temel modlar

‘Ankastre-serbest-serbest-serbest’ sandviç panelinin birinci modu, tipik olarak panelin uzunluğu boyunca gerçekleşen birincil bir eğilme hareketi ile karakterize edilir. Maksimum yer değiştirme, sabitlenmiş sınırın karşısındaki serbest kenarda meydana gelir. PUF ilavesi, eğilme modunun frekansında azalmaya sebep olmuş ancak mod şeklini değiştirmemiştir. Bu durum eğilme rijitliği açısından hibrit yüzey plakalarının etkili

olduğunu ve PUF ilavesinin mod şekli üzerinde kritik bir parametre olmadığını göstermektedir.

4.2. Sönümleme ve enerji dağılımı

Modal analizin ana odak noktası frekans ve mod şekilleri olsa bile sönümlemenin titreşim özellikleri üzerindeki rolü göz ardı edilemez [1,10]. PUF dolgu maddesinin viskoelastik yapısının gerilme ve gerinim arasında bir faz gecikmesine sebep olduğu ve bunun da tüm modlarda önemli ölçüde enerji dağılımına sebep olduğu görülmüştür [12].

5. BULGULAR VE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZ

Farklı PUF doluluk oranına ve intraply elyaf takviyeli hibrit kompozit yüzey plakasına sahip sandviç panellerin mod şekli ve frekans değişimine dair sayısal modal analiz sonuçları aşağıda Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Farklı PUF doluluk oranlarına sahip sandviç kompozit yapıların doğal frekans değerleri

Doğal frekanslar	PUF doluluk oranı			
	%0	%33	%67	%100
1. Doğal frekans (Hz)	1580.6	1566.3	1559.2	1548.0
2. Doğal frekans (Hz)	2072.1	2055.9	2048.9	2038.6
3. Doğal frekans (Hz)	6826.2	6782.0	6721.4	6684.1

5.1. Frekans azalma eğilimleri

En belirgin bulgu, PUF dolgu oranının %0’dan %100’e yükseldikçe doğal frekanslarda görülen tutarlı azalmaydı. Bu ters orantı ilişkisi, sandviç yapıda köpüğe bağlı oluşan kütle değişiminin, rijitlik değişiminden daha baskın olduğunu göstermektedir. Bu durum tasarım hususunda kritik bir bilgi verir. PU köpük dolgusu sönümlemeyi ve darbe direncini artırırken [1,6], doğal frekansı düşürebilmektedir. Bu durum dikkate alınarak sistemin çalışma frekansı ve dış etkilerin frekansı arasında uyarlama yapılabilir.

5.2. Literatürle karşılaştırmalı analiz

Bu sonuçlar, alandaki birkaç önemli çalışma ile uyumludur:

- Yumuşak Çekirdek ve Sert Çekirdek: Vaidya ve ark. [13] ile Aydın ve Gündoğdu [1], yumuşak çekirdekli sandviç yapılarda doğal frekansın, çekirdek / toplam kalınlık oranına ve dolgu yoğunluğuna karşı oldukça duyarlı olduğunu, literatürle [9,10] uyumlu bir şekilde ifade etmişlerdir.
- Optimizasyon Algoritmaları: Souza ve ark. [14] tarafından Al paneller üzerine yapılan araştırmada, sayısal modelleri deneysel verilerle uyumlu hale getirmek için optimizasyon kullanılmıştır. Bu çalışmada, Al bal peteği çekirdeğe yapılan PUF dolgu oranlarının optimize edilmesiyle çalışma koşulları açısından daha avantajlı konfigürasyonların belirlenebileceği değerlendirilmiştir.
- Çekirdek Yapı geometrisi: Çekirdek malzemesi olarak farklı geometrik yapılara sahip petekler üzerine yapılan çalışmalar [15], iç geometrinin belirli titreşim tepkilerine göre uyarlanabileceğini göstermekte ve altıgen hücre sayısının (bu çalışmada 105 adet) gözlemlenen frekans kararlılığında kilit bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır.

5.3. Hibritleşmenin etkisi

Karbon/aramid intraply hibritlerin kullanılması, bu çalışmayı klasik metalik yüzeyli veya tek tür elyaf takviyeli polimerik (FRP) kompozit yüzey tabakası kullanan çalışmalardan ayırmaktadır. Böylece yüksek doğal frekans (karbon) ve yüksek sönümleme kapasitesine (aramit) sahip avantajlı yapılardan yararlanılmıştır [5].

6. SONUÇLARIN İYİLEŞTİRİLMESİ

Bu çalışma kapsamlı bir sayısal analiz yapmakla birlikte, elde edilen sonuçlar birtakım eksiklikler içermektedir.

- Deneysel Doğrulamanın Eksikliği: Mevcut çalışmadaki malzeme özellikleri deneysel çalışmalara dayansa bile elde edilen bulgular tamamen sayısaldır. Tahmin edilen frekansları doğrulamak için darbe-çekiç ve lazer (veya ivmeölçerler) kullanılarak deneysel modal analiz yapılması gerekmektedir [1,16,17].
- Varsayılan Homojenlik: PUF, homojen bir malzeme olarak modellenmiştir. Ancak, gerçek hayattaki köpük oluşumu, yoğunluk gradyanlarına ve hücre boyutu farklılıklarına yol açabilir ve bu durum yerel dinamik tepkiyi etkileyebilir [1,18].
- Frekans Aralığı: Analiz, ilk modlar ile sınırlı tutulmuştur. Çekirdek seviyesindeki deformasyonlara ve yerel rezonanslara daha duyarlı olabilecek daha yüksek frekanslı modlar incelenmemiştir.
- Basitleştirilmiş Arayüz: Hibrit kompozit yüzey plakaları ile Al bal peteği çekirdek ve PUF arasındaki bağlantı bölgesinin mükemmel bir yapışma ile birleştiği kabul edilmiştir. Uygulamada, yapıştırıcı tabakanın sonuçları etkileyebilecek kadar kendine özgü kalınlığı ve sönümleme özelliklerine sahip olduğu varsayılmaktadır [1,2].

7. GELECEKTE YAPILABİLECEK ÇALIŞMALAR

Elde edilen sayısal bulguları daha genelleştirmek amacıyla, gelecekte aşağıdaki alanlarda çalışma yapılması tavsiye edilmektedir.

- Malzeme Özelliklerinin Doğrulanması: Gelecekteki çalışmalar kapsamında ayrı ayrı sandviç numunelerin üretilerek deneysel modal analizlerin yapılması planlanmıştır. Bu üretimlerde kullanılan yüzey plakası (karbon/aramid hibrit kompozit) ve çekirdek yapıların (PUF) elastik ve viskoelastik özelliklerin malzeme bilgilerinin deneysel olarak belirlenmesi yapılmalıdır.
- Sönümleme Oranının Belirlenmesi: Her mod için gerçek sönümleme oranlarının belirlenmesi amacıyla deneysel modal analizler yapılacaktır. Ayrıca bu sonuçları tahmin edebilmek amacıyla, uygun sayısal modeller oluşturulacaktır.
- Doğrusal Olmayan Dinamikler: PUF'nin doğrusal olmayan davranışının daha belirgin hale geldiği yüksek genlikli titreşimlere veya darbe yüklemelerine karşı bu panellerin tepkisinin araştırılması planlanmıştır [3].
- Çevresel Kararlılık: Hem PUF hem de aramid elyafları çevresel faktörlere karşı duyarlı olduğundan [5,9,18], değişken termal ve nem koşulları altında bu hibrit panellerin uzun vadeli performansı üzerine araştırma yapılması gerekmektedir.

Son olarak bu çalışmanın, modern mühendislikte istenen yüksek performanslı, hafif, titreşime dayanıklı sandviç yapıların geliştirilmesinde önemli bir rol üstleneceği düşünülmektedir.

REFERANSLAR

- [1] Aydın M. R. and Gundogdu, O. (2018). Vibration analysis of honeycomb sandwich composites filled with polyurethane foam by Taguchi Method. *Steel and Composite Structures*, 28(4), 461–470.
<https://doi.org/10.12989/SCS.2018.28.4.461>
- [2] R. S. Jayaram, V. A. Nagarajan, and K. P. V. Kumar, "Polyester pinning effect on flexural and vibrational characteristics of foam filled honeycomb sandwich panels," *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 14, no. 7, pp. 1314–1326, 2017. DOI: 10.1590/167978253688
- [3] Hassanpour Roudbeneh, F., Liaghat, G., Sabouri, H. et al. High-velocity impact loading in honeycomb sandwich panels reinforced with polymer foam: a numerical approach study. *Iran Polym J* 29, 707–721 (2020).
<https://doi.org/10.1007/s13726-020-00833-5>
- [4] Mozafari, H., & Najafian, S. (2019). Vibration analysis of foam filled honeycomb sandwich panel – numerical study. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 17(3), 191–198.
<https://doi.org/10.1080/14484846.2017.1338325>
- [5] Aydın, M. R., Acar, V., Cakir, F., Gündoğdu, Ö., & Akbulut, H. (2022). Comparative dynamic analysis of carbon, aramid and glass fiber reinforced interply and intraply hybrid composites. *Composite Structures*, 291, 115595.
[10.1016/j.compstruct.2022.115595](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115595).
- [6] Khondabi, R., Khodarahmi, H., Hosseini, R. et al. Dynamic plastic response of sandwich structures with graded polyurethane foam cores and metallic face sheets exposed to uniform blast loading: experimental study and

- numerical simulation. J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. 45, 526 (2023). <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04384-7>
- [7] Rao, S. S. (2018). Mechanical vibrations (6th ed.). Pearson.
- [8] Swolfs Y, Gorbatikh L, Verpoest I. Fibre hybridisation in Polymer Composites: A Review. Compos A Appl Sci Manuf 2014;67:181–200. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.08.027>.
- [9] Florence A, Jain AR Tony B, Ramraji K. Tailoring of mechanical, thermal and vibration behaviour of hybrid fibre with core honeycomb energy-absorbing materials reinforced polymer sandwich laminates. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. 2025;239(4):1857-1865. doi:10.1177/09544089231189609.
- [10] Namala, K. K., & Varanasi, L. N. (2026). Effect of core design on energy absorption and structural integrity of sandwich composites-A comprehensive review. Journal of Sandwich Structures & Materials, 10996362261462330. <https://doi.org/10.1177/1099636226146233>.
- [11] ANSYS® Online Help Documentation, ANSYS Software; ANSYS Inc. 2019. Canonsburg, PA, USA.
- [12] Safaei, B. Frequency-dependent damped vibrations of multifunctional foam plates sandwiched and integrated by composite faces. Eur. Phys. J. Plus 136, 646 (2021). <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01632-4>
- [13] Vaidya AS, Uddin N, Vaidya UK. Vibration Response of 3-D Space Accessible Sandwich Composite. Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2009;28(13):1587-1599. doi:10.1177/0731684408089860
- [14] R. D. Souza, C. B. Mainardes, M. A. M. Shzu, and S. H. da S. Carneiro, "Dynamic model adjustment of a honeycomb

sandwich panel using response surface methods and parametric optimization algorithms," CILAMCE, Dec. 2024. DOI: 10.55592/cilamce.v6i06.10197

- [15] Z. Bai, C. Chen, X. Yang, Y. Zhong, and R. Liu, "Dynamic Characteristics and Effective Stiffness Properties of Sandwich Panels with Hierarchical Hexagonal Honeycomb," *Materials*, vol. 16, no. 17, Aug. 2023. DOI: 10.3390/ma16175741
- [16] Bendada, A., Boutchicha, D., Miri, M., Chouiter, A. (2019). Characterization of Honeycomb Sandwich Composite Panel Using Numerical Methods and Experimental Modal Analysis Validation. 1st International Conference on Numerical Modelling in Engineering . NME 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 408–416, Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2273-0_32
- [17] Charuk, A., Dunaj, P. (2022). Modal Analysis of Honeycomb Core Sandwich Panel Using Finite Element Method. Lecture Notes in Networks and Systems, Conference paper, 66–73, vol 377. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-93377-7_6
- [18] Khan T, Acar V, Aydin MR, Hülagü B, Akbulut H, Seydibeyoğlu M. Özgür. A review on recent advances in sandwich structures based on polyurethane foam cores. *Polymer Composites*. 2020; 41: 2355–2400. <https://doi.org/10.1002/pc.25543>

ISI YÖNETİMİ KOŞULLARI ALTINDA CAM ELYAF TAKVİYELİ VASKÜLER KOMPOZİTLERİN DİNAMİK DAVRANIŞI¹

Muhammet Raci AYDIN²

1. GİRİŞ

Son yıllarda yaygın kullanım alanı bulan yeni nesil elyaf takviyeli polimerik kompozitler, çalışma ortamları gereği yüksek veya düşük çalışma sıcaklıklarına maruz kalabilmektedir. Bu durum kompozit yapıların kullanım ömürleri ve performans verimliliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu soruna karşı kompozit yapıya entegre edilen mikrovasküler kanallar (vaskülarizasyon) aracılığıyla yapılan aktif termal yönetim, umut vaat eden bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Bu kanallardan sıcak veya soğuk akışkanların geçirilmesiyle kompozit yapıların iç sıcaklığı dolayısıyla verimli çalışma ortamı düzenlenebilir. Bununla beraber bu kanalların varlığı ve içlerindeki akışkan yükü, kompozit yapıların yapısal dinamik davranışlarını doğrudan etkilemektedir. Bu çalışma kapsamında, değişken kanal çaplarına göre vaskülarize edilmiş cam elyaf takviyeli kompozit kirişler SolidWorks® programıyla modellenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle çözüm üreten ANSYS Workbench® paket programı kullanılarak serbest-serbest sınır koşuluna göre modal analizler gerçekleştirilmiştir. Böylece kompozit yapı içerisindeki

¹ Bu çalışmanın bir kısmı özet olarak “5. Uluslararası Mühendislikte İleri Teknolojiler Kongresi, ICADET 2024, 25-27 Eylül 2024, Bayburt” kongresinde sunulmuştur.

² Doç. Dr., Iğdır Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, ORCID: 0000-0002-4120-1816.

kanallarda farklı sıcaklıklarda akışkan varlığı dikkate alınarak ilk üç mod şekli ve bu modların doğal frekansları belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, kendi arasında karşılaştırılarak hem termal hem de yapısal dayanıklılık açısından kompozit yapıların kullanım ve tasarım parametreleri hakkında önemli bulgular elde edilmiştir.

Gelişmiş yapısal malzemeler, özellikle de elyaf takviyeli polimer (FRP) kompozitler, aşırı sıcaklık dalgalanmalarının yaşandığı ortamlarda giderek daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu durum polimer matrisin cam geçiş sıcaklığını (T_g) aşabilecek sıcaklıklara kadar ısınması gibi sorunlara sebep olabilmektedir. Kompozitteki matris yapı sıcaklık etkisiyle yumuşadığında, elyafların maruz kaldıkları yükü etkili bir şekilde aktarma kabiliyeti zarar görür ve bu durum ciddi hasarlara sebep olabilir [1]. Bunun üstesinden gelebilmek için yalıtımlı veya ısıya dayanıklı kaplamaların kullanımını gerektiren geleneksel pasif termal yönetim yöntemler yetersiz kalabilmektedir. Aynı zamanda bu yöntemler genellikle ağırlık ve hacim artışına sebep olduğu için tasarım ve kullanım parametrelerini olumsuz etkileyebilmektedir. Biyolojik varlıklardan ilham alınarak kompozit yapılarda yapılan vaskülarizasyon, bu soruna yenilikçi bir yaklaşım sunar. Bir kanal ağının doğrudan kompozit plakaya entegre edilmesiyle, aktif termal düzenleme yeteneğine sahip bir dolaşım sistemi elde edilmiş olur [2], [3]. Bu mikrovasküler ağlar, akışkanların dolaşımı yoluyla ısıyı dağıtarak azaltabilir/artırabilir veya belirli kimyasal reaksiyon hızlarını korumak için kontrollü soğutma/ısıtma sağlayabilir. Isı yönetiminin ötesinde bu ağlar, kendi kendini onarma [4], [5], [6], hasar görselleştirme [2] ve elektromanyetik açıdan yeniden yapılandırma [7] gibi avantajlar sağlayabilir.

Vaskülarizasyon ile yapılan ısı yönetiminin kompozit yapının çalışması açısından birçok faydası bulunmaktadır. Buna rağmen kompozit yapının bütünlüğü ve diğer yapısal özellikleri

açısından vaskülarizasyonun çok boyutlu bir şekilde incelenmesi gereklidir. Kompozit yapıda yapılan bu düzenleme ile oluşan iç boşluklar, takviye elemanlarının sürekliliğini bozar ve yük taşıma özelliklerini olumsuz etkiler. Ayrıca hareketli akışkanın kütle etkisi yapının dinamik özelliklerini değiştirir. Doğal frekanslar ve mod şekilleri, sistemin rezonans davranışını ve kararlılığını etkilediği için modal özellikler titreşimli yapıların tasarımında önemli parametrelerdir. Bu çalışma vaskülerize edilmiş cam elyaf takviyeli kompozit kirişlerin sayısal modal analizine odaklanarak, kanal sayısı ve geometrisinin, akışkanın niteliğinin yapısal titreşimler üzerine hakkında ayrıntılı bir değerlendirme sunmaktadır.

2. LİTERATÜR

2.1. Kompozitlerde vaskülarizasyon kavramı

Geleneksel kompozit yapıların spesifik uygulamalardaki eksikliklerini gidermek amacıyla çok fonksiyonlu vaskülerize kompozit yapılar geliştirilmiştir. Aktif sistemleri yapısal bir malzemeye entegre etme yeteneği, çevresel uyaranlara akıllı tepkiler verilmesini sağlar. Vaskülarizasyondaki temel amaçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Aktif Isı Yönetimi: Mekanik özellikleri korumak için iç sıcaklıkları düzenleme [1], [8].

Kendi Kendini İyileştirme: Yapısal bütünlüğü yeniden sağlamak için mikro çatlaklara ve delaminasyon bölgelerine sıvı iyileştirici maddeler ulaştırma [5], [6], [9].

Hasar Algılama ve Görselleştirme: Sızıntıları tespit etmek veya iç hasar modellerini görselleştirmek için vasküler ağdan yararlanma [1], [10].

Bu sistemlerin tasarımı, zıt ilişkili bir durumu açığa çıkarır. Yani damar yapının hacimsel oranının artırılması,

soğutma verimliliğini ve iyileştirici maddenin iletimini iyileştirirken, kompozitin genel sertliğini ve mukavemetini de azaltır [11].

2.2. Üretim yöntemleri

Kompozit plakalar içerisinde damar ağları (vasküler yapı) oluşturmak için çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Üretim stratejisinin seçimi, istenen kanal çapına, yapının karmaşıklığına ve ilgili elyaf türü-matris sistemine bağlı değişebilir [2,12, 13].

2.2.1. Feda edilecek bileşenlerin buharlaşması (VaSC: Vaporization of Sacrificial Components)

Bu işlem, hassas mikrokanalların oluşturulması için en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Bu teknik, kanallı yapı oluşması için kompozit tabakalar arasına feda edilecek elyafların yerleştirilmesini içerir. Bu elyaflar tipik olarak kalay(II) oksalat (SnOx) [8], [13], [14] gibi bir katalizörle işlenmiş polilaktik asitten (PLA) oluşur. Çapları 300 μm ile 500 μm arasında değişebilen [1], [15] PLA elyaflar, otomatik dokuma veya manuel yerleştirme yoluyla elyaf kumaşların arasına entegre edilir. Reçine genellikle vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM) yöntemi kullanılarak infüze edilip kürlendikten sonra, parçanın tamamı bir son kürleme ısıtma döngüsüne tabi tutulur. Vakum altında ve 200 °C civarındaki sıcaklıklarda PLA depolimerize olur ve buharlaşır; geride temiz, birbirine bağlı kanallar bırakır [8], [12].

2.2.2. İçi boş tüpler ve çıkarılabilir preform yöntemler

Feda edilebilir polimerlere bir alternatif, kalıcı içi boş mikrokanalların/elyafların kullanılmasıdır. Acar ve ark., içi boş cam borular kullanarak yapılan üretimlerin, eğilme mukavemetinden önemli ölçüde taviz vermeden termal yönetim için işlevsel kanallar oluşturabileceğini göstermiştir [16]. Bu tasarımlarda, içi boş mikro kanallar doğrudan damar ağı işlevi

görür. Diğer yöntemler arasında PTFE kaplı paslanmaz çelik teller (150–400 µm çap) [11] veya düşük erime noktalı lehim [15] gibi çıkarılabilir şablonların kullanımı bulunmaktadır. Bu şablonlar, kompozit nihai kürlenme durumuna ulaştıktan sonra manuel olarak çekilir veya eritilerek çıkarılır.

2.2.3. Önden polimerizasyon (frontal polymerization) ve 3 boyutlu baskı

Önden polimerizasyon ve vaskülarizasyon (FP-VaSC) gibi yeni gelişen teknikler, damarlı termosetlerin hızlı bir şekilde üretilmesini mümkün kılmaktadır. Bu süreçte, matrisi sertleştirmek ve aynı anda fedakâr şablonları depolimerize etmek için kendiliğinden yayılan bir ekzotermik reaksiyondan faydalanılır [4, 17]. Ayrıca, biyolojik damar yapılarına benzeyen karmaşık, çok boyutlu fedakâr şablonlar (örneğin, poli(propilen karbonat) veya PPC kullanılarak) oluşturmak için 3B baskı giderek daha fazla kullanılmaktadır. Bu da akış modellerinin optimize edilmesini sağlamaktadır [4], [6].

2.3. Isı yönetimi performansı

Vasküler soğutmanın yapısal performansı korumadaki başarısı ile ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır [2]. Örneğin, aktif olarak soğutulan cam/epoksi kompozitlerin, 325 °C ortam sıcaklıklarında eğilme sertliklerinin %90'ından fazlasını korudukları gösterilmiştir; buna karşın, soğutulmayan kontrol numuneleri, T_g (bazı sistemler için yaklaşık 152 °C) üzerindeki matris yumuşaması nedeniyle tamamen zarar görmüştür. Aktif soğutma, yüksek akış hızlarında 120 W'ı aşan ısı uzaklaştırma oranlarına olanak tanıyarak etkili bir şekilde iç sıcaklığı güvenli seviyelerde tutar [1].

3. MALZEMELER VE YÖNTEMLER

Vaskülarizasyon sayesinde kanallardan sıcak veya soğuk akışkanların sirkülasyonu yapılarak kompozit yapının ısıtılma veya soğutulması sağlanabilir. Böylece uygun çalışma sıcaklıkları elde edilerek kompozit yapıda lokal kırılmalar, stres yığılmaları vb. yapısal bozulmalar engellenmiş olacaktır. Vaskülarizasyonun bu olumlu yönlerinin dışında kompozit yapının mekanik ve dinamik özellikleri üzerine birtakım etkileri belirlenmiştir. Ancak bu durumun dinamik özellikler açısından araştırılması ile ilgili çalışmalar henüz yeterli seviyede değildir. Bu amaç doğrultusunda; cam elyafı, düz örgülü (plain dokuma), 12 tabakalı, 0°/90° yönelim açısına sahip kompozit yapının malzeme özellikleri deneysel olarak yapılmış bir literatür çalışmasından alınmıştır.

3.1. Sayısal analiz

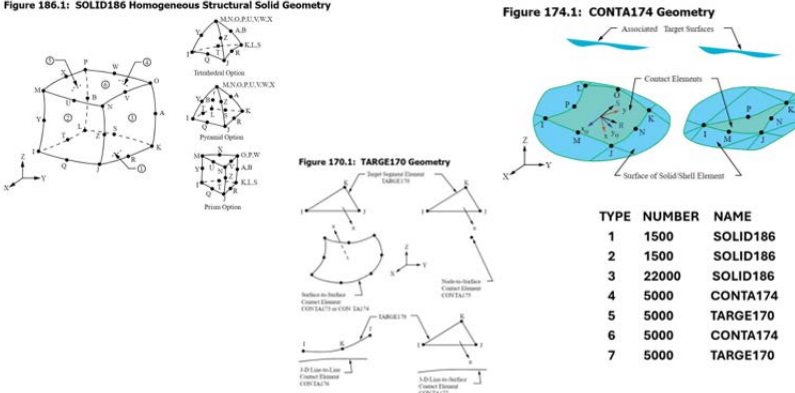
Bu çalışmada, cam elyaf takviyeli vasküler kompozitlerin dinamik davranışını değerlendirmek için sayısal bir yöntem kullanılmaktadır. Cam elyaf takviyeli kompozit yapının malzeme özellikleri daha önce yazar tarafından yapılmış deneysel çalışmadan alınmıştır [18]. Sayısal modal analizler gerçekleştirilerek, çeşitli vasküler konfigürasyonların dinamik davranışı belirlenmiştir. Böylece deneysel üretimler açısından bir ön çalışma yapılarak zaman ve maliyet açısından bir avantaj sağlanmıştır.

3.2. ANSYS'te sayısal modal analiz

Katı modelleme işlemi SolidWorks® programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal modal analiz, ticari bir sonlu elemanlar yazılımı olan ANSYS Workbench® paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kompozit kirişler, üç boyutlu yapısal cisimler olarak modellenmiştir.

Geometri: Daha önceki bir çalışmamdan deneysel olarak elde edilen 12 tabakalı cam elyaf takviyeli polimerik kompozit yapıya ait geometrik ölçüler ve bu yapıya ait deneysel mekanik ve karakteristik değerler malzeme özellikleri referans alınmıştır. Bu kapsamda 250 mm uzunluğunda, 25 mm genişliğinde ve 2.67 mm kalınlığında dikdörtgen kirişler oluşturulmuştur [18]. Kirişin merkez eksenini boyunca, uzunluk yönünde, tek kanallı ve çift kanallı, üç farklı (0.75 mm, 1.5 mm ve 2.25 mm) kanal çapı dikkate alınmıştır.

Ağ Oluşturma (Mesh Yapısı): Yüksek mertebeden 3 boyutlu yapısal elemanlar (SOLID186, TARGE170 ve CONTA174) kullanılarak mesh yapısı oluşturuldu (Şekil 1). Doğal frekans sonuçlarının, özellikle gerilme gradyanlarının en yüksek olduğu damar kanallarını çevreleyen bölgelerde, eleman boyutundan bağımsız olmasını sağlamak için bir ağ duyarlılık çalışması gerçekleştirildi.



Şekil 1. Sayısal analizde kullanılan ağ yapısı (mesh) türleri [19]

3.3. Malzeme özellikleri

Kompozit yapı, ortotropik bir malzeme olarak modellenmiştir. Cam elyaf takviyeli polimerik (GFRP) kompozit kirişe ve sıcak ve soğuk suya ait malzeme özellikleri Şekil 2’de gösterilmiştir.

GFRP kompozitinin mekanik özellikleri (Aydın et al. 2022)

Properties (Unit)	Values
Density (kg/m ³)	1682.7
E1 (GPa)	10.3
E2 (GPa)	12.0
E3 (GPa)	3.4
ν_{12}	0.2
ν_{13}	0.2
ν_{23}	0.35
G12 (GPa)	1.9
G13 (GPa)	1.9
G23 (GPa)	4.5

Sıvı suyun mekanik özellikleri (0.01°C) (ANSYS)

Properties (Unit)	Values
Density (kg/m ³)	1000
Bulk Modulus (MPa)	1960
ν	0.49
.....	

Sıvı suyun mekanik özellikleri (60°C) (ANSYS)

Properties (Unit)	Values
Density (kg/m ³)	983.28
Bulk Modulus (MPa)	2250
ν	0.49
.....	

Şekil 2. Sayısal analizde kullanılan malzeme özellikleri

3.4. Modal Analiz ve sınır koşulları

Doğal frekansları ve mod şekillerini elde etmek amacıyla ANSYS Workbench kullanılarak dinamik davranış değerlendirilmiştir.

Sınır Koşulları: Serbest-serbest sınır koşulu uygulanmıştır. Bu sayede kompozit kiriş tamamen kısıtlamasız bir cisim olarak doğal modlarında titreşebilir. Bu, sınır koşulu numuneye zarar vermeden vaskülarizasyonun yapısal etkilerini belirlemek için idealdir.

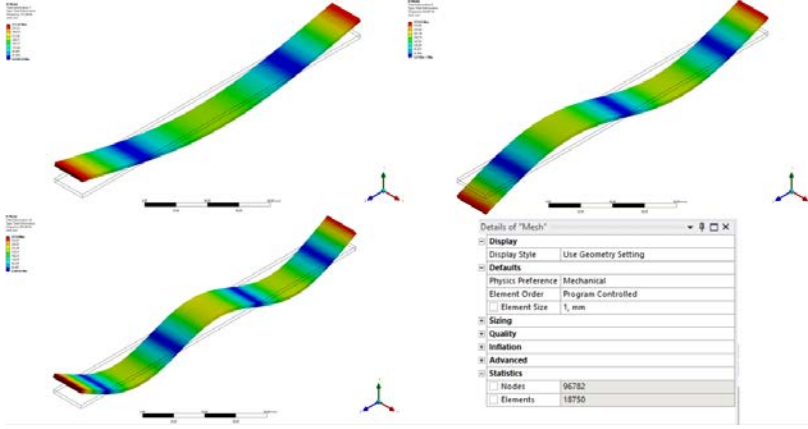
Frekans Aralığı: Her numune grubu için düzlem içi ilk üç mode şekli belirlenmiş ve bu modlara ait doğal frekans (w_1 , w_2 , w_3) değerleri kaydedilmiştir.

Sayısal modal analizler,

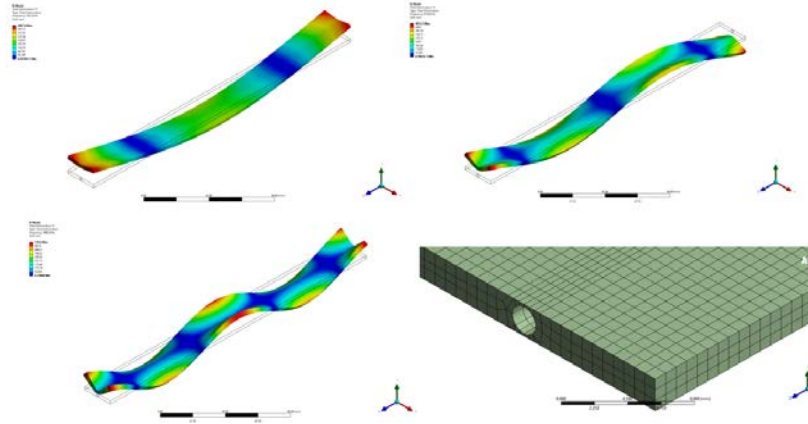
- Kanalsız durum,
- Kanalların boş olma durumu,
- Kanalların içerisinde 0,01°C’de soğuk su olma durumu,
- Kanalların içerisinde 60°C’de sıcak su olma durumu

dikkate alınarak oda sıcaklığındaki (22°C’de) gerçekleştirildi. Daha sonra her bir durum için ilk üç doğal frekansı ve mod şekilleri dikkate alınarak sonuçlar yorumlandı.

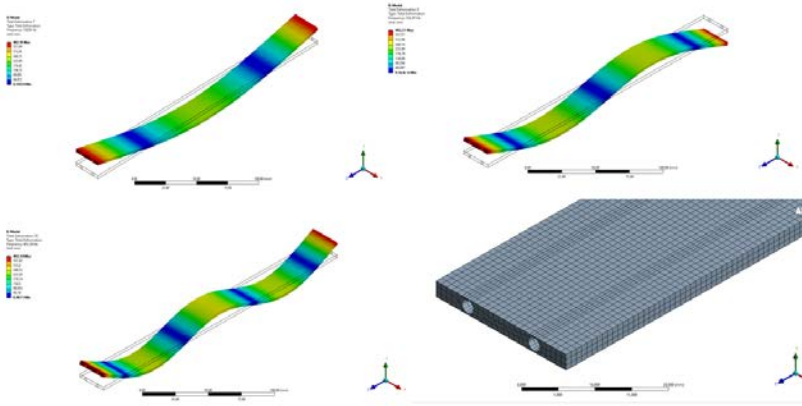
Kanalsız kiriş (referans yapı), içi boş ve içi dolu, tek kanallı ve iki kanallı kirişlere ait mod şekilleri ve mesh bilgisi Şekil 3 - Şekil 8’de gösterilmiştir. Şekillerin daha anlaşılır olması için 2.25 mm kanallı yapılar tercih edilmiştir. Burada üst sol şekil, 1. Titreşim modunu; üst sağ şekil, 2. Modu; alt sol şekil, 3. Modu göstermektedir.



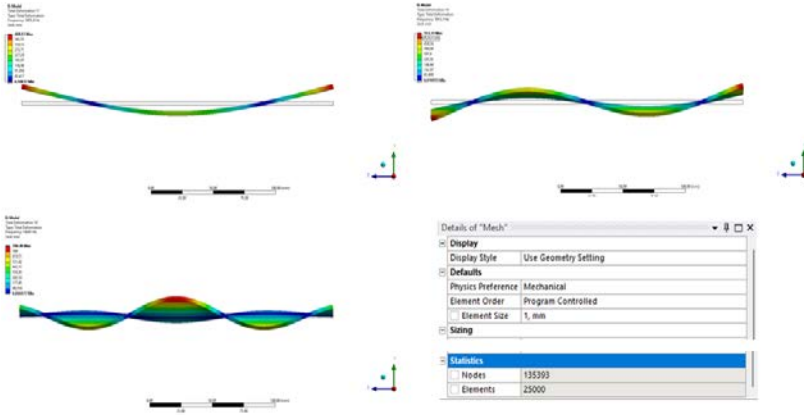
Şekil 3. Kanalsız kompozit kirişe ait mod şekilleri



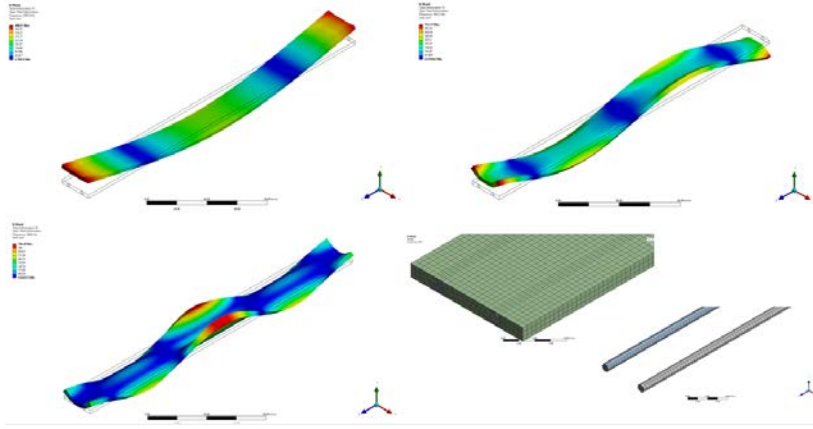
Şekil 4. 2.25 mm tek kanallı boş kompozit kirişe ait mod şekilleri ve mesh yapısı (ağ örgüsü)



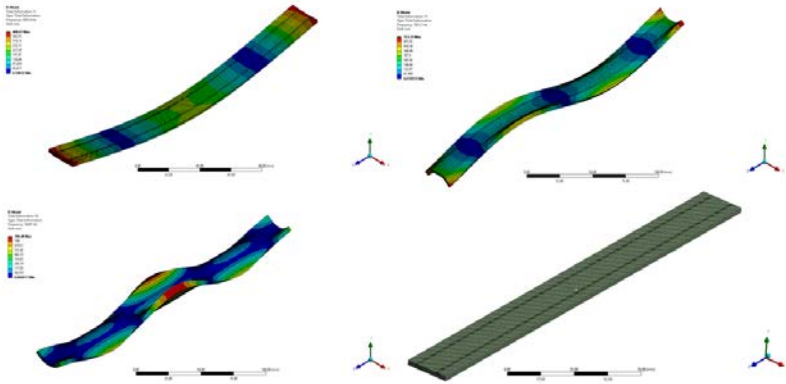
Şekil 5. 2.25 mm çift kanallı boş kompozit kirişe ait mod şekilleri ve mesh yapısı (ağ örgüsü)



Şekil 6. 2.25 mm tek kanallı soğuk ve sıcak sulu kompozit kirişe ait mod şekilleri ve mesh bilgisi



Şekil 7. 2.25 mm çift kanallı dolu kompozit kirişe ait mod şekilleri ve mesh yapısı



Şekil 8. 2.25 mm çift kanallı sıcak ve soğuk akışkanlı kompozit kirişe ait mod şekilleri ve mesh yapısı

4. ISI YÖNETİMİ VE AKIŞKAN YÜKLEME VARSAYIMLARI

4.1. Akışkan durumları

Vasküler kanallarda üç farklı akışkan durumu analiz edilmiştir:

1. İçi Boş (Boş): Kanallar hava ile doldurulmuştur; bu durum, aktif akışın olmadığı temel vaskülarize yapıyı temsil eder.
2. Soğuk Akışkan Varlığı: Kanallar, 0.01 °C sıcaklığında soğuk su ile doldurulur. Bu durum, kompozitin yapısal sertliğini (structural stiffness) korurken akışkan kütlesini de hesaba katar.
3. Sıcak Akışkan Varlığı: Kanallar, ısıtılmış bir akışkanla doldurulur. Bu durum hem akışkan kütlesini hem de çevredeki polimer matrisin sertliğini (stiffness) azaltan bir termal gradyanı hesaba katar.

4.2. Akışkan kütlesinin modellenmesi

Akışkan, damar kanallarının iç yüzeylerine dağılmış yapısal olmayan bir kütle olarak modellenmiştir. Akışkanın yoğunluğu (soğuk su için 1000 kg/m³, sıcak su için 983 kg/m³), her kanal çapı için ek kütlenin hesaplanmasında kullanılmıştır.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Analizlerde kullanılan malzeme özellikleri literatürden alınmıştır [18,19]. Farklı kanal çapları için sayısal modal analizler yapılarak, ayrı ayrı kanalsız (referans numunesi tek ve çift kanallı, içi boş, içi soğuk su ve sıcak su ile dolu) vasküler kompozit yapıların düzlem içi ilk üç doğal frekansları (Tablo 1) ve mod şekilleri belirlenmiştir.

Tablo 1. Kanalsız (referans numunesi), tek ve çift kanallı, içi boş, içi soğuk su ve sıcak su ile dolu vasküler kompozit yapıların düzlem içi ilk üç doğal frekansları

Kanalsız, referans numunesi		0.75 Tek Kanallı Boş		1.5 Tek Kanallı Boş		2.25 Tek Kanallı Boş	
Mode	Frequency [Hz]	Mode	Frequency [Hz]	Mode	Frequency [Hz]	Mode	Frequency [Hz]
1	117.2	1	117.6	1	118.4	1	118.9
2	323.1	2	324.1	2	326.3	2	327.7
3	633.0	3	635.0	3	639.3	3	642.0

0.75 Çift Kanallı Boş		1.5 Çift Kanallı Boş		2.25 Çift Kanallı Boş	
Mode	Frequency [Hz]	Mode	Frequency [Hz]	Mode	Frequency [Hz]
1	118.0	1	119.7	1	120.9
2	325.1	2	329.8	2	333.0
3	636.9	3	646.1	3	652.3

Tablo 2. 0.75 mm tek ve çift kanallı, içi boş, içi soğuk su ve sıcak sulu vasküler kompozit yapıların düzlem içi ilk üç doğal frekansları

Tek Kanallı	0.75 Boş	0.75 Soğuk	0.75 Sıcak
Mode	Frequency [Hz]	Frequency [Hz]	Frequency [Hz]
1	117.6	258.3	273.0
2	324.1	708.7	748.8
3	635.0	1375.6	1451.7

Çift Kanallı	0.75 Boş	0.75 Soğuk	0.75 Sıcak
Mode	Frequency [Hz]	Frequency [Hz]	Frequency [Hz]
1	118.0	345.7	367.7
2	325.1	951.9	1012.2
3	636.9	1861.6	1979.2

Tablo 3. 1.5 mm tek ve çift kanallı, içi boş, içi soğuk su ve sıcak sulu vasküler kompozit yapıların düzlem içi ilk üç doğal frekansları

Tek Kanallı	1.5 Boş	1.5 Soğuk	1.5 Sıcak
Mode	Frequency [Hz]	Frequency [Hz]	Frequency [Hz]
1	118.4	921.8	985.8
2	326.3	2432.1	2585.3
3	639.3	4207.9	4400.9

Çift Kanallı	1.5 Boş	1.5 Soğuk	1.5 Sıcak
Mode	Frequency [Hz]	Frequency [Hz]	Frequency [Hz]
1	119.7	1314.0	1407.3
2	329.8	3592.3	3842.9
3	646.1	6853.0	7297.5

Tablo 4. 2.25 mm tek ve çift kanallı, içi boş, içi soğuk su ve sıcak sulu vasküler kompozit yapıların düzlem içi ilk üç doğal frekansları

Tek Kanallı	2.25 Boş	2.25 Soğuk	2.25 Sıcak
Mode	Frequency [Hz]	Frequency [Hz]	Frequency [Hz]
1	118.9	1827.4	1948.1
2	327.7	4120.6	4285.1
3	642.0	5463.4	5545.3

Çift Kanallı	2.25 Boş	2.25 Soğuk	2.25 Sıcak
Mode	Frequency [Hz]	Frequency [Hz]	Frequency [Hz]
1	120.9	2835.1	3035.8
2	333.0	7380.9	7813.7
3	652.3	10167.0	10241.0

Kanal sayısının artması doğal frekans değerlerinde artmaya sebep olmuştur. Sıcak su dolu kanallarda soğuk suya nazaran daha yüksek frekans değerleri elde edilmiştir. Kanalların boş bırakılmasıyla kütlede azalma gerçekleşmiştir. Bu durumda rijitlikte düşüşe sebep olmasına rağmen kütle etkisinin daha baskın olmasından dolayı frekansta artış olarak görülmüştür. Sıcak ve soğuk sulu sistemlerde rijitlik değişimindeki artış ve

toplam kütledeki azalma doğal frekansta artmaya sebep olmuştur. Bu durum konunun teorisiyle tamamen uyumludur [20].

5.1. Doğal frekansların kanal çapına duyarlılığı

Sayısal sonuçlar, damar geometrisi ile dinamik tepki arasında net bir ilişki olduğunu ortaya koymaktadır. İçi boş durumda, kanal çapının artırılması kirişin hem kütlelerinde hem de rijitliğinde bir azalmaya yol açar. Burada, kanallar kirişin eğilme açısından nötr eksenine yakın konumdadır. Doğal frekans değerleri açısından yapının rijitliğindeki (k) azalma kütledeki (m) azalmaya nazaran daha fazla etkili olmuştur.

İlk üç doğal frekans için: Birinci temel mod (w_1): Tipik olarak birincil bir eğilme modudur. Boşluksuz numuneden sırasıyla 0.75 mm, 1.5 mm ve 2.25 mm çap boşluğuna sahip numunelerin birinci doğal frekanslarında (w_1)'de bir artış eğilimi gözlenmiştir. Bu durum ilgili konfigürasyonlarda kütle etkisinin rijitliğe nazaran daha baskın faktör olduğunu gösterir.

Yüksek mertebeli modlar (w_2, w_3): Daha yüksek frekanslı eğilme veya burulma şekillerini içeren modlarda da benzer bir durum söz konusudur.

5.2. Kanallardaki akışkan yükünün etkisi

Vasküler kanallara akışkan eklenmesi, kütle-rijitlik oranını önemli ölçüde değiştirir.

- Eklenen Kütle Etkisi: Kanallarda soğuk akışkan bulunduğunda, doğal frekanslar içi boş duruma kıyasla belirgin bir şekilde artmıştır. Bunun nedeni, yapı içerisindeki boşluğu dolduran daha düşük yoğunluğa sahip akışkanın yapının toplam kütle üzerindeki etkisidir. Böylece yapının toplam kütlelerinde meydana gelen düşüş, frekans değerlerinde artışa sebep olmuştur. Çift kanallı 2.25 mm çaplı yapıda akışkan kütle toplam kiriş ağırlığının önemli bir kısmını oluşturur.

- Isıl ve Kütle Etkilerinin Birleşimi: Sıcak akışkan senaryosunda, frekanslar daha da artmıştır. Akışkandan gelen termal enerji, matrisin yumuşamasına neden olarak genel olarak yapısal rijitliği azaltmıştır. Azalan kütle ve rijitliğin sinerjik etkisi dikkate alındığında, tüm konfigürasyonlarda sıcaklık artışıyla beraber daha yüksek frekans değerleri elde edilmiştir.

5.3. Mod şekilleri

Vaskülarizasyonun lokalize deformasyonlara yol açıp açmadığını belirlemek amacıyla mod şekilleri niteliksel olarak incelenmiştir. Sonuçlar, incelenen çaplar için temel mod şekillerinin, boşluksuz bir kompozit kirışin mod şekilleriyle büyük ölçüde tutarlı kaldığını göstermektedir. Eğilme modları beklenen yapı profilleri korunmuştur; ancak yapısal direncin azalması nedeniyle sıcak akışkan bulunma durumlarında yer değiştirme genlikleri daha yüksek seviyelere çıkmıştır.

6. SAYISAL YÖNTEMİN SINIRLAMALARI

Bu çalışmada kullanılan sayısal yöntemi, deneysel olarak doğrulanmış bulgularla ayırt etmek büyük önem taşımaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi, parametrik çalışma için kapsamlı bir çerçeve sunmasına rağmen sonuçları değerlendirirken aşağıdaki bazı faktörlerin dikkate alınmasında fayda bulunmaktadır. Kararlı Durum Varsayımları: Analiz, kararlı durumdaki termal ve akışkan koşullarını varsaymaktadır. Gerçek çalışma sırasında meydana gelebilecek dinamik basınç dalgalanmaları veya laminar olmayan akış etkileri hesaba katılmamıştır. Arayüzey Etkileri: Model, matris ile kanal duvarları arasında mükemmel bir bağ olduğunu varsaymaktadır. Uygulamada, VaSC gibi üretim yöntemleri, sönmülemeyi ve yerel rijitliği etkileyebilecek kalıntılar bırakabilir veya reçine bakımından zengin bölgeler oluşturabilir [11].

Malzeme Homojenliği: Kompozit yapı homojenleştirilmiş ortotropik özelliklerle modellenmiştir. Tek tek elyaf demetleri ile damar kanalları arasındaki ayrık etkileşim dikkate alınmamıştır; bu durum, kanal boyutunun elyaf örgüsüyle karşılaştırılabilir olduğu mikrovasküler ağlar için önemli olabilir.

7. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, sayısal modal analiz yoluyla damarlı (vasküler) cam elyaf takviyeli kompozitlerin dinamik davranışları termal yönetim koşullarıyla incelenmiştir. Sayısal analizler ANSYS Workbench® paket programıyla gerçekleştirilmiştir. Vasküler kompozit kirişlerin farklı kanal çaplarına göre modal analizleri icra edilmiştir. Serbest-serbest sınır koşulu altında ilk üç doğal frekans ve mod şekilleri belirlenmiştir. Böylece vasküler kompozitlerin termal yönetim altında dinamik davranışları sistematik olarak ortaya konmuştur.

Elde edilen başlıca sonuçlar şunlardır:

- Vasküler Geometri: Kompozit yapıların doğal frekansları, gömülü kanalların çapına duyarlıdır. Büyük çaplı kanallar, yapının rijitliğini dolayısıyla da mod şekilleri ve frekans değerlerini değiştirmiştir.
- Akışkan Kütlesi: Damar ağındaki akışkan varlığı ek bir kütle görevi görür ve içi boş yapılara kıyasla doğal frekanslarda ölçülebilir bir artışa sebep olmuştur.
- Çok Fonksiyonlu Tasarım: Yapılan sayısal analizler, yapıdaki dinamik değişimleri tahmin etmek için güvenilir bir yöntem sunmaktadır. Böylece zararlı titreşim rejimlerinden kaçınırken termal yönetim gereksinimlerini karşılayacak damar ağlarının tasarlanması mümkün olacaktır.

Bunlara ek olarak sıcak akışkan sirkülasyonu, hem kütle ekleyerek hem de termal yumuşama yoluyla matris rijitliğini azaltarak dinamik davranışta önemli değişikliklere neden olabilir [1, 11]. Aktif ısıtma veya soğutmada kanallarının entegrasyonu, kompozit yapının çalışma performansını korumak için etkili bir araç olmakla birlikte, yapının dinamik davranışı üzerindeki etkisi de dikkate alınmalıdır. Gelecekteki araştırmalar, bu sayısal tahminlerin deneysel olarak doğrulanmasına ve termal verimlilik ile yapısal dinamik bütünlük arasındaki dengeyi optimize eden daha karmaşık, üç boyutlu damar ağlarının geliştirilmesine odaklanabilir. Termal yönetimli kompozit yapılarda uygun çalışma aralığını belirlemek amacıyla sıcaklık değişimi için kullanılacak kanal çaplarının toplam hacme göre en uygun oranlarının bulunması için optimizasyon çalışması yapılması ve bu çalışmaların deneysel modal analiz testleriyle desteklenmesi sonuçların tutarlılığı açısından önemlidir.

KAYNAKÇA

- [1] Coppola, A. M., Griffin, A. S., Sottos, N. R., and White, S. R. “Retention of Mechanical Performance of Polymer Matrix Composites Above the Glass Transition Temperature by Vascular Cooling.” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 78, 2015, pp. 412–423. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.07.012>.
- [2] Saeed, M.-U., Chen, Z., and Li, B. “Manufacturing Strategies for Microvascular Polymeric Composites: A Review.” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 78, 2015, pp. 327–340. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.028>.
- [3] Cetkin, E. (2017). Vascular structures for smart features: self-cooling and self-healing. *Journal of Thermal Engineering*, 3(4), 1338–1345. <https://doi.org/10.18186/journal-of-thermal-engineering.330185>.
- [4] Aniskevich, A., Vidinejevs, S., Kulakov, V. L., & Strekalova, O. (2015). Development of Composites with a Self-Healing Function. *Materials Science*, 21(1), 32–37. <https://doi.org/10.5755/J01.MS.21.1.5354>.
- [5] Huang, C. Y., Williams, H. R., Trask, R. S., & Bond, I. P. (2007). “Self-healing composites incorporating vascular networks”. In *Proceedings of the First International Conference on Self Healing Materials. Noordwijk aan Zee, The Netherlands* (Vol. 9).
- [6] Patrick, J. F., Hart, K. R., Krull, B. P., Diesendruck, C. E., Moore, J. S., White, S. R., & Sottos, N. R. (2014). Continuous self-healing life cycle in vascularized structural composites. *Advanced materials*, 26(25), 4302–4308. DOI: 10.1002/adma.201400248.

- [7] Devi, U., Pejman, R., Phillips, Z. J., Zhang, P., Soghrati, S., Nakshatralla, K. B., ... & Patrick, J. F. (2021). A Microvascular-Based Multifunctional and Reconfigurable Metamaterial. *Advanced Materials Technologies*, 6(11), 2100433. <https://doi.org/10.1002/admt.202100433>.
- [8] Coppola, A., Sottos, N., & White, S. (2014). Thermomechanical characterization of actively cooled vascularized composites. *Purdue University Libraries Scholarly Publishing Services*. <https://docs.lib.purdue.edu/ses2014/mss/mmms/23>.
- [9] Coope, T. S., Wass, D. F., Trask, R. S., & Bond, I. P. (2014). Repeated self-healing of microvascular carbon fibre reinforced polymer composites. *Smart materials and structures*, 23(11), 115002. DOI 10.1088/0964-1726/23/11/115002.
- [10] Hamilton, A. R., White, S. R., & Sottos, N. R. (2007). Characterization of microvascular networks for self-healing using fluorescent digital image correlation. *Proceedings of the first international conference on self healing materials 18-20 April, Noordwijk aan zee, The Netherlands*.
- [11] Huang, C. Y., Trask, R. S., and Bond, I. P. "Characterization and Analysis of Carbon Fibre-Reinforced Polymer Composite Laminates with Embedded Circular Vasculature." *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 7, no. 49, 2010, pp. 1229–1241. <https://doi.org/10.1098/rsif.2009.0534>
- [12] Patrick, J. F., Krull, B. P., Garg, M., Mangun, C. L., Moore, J. S., Sottos, N. R., and White, S. R. "Robust Sacrificial Polymer Templates for 3D Interconnected Microvasculature in Fiber-Reinforced Composites." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*,

- vol. 100, 2017, pp. 361–370. pp. 361–370.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.05.022>
- [13] Dalton, B., Dixon, D., McIlhagger, A., and Archer, E. “Sacrificial Component Fabrication for Optimised Production of Micro-Vascular Polymer Composite.” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 74, no. 1, 2015, article 012005.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/74/1/012005>
- [14] Esser-Kahn, A. P., Thakre, P. R., Dong, H., Patrick, J. F., Vlasko-Vlasov, V., Sottos, N. R., Moore, J. S., & White, S. R. (2011). Three-dimensional microvascular fiber-reinforced composites. *Advanced Materials*, 23(32), 3654–3658. <https://doi.org/10.1002/ADMA.201100933>
- [15] Cohades, A., Branfoot, C., Rae, S., Bond, I. P., & Michaud, V. (2018). Progress in Self-Healing Fiber-Reinforced Polymer Composites. *Advanced Materials Interfaces*, 5(17), 1800177.
<https://doi.org/10.1002/ADMI.201800177>
- [16] Acar, V., Seydibeyoğlu, M. Ö., & Altan, M. C. (2024). Interply hybridization of hollow glass fiber reinforced vascular composites. *Polymer Composites*, 45(9), 8163–8175. <https://doi.org/10.1002/pc.28331>.
- [17] Z. Chen and X. Zhang, “Manufacturing multifunctional vascularized composites by through-thickness frontal polymerization and depolymerization: A numerical study on the impact of sacrificial fiber configurations,” *Composites Science and Technology*, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.compscitech.2023.110394.
- [18] Aydin, M. R., Acar, V., Cakir, F., Gündoğdu, Ö., & Akbulut, H. (2022). Comparative dynamic analysis of carbon, aramid and glass fiber reinforced interply and intraply

hybrid composites. Composite Structures, 291, 115595.
10.1016/j.compstruct.2022.115595.

[19] ANSYS® Online Help Documentation, ANSYS Software;
ANSYS Inc. 2019. Canonsburg, PA, USA.

[20] Rao, S. S. (2018). Mechanical vibrations (6th ed.). Pearson.

EKLEMELİ İMALATLA ÜRETİLEN MALZEMELERİN MEKANİK, DİNAMİK VE TERMAL DAVRANIŞLARI: BASKI ORYANTASYONUNUN DENEYSEL MODAL PARAMETRELERE ETKİSİ

Muhammet Raci AYDIN¹

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat, havacılık, otomotiv ve biyomedikal mühendisliği dahil olmak üzere çeşitli endüstrilerde karmaşık geometriler ve yüksek performanslı bileşenler üretmek için dönüştürücü (transformative) bir teknoloji olarak ortaya çıkmıştır. Eklemeli imalat, malzemeyi katman katman biriktirerek veya eriterek üç boyutlu yapılar oluşturabilen yeni ve gelişmekte olan bir teknolojidir. Bu yöntemle malzeme israfı olmadan veya çok az zaiyat ile karmaşık yapıların üretilmesi mümkündür. Eklemeli imalat esnasında oluşan hızlı termal döngüler ve büyük sıcaklık gradyanları önemli düzeyde kalıntı gerilmelerine ve bozulmalara yol açmaktadır. Bu durum, optimize edilmiş tarama stratejileri, alt tabaka ısıtması ve düşük sıcaklıkta dönüşüm gösteren tozların kullanımıyla azaltılabilir. Mekanik özellikler genellikle anizotropi ve yapı yönelimine duyarlılık, yüzey pürüzlülüğü ve gözeneklilik gibi iç kusurlarla karakterize edilebilir. Bu yapılar, geleneksel metallere karşı hafif bir alternatif olabilmesine karşı tabakalar arası bağlanma ve arayüz performansı açısından ciddi sıkıntılar barındırabilmektedir. Bu derleme, özellikle eklemeli imalat yöntemiyle üretilen yeni nesil metal alaşımlı ve elyaf

¹ Doç. Dr., Iğdır Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, ORCID: 0000-0002-4120-1816.

takviyeli türleriyle birlikte bu malzemelerin mekanik, dinamik ve termal davranışlarına ilişkin son teknolojik çalışmaları bir araya getirmiştir. Aynı zamanda bu yapıların sağladığı tasarım esnekliği ve bu yapıların endüstriyel ölçekte güvenli bir şekilde kullanımı için aşılması gereken teknik engeller nazara verilmiştir.

Eklemeli imalat (Eİ), geleneksel talaşlı-talaşsız imalat yöntemlerine kıyasla parçaları doğrudan dijital CAD modelleri kullanarak katman katman oluşturan yenilikçi bir yöntemdir. Bu sayede geleneksel tekniklerle üretilmesi genellikle imkânsız olan veya çok maliyetli olan iç soğutma kanalları ve hafif kafes yapılar gibi karmaşık geometrilerin üretilmesi mümkün olmuştur [1]. Son yıllarda, yeni nesil titanyum, alüminyum ve nikel bazlı alaşımların yanı sıra sürekli ve kısa elyaf takviyeli polimerler de dahil olmak üzere, Eİ için özel olarak tasarlanmış yüksek performanslı malzemelerin geliştirilmesinde büyük bir artış yaşanmıştır [2, 3, 4].

Tasarım özgürlüğü ve malzeme israfının azalması gibi avantajlara rağmen, Eİ parçaları üretim sürecinde karmaşık fiziksel olgulara maruz kalmaktadır. Hızlı erime ve katılaşma döngüleri, yüksek termal gradyanlara yol açarak lokalize termal genleşme ve büzülmelere neden olduğu için önemli ölçüde kalıntı gerilmeler ve boyutsal bozulmalar meydana gelir [1, 5].

Bu malzemelerin mekanik, dinamik ve termal davranışlarının anlaşılması, güvenlik açısından kritik uygulamalarda kullanılabilmesi için hayati önem taşır. Bu derleme, bu davranışları karakterize etmek için hem deneysel hem de sayısal çerçevelerden yararlanan son dönem çalışmaları değerlendirerek, gelecekteki akademik ve endüstriyel gelişmeler için bir temel oluşturmaktadır.

Son yıllarda Eİ yöntemi ile üretilen malzemelerin mekanik, dinamik ve termal davranışlarının araştırılarak özet halinde edilmiştir. Buna ek olarak farklı baskı oryantasyonuna

sahip PLA ile üretilen kiriş numunelerin serbest-serbest sınır şartına göre deneysel model analizleri gerçekleştirilmiştir.

2. EKLEMELİ İMALAT ÇALIŞMALARINDA METODOLOJİK YAKLAŞIMLAR

Eklemeli imalat süreçlerinin karmaşıklığı, yüksek doğrulukta deneysel ölçümleri gelişmiş hesaplamalı simülasyonlarla birleştiren, çok yönlü bir karakterizasyon yaklaşımını gerektirmektedir.

2.1. Deneysel test teknikleri

Araştırmacılar, Eİ malzemelerinin performansını doğrulamak için çok çeşitli deneysel yöntemler kullanmaktadır. Genellikle tek eksenli çekme testi, akma mukavemeti ve nihai çekme mukavemeti (UTS) gibi ASTM E8, ASTM 3039, ASTM 3479 veya ISO 527 gibi standartlara uygun olarak gerçekleştirilen geleneksel yöntemler kullanılmaktadır [2, 3, 6]. Yarı statik testlerin ötesinde, yorulma testi (ASTM 3479), özellikle elyaf takviyeli termoplastikler ve Inconel alaşımları gibi malzemeler için uzun vadeli dayanıklılığı değerlendirmek açısından hayati önem taşır [2, 7].

Gelişmiş ölçüm teknikleri, deneysel verilerin çözünürlüğünü önemli ölçüde artırmıştır. Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC) ve kızılötesi termografi, testler sırasında yerel gerilmeleri ve sıcaklık alanlarını haritalamak için kullanılmaktadır [8, 9]. Dikey yer değiştirme sensörleri ve termokupllar gibi yerinde sensörler, baskı süreci sırasında deformasyon ve termal geçmişe ilişkin gerçek zamanlı veriler sağlar [5, 10]. Mikroyapısal ve gerilme karakterizasyonu için, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Elektron Geri Saçılım Difraksiyonu (EBSD) ve X-Işını Difraksiyonu (XRD), tane morfolojisini, kırılma yüzeylerini ve kalıntı gerilme durumlarını

analiz etmek amacıyla kullanılır [4, 11, 12]. Yüksek gerinim hızındaki davranışlar, darbe direncini ve dinamik kararlılığı değerlendirmek amacıyla genellikle Split-Hopkinson Basınç Çubuğu (SHPB) veya düşme testi kuleleri kullanılarak incelenir [3, 6, 12].

2.2. Sayısal analiz ve hesaplamalı modelleme

Sayısal modelleme, kapsamlı deneme-yanılma deneylerine gerek kalmadan Eİ süreçlerinin sonuçlarını tahmin etmek için güçlü bir araçtır. Sonlu Elemanlar Analizi (FEA), termomekanik tepkileri simüle etmek için en yaygın kullanılan tekniktir ve genellikle ABAQUS veya ANSYS gibi yazılımlar aracılığıyla uygulanır [2, 13, 14]. Bu modellerde, eleman aktivasyonunu ve zamanla değişen ısı kaynaklarını ele almak için sıklıkla özel alt programlar kullanılır [13, 15].

Son gelişmeler arasında, mikro ölçekli fenomenler (tanecik büyümesi ve kristal plastisitesi gibi) ile ürün ölçeğindeki etkiler (parça ölçeğindeki bozulma ve kalıntı gerilme gibi) arasındaki boşluğu dolduran çok ölçekli modelleme platformları yer almaktadır [11, 16, 17]. Örneğin, kristal plastisitesi sonlu eleman modelleri (CPFEM), içsel deformasyon mekanizmaları ve tanecik ölçeğindeki kalıntı gerilmeleri hakkında bilgi sağlamak için kullanılır [11, 18]. Ayrıca, geçiş bazlı simülasyonların verimliliğini artırmak amacıyla yüksek performanslı hesaplama (HPC) ve GPU tabanlı çözücüler geliştirilmiştir; bu sayede kafesler ve büyük ölçekli bileşenler gibi karmaşık geometrilerin analizi mümkün hale gelmiştir [19, 20].

3. TERMAL DAVRANIŞLAR VE KALINTI GERİLİM YÖNETİMİ

Eİ ile üretilen bir parçanın termal geçmişi, nihai kalitesinin en önemli belirleyicisidir. Seçici Lazer Ergitme (SLM:

Selective Laser Melting) ve Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme süreçleri (DED: Directed Energy Deposition), lazer noktasının yakınında büyük termal gradyanlar ve hızlı soğuma hızlarına sebep olur [1, 21]. Bu tekrarlayan sıcak ve soğuk döngüler, lokalize sıkıştırma ve gerilime neden olarak, şekil kaybına, destek yapılarından ayrılmaya veya yapısal sorunlara (structural failure) yol açabilecek önemli kalıntı gerilimler oluşturur [1, 5].

Araştırmalar, bu termal etkileri yönetmek için çeşitli stratejiler belirlemiştir:

Alt tabaka ısıtma (Substrate heating): Platform sıcaklığının artırılmasının, üretilen parça ile taban arasındaki termal gradyanı en aza indirerek iç kalıntı gerilmeleri azalttığı gösterilmiştir [3, 16]. Kısa karbon fiberle takviye edilmiş naylon için, platform sıcaklığındaki 40°C'lik bir artış, Young modülünü ve çekme mukavemetini %10'un üzerinde artırmıştır [14].

Tarama stratejisinin optimizasyonu: Tarama uzunluğunun ve enerji girdisinin azaltılması, as-built kalıntı gerilimini önemli ölçüde düşürebilir [16, 17]. Geri çekilme hızının optimize edilmesi ve belirli tarama desenlerinin kullanılması da çarpılmayı azaltmada etkilidir [5].

Malzeme modifikasyonu: DED işlemlerinde düşük sıcaklıkta dönüşüm (LTT) özelliğine sahip önceden alaşımlanmış tozların kullanılması, soğuma sırasında östenitten martensite dönüşüm yoluyla çekme kalıntı gerilmelerini en aza indirebilir [22].

İşlem sonrası (Post-processing): Kalıntı gerilmeleri gidermek ve mekanik özellikleri iyileştirmek için sıklıkla ısıl işlemler önerilir, ancak bunlar belirli hücresel yapılar için her zaman önemli bir fayda sağlamayabilir [6, 21].

4. MEKANİK VE DİNAMİK PERFORMANS ANALİZİ

4.1. Yarı-statik ve yorulma özellikleri

Eİ malzemelerinin mekanik mukavemeti, genellikle haddelenmiş muadillerininkine eşittir veya aşar. Örneğin, Eİ ile üretilen sürekli elyaf takviyeli kompozitler (CFRC'ler), Al 6061-T6 alaşımını aşan bir çekme mukavemeti (UTS) sergileyebilir [2]. Benzer şekilde, Eİ yoluyla üretilen 7075 alüminyum alaşımları, T6 ısıtılma işleminden sonra 450 MPa'nın üzerinde akma mukavemetine ulaşabilir [23]. Yüzey pürüzlülüğü ve iç kusurlar çatlak başlangıç noktaları olarak işlev görebileceğinden, yorulma davranışı kritik bir konudur. Ti-6Al-4V'de yorulma özellikleri genellikle yüzey pürüzlülüğünün etkilerine bağlıdır ve bu da yüzey taşıma veya işleme gibi son işlemlerin yapılmasını gerektirir [24]. 316L paslanmaz çelik üzerine yapılan çalışmalar, yorulma çatlaklarının sıklıkla Si-Mn-O parçacıklarında başladığını göstermiştir; bu da temel bir performans sınırlamasıdır [25].

4.2. Dinamik tepki ve darbe direnci

Eİ, kafesler ve periyodik hücresel katılar gibi enerji emici yapıların oluşturulmasını mümkün kılar. A286 çelikten yapılmış petek kafesler, yüksek gerinim hızı yüklemesi altında üstün dinamik kararlılık sergilemiş ve SHPB testi sırasında daha düşük gerinim hızlarını ve minimum deformasyonu korumuştur. Bu yapılar, darbe direncini artıran kalıcı basınç kalıntı gerilmelerinden yararlanmaktadır [12]. Periyodik hücresel katı maddelerde, baskı sonrası kalan gerilimin sıkıştırma tepkisi üzerinde önemsiz bir etkiye sahip olduğu bulunurken, katman katman baskı süreciyle ortaya çıkan yapısal kusurlar ve mikro gözeneklilik daha belirleyici bir etkiye sahiptir [6].

4.3. Anizotropi ve Baskı Yönünün Etkileri

Eİ malzemelerinin ayırt edici bir özelliği, mekanik özelliklerinin anizotropisidir. Yapım yönü, mikro yapıyı önemli ölçüde etkiler ve genellikle termal gradyanları takip eden uzamış tanelere yol açar [25]. AlSi10Mg alaşımlarında, yatay baskı genellikle dikey yönetime kıyasla daha yüksek akma mukavemeti ve uzama sağlar [3, 18]. Bu durum genellikle mikro yapının elyaf dokusuna ve taneciklerin yükleme yönüne yönelimine atfedilir [18]. Kompozit malzemelerde, dolgu deseni ve parça geometrisi mukavemeti büyük ölçüde belirler; zira lif eğrilikleri ve arayüzler çok eksenli gerilme durumlarına ve erken arızaya neden olabilir [26].

5. YENİ NESİL METALİK VE ELYAF TAKVİYELİ MALZEMELER

5.1. İleri düzey metalik alaşımlar ve kafes yapılar

7075+Zr ve A286 çeliği gibi Eİ için özel olarak geliştirilen alaşımların geliştirilmesi, katılaşma çatlakları gibi geçmişten gelen zorlukların üstesinden gelmeye odaklanmaktadır [23]. Inconel 718 gibi yüksek performanslı alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda (650°C'ye kadar) olağanüstü korozyon direnci ve sünme özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir; ancak bu alaşımlar, elastik sınırlarının üçte ikisine ulaşabilen yüksek kalıntı gerilmelere maruz kalmaktadır [4, 21]. BCC ve BCCZ gibi kafes destek topolojileri, yüksek mukavemet-ağırlık oranları sağlarken parça deformasyonunu en aza indirmek amacıyla araştırılmaktadır [20].

5.2. Elyaf takviyeli termoplastik kompozitler

Eİ alanında kullanılan elyaf takviyeli polimerler (FRP'ler), karmaşık iç takviyelere sahip hafif ve yüksek mukavemetli parçalar üretme potansiyeline sahiptir. Sürekli elyaf

takviyeli termoplastik kompozitler (CFRTPC'ler), kontrollü elyaf yönelimi ile üretilir ve saf polimerlere kıyasla eğilme ve çekme mukavemetini önemli ölçüde artırır. Ancak bu malzemeler, zayıf mezo/mikro/nano ölçekli arayüzler nedeniyle genellikle düşük tabakalar arası kesme mukavemeti ve yetersiz arayüz performansı sorunlarıyla karşı karşıyadır [27]. Naylon veya ABS'de kısa karbon elyafların kullanılması da sertliği artırır, ancak yüksek baskı hızları veya katman süreleri arayüz bağlanmasını olumsuz etkileyebilir [28, 29].

6. EKLEMELİ İMALATLA ÜRETİLEN YAPILARIN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI

Eklemeli imalat, benzeri görülmemiş bir tasarım özgürlüğü ile üretim kaynaklı kısıtlamalar arasında bir denge kurmayı gerektirir.

6.1. Avantajlar

Tasarım esnekliği: Eklemeli imalat, başka türlü elde edilemeyen karmaşık şekillerin, iç boşlukların ve ince duvarların oluşturulmasına olanak tanır [15].

Ağırlık azaltma: Kafes ve köpük yapıların basılabilmesi, yapısal bütünlükten ödün vermeden önemli ölçüde hafifletme sağlar [2, 15].

Malzeme verimliliği: SLM ve DED gibi süreçler, malzeme israfını en aza indirerek veya hiç malzeme israfı olmadan karmaşık yapılar oluşturur [1].

Hızlı prototipleme: Kısa üretim süreleri ve karmaşık kalıplama ihtiyacının ortadan kalkması, 'tek parça olarak üretilmiş' çok parçalı bileşenlerin oluşturulmasını kolaylaştırır [15].

6.2. Dezavantajlar

Kalıntı Gerilmeler: Hızlı termal döngüler, çatlama ve bozulmaya neden olabilecek yüksek kalıntı gerilmelere yol açar [5, 11].

Yüzey Kalitesi: Basıldığı haliyle parçalar genellikle zayıf yüzey dokusu ve yüksek pürüzlülük gösterir; bu durum yorulma ömrünü olumsuz etkiler [24].

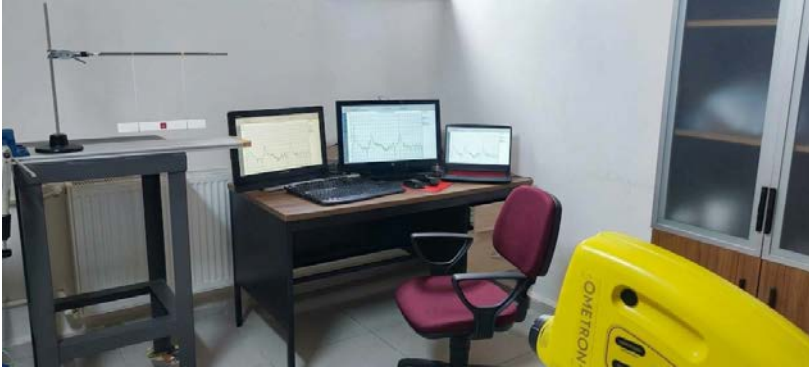
Kusurlar ve Gözeneklilik: Yapısal kusurlar, mikro gözeneklilikler ve katmanlar veya kaynak dikişleri arasındaki kusurlu birleşme, malzeme mukavemetini önemli ölçüde azaltabilir [6, 30].

Anizotropi: Yönlenmeye bağlı mekanik özellikler, tasarım ve simülasyon aşamasında dikkatle değerlendirilmelidir [18, 31].

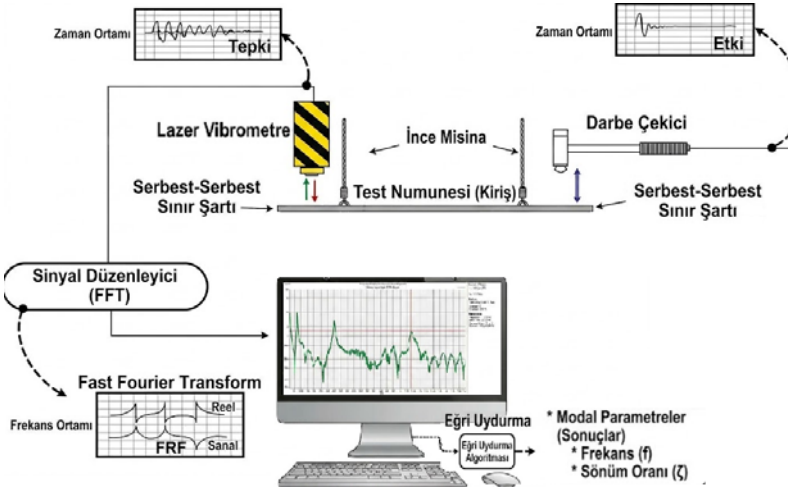
7. DENEYSEL MODAL ANALİZ TESTLERİ

DeneySEL model analiz testler kapsamında Eİ yöntemiyle Polilaktik asit (PLA) filament kullanılarak üretilen 2 farklı numune grubu (N1 ve N2) açısından değerlendirildi. PLA, Eİ uygulamalarında çok yaygın olarak kullanılan, bugüne kadar çok kapsamlı şekilde araştırılan biyobozunur bir polyester türüdür. Sahip olduğu avantajlar sayesinde PLA, tıp ve birçok endüstriyel uygulamada geleneksel petrokimya esaslı polimerlerin yerini alan önemli bir biyomalzemedir [32]. Birinci grup (N1) test numuneleri 0° baskı oryantasyonunda, ikinci grup (N2) test numuneleri 90° baskı oryantasyonunda 200 mm x 20 mm x 20 mm ebatlarında, 3B yazıcı kullanılarak üretilmiştir. Üretilen numunelerin doğal frekans ve sönüm oranı testleri ASTM E756-05 [33] standardına göre yapılmıştır. DeneySEL modal analiz testleri Atatürk Üniversitesi Makine Teorisi ve Dinamiği Laboratuvarı'nda icra edilmiştir. Titreşim özellikleri, bilgisayar tabanlı PULSE® (Brüel & Kjaer Sound & Vibration Measurement

/ Danimarka) titreşim ölçüm sistemi kullanılarak belirlenmiştir. Bu sistem, çok kanallı analiz yapabilen, çeşitli veri toplama üniteleri ve yazılım seçeneklerinden oluşan modüler bir yapıya sahiptir. Bu kapsamda kullanılan lazer optik ölçüm cihazı sayesinde ivmeölçer kullanımından kaynaklanabilecek ilave kütle etkisi ortadan kaldırılmış, böylece sonuçların güvenilirliği ve tekrarlanabilirliği artırılmıştır. Testler sırasında, numune üzerinde belirlenen noktalardan darbe çekici yardımıyla uyarım (tahrik kuvveti) uygulanmış ve sistemin dinamik cevabı ölçülerek transfer fonksiyonu (FRF) elde edilmiştir. Elde edilen veriler ME'scope VES® modal analiz yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Uygulanan tahrik kuvveti kuvvet transdüseri (darbe çekici) ile ölçülürken, sistem cevabı lazer vibrometre ile kaydedilmiştir (Şekil 1). Böylece serbest-serbest sınır şartına bağlı olarak test numunelerinin deneysel modal parametreleri (rezonans frekansı ve sönüm oranı) bulunmuştur. İlgili yazılım sönüm oranını yarı güç bant genişliği (half-power bandwidth) metoduyla doğrudan hesaplama kabiliyetine sahiptir. Şekil 2'te deneysel modal analiz için kullanılan deney düzeneği şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1. Deneysel modal analiz test laboratuvarı



Şekil 2. Deneyel titreşim ölçüm sisteminin şematik gösterimi

Her iki yönde üçer adet test numunesi kullanılarak testler icra edilmiştir. Doğal frekans ve sönüm oranı değerleri belirlendi.

Tablo 1. 0° ve 90° baskı oryantasyonlarında, aynı katman kalınlığında üretilen PLA numunelerinin deneyel modal analiz sonuçları

Numune Kodu	Baskı Oryantasyonu	Doğal Frekanslar (w_n)			Sönüm Oranları (ζ)		
		Birinci Doğal Frekans (Hz)	İkinci Doğal Frekans (Hz)	Üçüncü Doğal Frekans (Hz)	Birinci Sönüm Oranı (%)	İkinci Sönüm Oranı (%)	Üçüncü Sönüm Oranı (%)
N1	0°	82 ^{±0}	453 ^{±3}	1128 ^{±6}	2.03 ^{±0,24}	1.46 ^{±0,12}	1.01 ^{±0,15}
N2	90°	86 ^{±0}	467 ^{±2}	1165 ^{±3}	1.69 ^{±0,02}	1.12 ^{±0,12}	0.87 ^{±0,14}

Yukarıda Tablo 1’de görüldüğü üzere baskı oryantasyonu 0° iken doğal frekans değerleri 90°’ye göre daha düşüktür ancak sönüm oranı değerleri daha yüksektir. Bu durum baskı oryantasyonunun mod şekline bağımlı olarak eğilme dayanımını dolayısıyla modal özelliklerini etkilediğini göstermiştir. Bu durum önemli bir tasarım parametresi olarak değerlendirilmelidir.

8. ARAŞTIRILMASI GEREKEN BAZI EKSİKLİKLER

Son zamanlarda yapılan araştırmalar önemli ilerlemeler kaydetmiş olmasına rağmen Eİ malzemelerine ilişkin mevcut anlayışta birçok eksiklikler bulunmaktadır. Çoğunlukla sayısal modellerde, buhar akışı (vapor flow), toz sıçraması ve pürüzlü yüzeylerin termal geçmiş üzerindeki etkileri gibi karmaşık fiziksel olgular dikkate alınmamaktadır [11]. Ayrıca, Eİ bileşenlerinin uzun vadeli güvenilirliği ve parçalar arası tutarlılığı, endüstriyel uygulamaya geçiş açısından birçok belirsizlik devam etmektedir [3]. Ayrıca, daha geniş bir alaşım yelpazesinde yüksek sıcaklıkta dinamik yeniden kristalleşme mekanizmaları ve mikro yapı ile yorgunluk arasındaki etkileşim üzerine daha kapsamlı çalışmalara ihtiyaç vardır [34]. Ayrıca deneysel modal analiz sonuçlarının genelleştirilmesi için değişken parametrelerin dikkate alındığı daha fazla üretim, deneysel ve sayısal testin yapılması gerekir.

9. SONUÇ

Eklemeli imalatla üretilen malzemelerin mekanik, dinamik ve termal davranışları hakkında yapılan bu araştırmada; üretim parametreleri ve bu malzemelerde ortaya çıkan mekanik, dinamik ve termal performans arasındaki karmaşık ilişki vurgulanmıştır. Gelişmiş deneysel tekniklerin ve yüksek doğruluklu sayısal modellerin kullanımı, kalıntı gerilmeleri, bozulmalar (distortions) ve anizotropik davranışların karakterize edilmesi açısından büyük önem taşıdığını göstermiştir. Yüzey pürüzlülüğü, gözeneklilik ve tabakalar arası bağlanma gibi zorlukların üstesinden gelinmesi koşuluyla, yeni nesil metal alaşımlar ve elyaf takviyeli kompozitler, yüksek performanslı uygulamalar için umut verici fırsatlar sunmaktadır. Simülasyon araçları gelişmeye ve hesaplama açısından daha verimli hale

gelmeye devam ettikçe, Eİ süreçlerini optimize etmek ve karmaşık bileşenlerin yapısal bütünlüğünü sağlamak giderek daha kritik bir rol olacaktır. Endüstriyel uygulamalara geçilebilmesi için, üretilen numunelerin kısıtlı deneysel sonuçlara göre yüksek özellikler göstermesinin ötesinde tekrarlanma, kontrol edilebilme ve onarılabilmek gibi konulara odaklanılmalıdır. Standartlaştırılmış test protokolleri, üretim yönünü, yüzey durumunu, kusur dağılımını, termal geçmişi ve son işlem aşamalarını dikkate almalıdır, aksi takdirde ayrık süreçleri takip eden çalışmalar arasında yapılan karşılaştırmalar yanıltıcı olabilecektir. Ayrıca, anizotropik ve hız bağımlı (anisotropic and rate-dependent) Eİ malzemeleri için güvenilir yapısal denklemler, sağlam yorulma ve kırılma kriterleri, kafesler için işleme duyarlı tasarım kuralları ve elyaf takviyeli kompozitler için arayüze duyarlı modellerin geliştirilmesi konusunda da daha fazla ilerleme kaydedilmesi gerekmektedir. Bu gelişmeleri makine koşullarını ve yerinde sinyalleri mikro yapı, kusurlar ve nihai performansla ilişkilendiren daha büyük veri setleriyle desteklenmelidir.

Yapılan deneysel modal analiz çalışması ileride yapılacak deneysel ve sayısal çalışmalar için bir ön çalışma niteliğindedir. Bir alt yapı oluşturması ve bakış açısı kazandırması açısından ileride daha fazla numune ile daha detaylı çalışmaların (karakterizasyon ve mekanik ve dinamik testlerin) yapılması planlanmıştır. Bununla ilgili müteakip çalışmalarda, farklı malzeme ve üretim süreçlerine sahip 3B yazıcılar kullanılarak yapılan Eİ numunelerinin karakterizasyon testleri, deneysel, teorik ve sayısal analizleri yapılacaktır. Yapılan deneysel çalışmadan elde edilen bulgular dikkate alındığında; baskı oryantasyonunun numunelerin dinamik davranışlarında etkili bir parametre olduğu, doğal frekans ve sönüm değerlerini değiştirdiği görülmüştür. Dolayısıyla bu durum; tasarım

parametresi olarak dikkate alınması ve üzerinde daha detaylı çalışılması gereken bir parametredir.

KAYNAKÇA

- [1] Chaudhry, S., Tchouambe, J., Soulaïmani, A., & Das, R. (2022). Computational modelling of SLM additive manufacturing of metals. *International Journal of Manufacturing Research*, 17(4), 389–421. <https://doi.org/10.1504/ijmr.2022.127090>.
- [2] Martín, J., Mudakappanavar, V. S., Sreekanth, N. V., Santhosh, S., & Doreswamy. (2023). Experimental Fatigue Studies of Additively Manufactured Fiber Reinforced Thermoplastic. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 349–354. <https://doi.org/10.18311/jmmf/2022/32926>.
- [3] Baxter, C. K. (2018). Mechanical characterization and constitutive modelling of additively manufactured ALSI10MG_200C.
- [4] Zafar, M. Q., Wang, J., Zhang, Z., Wu, C. C., Zhao, H., Hussain, G., & Ma, N. (2023). Thermomechanical Process Simulation and Experimental Verification for Laser Additive Manufacturing of Inconel®718. *Materials*, 16(7), 2595. <https://doi.org/10.3390/ma16072595>
- [5] Lu, X. (2022). Computational and experimental thermo-mechanics of metal additive manufacturing: stress, warpage, cracks and properties (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de Catalunya).
- [6] Bernard, A. R. (2023). Multiscale Impact Mechanics of Additively Manufactured Periodic Cellular Solids, (A thesis submitted to the Faculty of Graduate and Postdoctoral Affairs in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Applied Science in Aerospace Engineering, Carleton University).
- [7] Kelley, P. F., Saigal, A., Vlahakis, J. K., & Carter, A. (2015, November). Tensile and fatigue behavior of direct metal

- laser sintered (DMLS) Inconel 718. In ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (Vol. 57359, p. V02AT02A001). American Society of Mechanical Engineers.
- [8] Kramer, S., Jordan, J. L., Jin, H., Carroll, J., & Beese, A. M. (2018). Mechanics of Additive and Advanced Manufacturing, Volume 8. In Proceedings of the 2018 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics (pp. 5-16).
- [9] Leicht, A., & Wennberg, E. O. (2015). Analyzing the Mechanical Behavior of Additive Manufactured Ti-6Al-4V Using Digital Image Correlation. Diploma work in the Master programme Materials Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
- [10] Lu, X., Lin, X., Chiumenti, M., Cervera, M., Hu, Y., Ji, X., Ma L. & Huang, W. (2019). In situ measurements and thermo-mechanical simulation of Ti-6Al-4V laser solid forming processes. International Journal of Mechanical Sciences, 153, 119-130.
- [11] Grilli, N., Hu, D., Yushu, D., Chen, F., & Yan, W. (2022). Crystal plasticity model of residual stress in additive manufacturing using the element elimination and reactivation method. Comput Mech 69, 825–845. <https://doi.org/10.1007/s00466-021-02116-z>.
- [12] B. V. S. Reddy et al., (2026), High-Strain-Rate Response and Microstructural Evolution of Additively Manufactured A286 Steel Lattice Structures: A Multiscale Experimental Investigation, Advanced Engineering Materials, 28(3), doi: 10.1002/adem.202501983.
- [13] Behseresht, S., & Park, Y. H. (2024). Additive Manufacturing of Composite Polymers:

- Thermomechanical FEA and Experimental Study. Materials, 17. <https://doi.org/10.3390/ma17081912>
- [14] Vanaei, H. R., El Magri, A., Rastak, M. A., Vanaei, S., Vaudreuil, S., & Tcharkhtchi, A. (2022). Numerical–Experimental Analysis toward the Strain Rate Sensitivity of 3D-Printed Nylon Reinforced by Short Carbon Fiber. Materials, 15(24), 8722. <https://doi.org/10.3390/ma15248722>
- [15] Chiumenti M, Lin X, Cervera M, Lei W, Zheng Y, Huang W (2017), "Numerical simulation and experimental calibration of additive manufacturing by blown powder technology. Part I: thermal analysis". Rapid Prototyping Journal, Vol. 23 No. 2 pp. 448–463, doi: <https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2015-0136>
- [16] Promoppatum, P. (2018). Numerical Modeling of Thermal and Mechanical Behaviors in the Selective Laser Sintering of Metals, (Doctoral dissertation, Carnegie Mellon University).
- [17] Promoppatum, P., & Yao, S. C. (2020). Influence of scanning length and energy input on residual stress reduction in metal additive manufacturing: Numerical and experimental studies. Journal of Manufacturing Processes, 49, 247-259, doi: 10.1016/j.jmapro.2019.11.020
- [18] Dai, S., Lian, Y. (2023). Anisotropic Mechanical Behaviors of AlSi10Mg Alloy Fabricated by Additive Manufacturing: Experiments and Modeling. The International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences, 25(3), 1–1. <https://doi.org/10.32604/icces.2023.010175>

- [19] Huang, H., Chen, J., Carlson, B., Wang, H. P., Crooker, P., Frederick, G., & Feng, Z. (2018). Stress and distortion simulation of additive manufacturing process by high performance computing. In Pressure Vessels and Piping Conference (Vol. 51678, p. V06AT06A009). American Society of Mechanical Engineers. <https://doi.org/10.1115/PVP2018-85045>.
- [20] V. Ananda, G. S. Kumar, R. Jayaganthan, and B. Srinivasan, "Distortion Prediction in Inconel-718 Part Fabricated through LPBF by Using Homogenized Support Properties from Experiments and Numerical Simulation," *Materials*, vol. 15, no. 17, pp. 5909–5909, Aug. 2022, doi: 10.3390/ma15175909.
- [21] Bruggeman, K., Klingbeil, N., & Palazotto, A. N. (2024). Residual Stress Generation in Additive Manufacturing of Complex Lattice Geometries. *Journal of Materials Engineering and Performance*. <https://doi.org/10.1007/s11665-024-09229-5>
- [22] Chen, W., Xu, L., Han, Y., Zhao, L., & Jing, H. (2021). Control of residual stress in metal additive manufacturing by low-temperature solid-state phase transformation: An experimental and numerical study. *Additive Manufacturing*, 42, 102016. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2021.102016>
- [23] Martin, J. H., Barnes, J. E., Rogers, K. A., Hundley, J., LaPlant, D. L., Ghanbari, S., ... & Bahr, D. F. (2023). Additive manufacturing of a high-performance aluminum alloy from cold mechanically derived non-spherical powder. *Communications Materials*, 4(1), 39. <https://doi.org/10.1038/s43246-023-00365-4>
- [24] Greitemeier, D., Dalle Donne, C., Syassen, F., Eufinger, J., & Melz, T. (2016). Effect of surface roughness on fatigue

- performance of additive manufactured Ti-6Al-4V. *Materials Science and Technology*, 32(7), 629-634. <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000053>.
- [25] Wisbey, A., Coon, D., Chatterton, M., Barras, J., Guo, D., Yan, K., ... & Mirihanage, W. (2022, July). The Mechanical Performance of Additively Manufactured 316L Austenitic Stainless Steel. In *Pressure Vessels and Piping Conference* (Vol. 86175, p. V04AT06A010). American Society of Mechanical Engineers. <https://doi.org/10.1115/PVP2022-84543>.
- [26] van de Werken, N., Hurley, J., Khanbolouki, P., Sarvestani, A. N., Tamijani, A. Y., & Tehrani, M. (2019). Design considerations and modeling of fiber reinforced 3D printed parts. *Composites Part B: Engineering*, 160, 684-692. [10.1016/j.compositesb.2018.12.094](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.094).
- [27] Yang, C., Tian, X., Tengfei, L., Cao, Y., & Li, D. (2017). 3D printing for continuous fiber reinforced thermoplastic composites: mechanism and performance. *Rapid Prototyping Journal*, 23(1), 209-215. <https://doi.org/10.1108/RPJ-08-2015-0098>
- [28] Billah, K. M. M., Lorenzana, F. A. R., Martinez, N. L., Wicker, R. B., & Espalin, D. (2020). Thermomechanical characterization of short carbon fiber and short glass fiber-reinforced ABS used in large format additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 35, 101299. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2020.101299>
- [29] Adisa, A. O., Colon, A. R., Kazmer, D. O., & Peterson, A. M. (2023). Interrelationships between process parameters, cross-sectional geometry, fracture behavior, and mechanical properties in material extrusion additive manufacturing. *Polymer Engineering & Science*, 63(11),

3906-3918. <https://doi.org/10.1002/pen.26495>Digital Object Identifier.

- [30] Duty CE, Kunc V, Compton B, Post B, Erdman D, Smith R, Lind R, Lloyd P, Love L (2017), "Structure and mechanical behavior of Big Area Additive Manufacturing (BAAM) materials". *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 23 No. 1 pp. 181–189, doi: <https://doi.org/10.1108/RPJ-12-2015-0183>.
- [31] Liu, W.K., Shin, Y.C. (2018). Special issue on Additive manufacturing: progress in modeling and simulation with experimental validations in additive manufacturing. *Comput Mech* **61**, 519–520. <https://doi.org/10.1007/s00466-018-1546-0>.
- [32] Farah, S., Anderson, D. G., & Langer, R. (2016). Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications—A comprehensive review. *Advanced drug delivery reviews*, 107, 367-392. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.012>.
- [33] ASTM E756-05, 2010. Standard Test Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013. United States
- [34] Yan, Z., Zou, X., Li, S., Luo, G., & Song, L. (2022). A Study on the Thermo-Mechanical History, Residual Stress, and Dynamic Recrystallization Mechanisms in Additively Manufactured Austenitic Stainless Steels. *Metals*, 12(7), 1109. <https://doi.org/10.3390/met12071109>.

AN EMBEDDED PROTOTYPE FOR A PWM-CONTROLLED SEMI-ACTIVE SUSPENSION SYSTEM WITH DEEP LEARNING-BASED ROAD TYPE DETECTION

Muhammet Raci AYDIN¹

Servet GÜNEŞ²

1. INTRODUCTION

The objective of this study was to develop an integrated prototype capable of identifying potholes and bumps on the road surface from camera images and converting the detection results into a pulse-width modulation (PWM) output. The presence of potholes and bumps was detected through the utilisation of a YOLOv8-based image processing application operating on a Raspberry Pi 5. Vehicle suspension is one of the fundamental subsystems that determines the force transfer between disturbances originating from the road surface and the vehicle body. In passive systems, the characteristics of the springs and dampers remain constant during operation. Active systems incorporate actuators that generate force using external energy. Semi-active systems, on the other hand, offer a solution between passive and active approaches by adjusting the damping characteristics according to operating conditions. In these systems, generating control decisions in a timely manner is just

¹ Assoc. Prof. Dr., Iğdır University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Machinery and Metal Technologies, ORCID: 0000-0002-4120-1816.

² Master's student, Iğdır University, Faculty of Engineering, Interdisciplinary Mechatronics Engineering, ORCID: 0000-0001-8222-1613.

as important as the damper used. Detecting road irregularities based on imagery before wheel contact occurs is of great importance in suspension control [1, 2]. In camera-based road inspection, traditional image processing methods can be affected by variations in light, shadow, pavement texture, and viewing angle. Object detection methods based on convolutional neural networks have become widespread in road damage studies because they can simultaneously learn feature extraction, classification, and localization. Maeda et al. [3] detected road damage using deep learning applied to images collected by a smartphone mounted on a vehicle, thereby contributing to the field's shift toward large-scale datasets. The RDD2020 and RDD2022 datasets, comprising samples collected in different countries and under various imaging conditions, have provided a basis for comparative evaluation in road damage research [4,5].

The YOLO approach treats object detection as a single network evaluation consisting of bounding box and class probability estimates [6]. Subsequent versions of the YOLO family have improved the balance between speed and accuracy, producing viable options for real-time or near-real-time applications on embedded platforms [7]. YOLOv8 is a state-of-the-art application framework that supports classification, object detection, and segmentation tasks. Recent studies have focused on multi-scale feature extraction, attention mechanisms, and lightweight network components in YOLOv8-based road damage models [8, 9, 10].

In this study, YOLOv8 was used to distinguish between pothole and bump classes and to transmit the detection result to a microcontroller via serial communication. In the literature, road damage detection is mostly addressed for the purposes of maintenance planning, localization, or driver warning. The suspension literature, on the other hand, focuses on sensor

feedback, skyhook-derived control approaches, and magnetorheological dampers [11–15].

Low-cost embedded applications that directly convert image-based road class information into a stepped PWM command lie at the intersection of these two research areas. The objective of this study is to integrate road class detection with control output generation within the same prototype and to measure the resulting electronic output levels.

The study's contribution is limited to three points. First, a two-class YOLOv8 model trained on custom data was run on a Raspberry Pi 5. Second, the detected class was transmitted to an Arduino Nano via USB serial communication, and a PWM level corresponding to the class was generated. Third, a power stage containing a logic-level MOSFET was configured with a resistive load. Thus, an infrastructure for detection and electronic drive was established for physical validation.

2. LITERATURE REVIEW

2.1. Image-based road damage detection

Vibration sensors, laser scanning, 3D measurement, and camera images are used for the automatic detection of road surface defects. The camera-based approach is practical because it can be integrated with existing vehicle electronics and can monitor a wide road area without physical contact. However, the images must account for variables such as class imbalance, varying weather conditions, shadows, asphalt patches, and camera angle. In the study by Maeda et al. [3], 15,435 road damage instances were presented across 9,053 images. The study demonstrated that smartphone images can be used for automatic damage detection. Arya et al. [4] compiled the RDD2020 dataset, which consists of 26,336 images and over 31,000 damage

instances. RDD2022, on the other hand, increased country diversity, making the issue of cross-domain generalization more apparent [5]. In these datasets, maintenance-focused classes such as longitudinal cracks, transverse cracks, alligator cracks, and potholes are highlighted. Studies developed on RDD2022—including RDD-YOLO, MS-YOLOv8, and YOLOv8-PD—demonstrate the need to address small targets, varying damage scales, and computational load in embedded systems simultaneously [8, 9, 10]. From a suspension control perspective, the type of vertical excitation generated by the road is important. For this reason, in the current prototype, the classes have been defined as potholes and bumps. A flat road has not been labeled as a separate object class; when no target is detected, the system is set to a “no detection” state. This approach simplifies the control logic but cannot distinguish between a detection failure and an actual flat road condition. This distinction is a fundamental reliability issue that must be resolved before the system can be deployed in a vehicle.

2.2. YOLO-based object detection

The first version of YOLO estimated both bounding boxes and class probabilities by processing the image in a single pass [6]. The single-stage architecture offers a significant advantage in applications requiring low latency. Over time, the YOLO family has been enhanced with the use of multi-scale features, different backbone architectures, and loss functions. Terven et al. [7] examined the evolution from YOLOv1 to YOLOv8 through architectural changes and evaluation metrics. In this study, the selection criterion is not only the highest accuracy but also practical inference on a Raspberry Pi 5 and easy integration with the Ultralytics [16] toolchain. Object detection performance was evaluated using precision, sensitivity, and average precision metrics. Precision indicates the proportion of correctly detected positive instances, while sensitivity indicates the proportion of

actual targets that were detected. mAP50 represents detection performance at a 0.50 intersection-union threshold, while mAP50-95 represents the average performance calculated at various thresholds between 0.50 and 0.95. In this study, these metrics were calculated using the validation set and are presented in the “Results” section.

2.3. Semi-active suspension and MR dampers

Semi-active suspension systems do not directly generate motion while varying the damping force or the equivalent damping coefficient. Karnopp et al. [11]’s study on semi-active force generators is one of the primary sources on variable damping strategies. In the literature, Skyhook, Groundhook, hybrid, and model-based control methods have been examined within the framework of the trade-off between passenger comfort and handling performance [12, 13]. In road-ahead prediction-based control studies, estimating the road profile prior to contact provides the controller with additional response time [6]. A recent study aiming to estimate the road profile using a monocular camera has also shown that image-based measurement could serve as an entry point for semi-active and active suspension control [1].

Magnetorheological dampers utilize an MR fluid whose flow properties change in response to an applied magnetic field. The phenomenological model by Spencer et al. [14] is one of the widely used models that represents the hysteretic behavior of an MR damper in control design. In vehicle suspensions with MR dampers, the drive current or voltage is adjusted according to the desired damping force [15]. However, the voltage and current measured across a resistive load do not represent the force that will be generated in the MR damper. Therefore, the PWM power stage in this study is used solely to test the electronic drive principle.

3. MATERIALS AND METHODS

3.1. System Architecture

The prototype consists of five functional layers: image acquisition, object detection, decision transmission, PWM generation, and power switching. The frame captured by the Raspberry Pi Camera Module was fed to the YOLOv8 model running on a Raspberry Pi 5. The target class from the model's output was converted into a text-based serial command. This command was sent to the Arduino Nano via USB. In response to the received command, the microcontroller generated a predefined PWM level on pin D9. The PWM signal drove the gate of the IRLZ44N MOSFET and enabled the switching of the 12 V load line. The system architecture is shown in Figure 1, and the basic components used in the prototype are listed in Table 1.

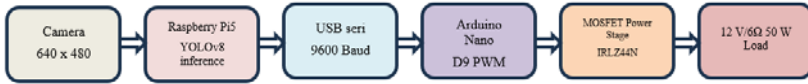


Figure 1. Image sensing and PWM generation chain

Table 1. Key components used in the prototype

Component	Model or feature	Function
Processing unit	Raspberry Pi 5	Image acquisition, YOLOv8 inference, and serial command generation
Camera	Raspberry Pi Camera Module 3 (wide-angle)	Acquisition of road surface images
Model	Ultralytics YOLOv8	Detection of potholes and bumps
Microcontroller	Arduino Nano CH340	Conversion of serial commands to PWM levels
Power switch	IRLZ44N N-channel MOSFET	Low-side switching of the 12 V load line
Load	6 Ω 50 W aluminum resistor	Representative electrical load of the power stage
Power supply	12 V 3 A power adapter	External load supply
Measurement	Multimeter and DSN VC288	Voltage and current monitoring

3.2. Dataset and model training

Images specific to this study were processed in the Roboflow environment, and two object classes—potholes and bumps—were defined. The dataset consists of a total of 106 images, including 74 training, 21 validation, and 11 test images. The training set contains 35 pothole and 39 bump examples. Target regions in the images were labeled with bounding boxes. A pre-trained YOLOv8n model was trained for 50 epochs on a CPU. An input size of 640×640 pixels and a batch size of 16 were used during training. The ‘best.pt’ weight file obtained at the end of training was transferred to a Raspberry Pi 5 for inference.

In the two-class setup, when the model detected a pothole or bump, the corresponding control command was generated. When no class was identified, the ‘duz’ command—meaning a straight road—was sent. This rule implies that a straight road is not a visually learned independent class. Therefore, an actual road defect falling below the detection threshold could also trigger the ‘duz’ command. For a more reliable implementation, negative examples must be systematically collected, independent performance evaluations must be conducted on the test set, and a safe default output must be defined in cases of uncertainty.

3.3. Image processing on the Raspberry Pi

Python 3.13.5 and Ultralytics 8.4.46 were used on a Raspberry Pi 5. Camera access was verified using the ‘rpicam-still’ command, and 640×480 -pixel images were periodically captured and fed to the YOLOv8 model. Compatibility issues were encountered when using the camera device directly as a video source. Therefore, the image was first saved to the ‘canli.jpg’ file, and then model inference was performed. This method facilitated prototype integration, but the frame capture and file-writing steps added an extra burden to the total latency.

The application was automatically started at boot via a ‘systemd’ service named ‘yolo.service’. A connection error occurred during the initial configuration because the serial port name did not match the actual device. After the Arduino’s serial port was set to ‘/dev/ttyACM0’, the service was brought online. Since serial device names may change upon reboot, a persistent ‘udev’ rule or device-ID-based connection should be used during the productization phase.

3.4. Serial communication and PWM decision Logic

Communication between the Raspberry Pi and the Arduino was carried out at a baud rate of 9,600. The software transmitted the detection result as one of the text commands “bump,” “dip,” or “flat.” Avoiding the use of Turkish characters reduced encoding-related incompatibilities in the serial connection. The Arduino program read the command up to the end of the line and updated the D9 PWM output. The output was turned off when no detection was present; a medium level was applied for a dip, and a higher level for a bump. This mapping is not based on an experimental optimization between road geometry and actual damping force. It was used in the prototype to demonstrate that discrete control levels could be generated. The mapping between the detection class and the measured PWM voltage equivalent is shown in Table 2.

Table 2. Mapping between detection class and measured PWM voltage equivalent

Sensor Status	Sequential command	D9 measurement	Comment
No Target	flat	0.00 V	PWM Off
Hole	ditch	1.57 V	Medium control level
Bump	bump	3.93 V	High control level

The value displayed by a multimeter in the DC voltage range is an equivalent close to the time-averaged value of the PWM waveform. This value does not indicate the switching frequency, rise and fall times, or instantaneous peak voltage. Since the duty cycle and frequency of the PWM signal were not verified with an oscilloscope, only the directly measured DC equivalents are reported in this study.

3.5. MOSFET power stage

The power stage is configured in a low-side switching configuration. The +12 V terminal of the adapter is connected to a 6 Ω , 50 W resistor, and the other end of the resistor is connected to the “MOSFET” drain. The “MOSFET” source is connected to the adapter’s negative terminal and shared with “Arduino GND.” A 220 Ω series resistor is placed between the ‘Gate’ and ‘Arduino D9’, and a 10 k Ω ‘pull-down’ resistor is placed between the ‘Gate’ and ‘GND’. The ‘pull-down’ resistor prevents the ‘Gate’ terminal from floating in the event of a microcontroller startup or disconnection. The IRLZ44N-based low-side switching circuit is shown in Figure 2.

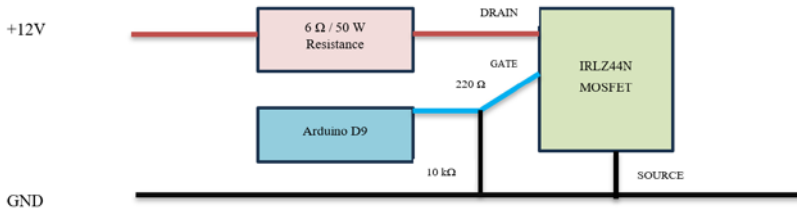


Figure 2. IRLZ44N-based low-side switching configuration

In the power stage, a logic-level IRLZ44N MOSFET driven by the Arduino Nano’s PWM output was used. The selection of this component took into account the conduction characteristics at the microcontroller’s gate drive voltage [16].

Experimental evaluation

The evaluation was conducted at three levels. At the first level, the acquisition of the camera image and the model's generation of a “dip” or “hill” label were observed. At the second level, it was verified that the class command reached the Arduino from the Raspberry Pi and that the D9 output changed. At the third level, the power stage consisting of a MOSFET and a resistive load was connected, and the voltage and current readings were monitored. The D9 voltages were measured using an external multimeter. Since the number of repeated measurements, measurement uncertainty, and standard deviation were not recorded, the results were evaluated as a descriptive function test.

4. RESULTS

4.1. Results on Image Acquisition and System Integration

The camera module generated images using `picam-still`, and the YOLOv8 weight file was run on a Raspberry Pi 5. In the functional test images, it was observed that “hole” and “bump” labels were generated. The model output was converted to serial commands and received by the Arduino. The ‘yolo.service’ ran successfully after the serial port was corrected to ‘/dev/ttyACM0’. These observations demonstrate that the software chain linking image acquisition and PWM generation can be integrated within the same prototype.

The YOLOv8n model achieved its highest performance on the validation set at the 40th epoch. At this stage, precision was calculated as 0.9602, recall as 0.9969, mAP50 as 0.9950, and mAP50-95 as 0.7071. In the confusion matrix generated from the YOLOv8n model's validation results and presented in Figure 3, it

can be seen that 13 pits and 8 mounds were correctly classified, while one false positive mound was detected in the background.

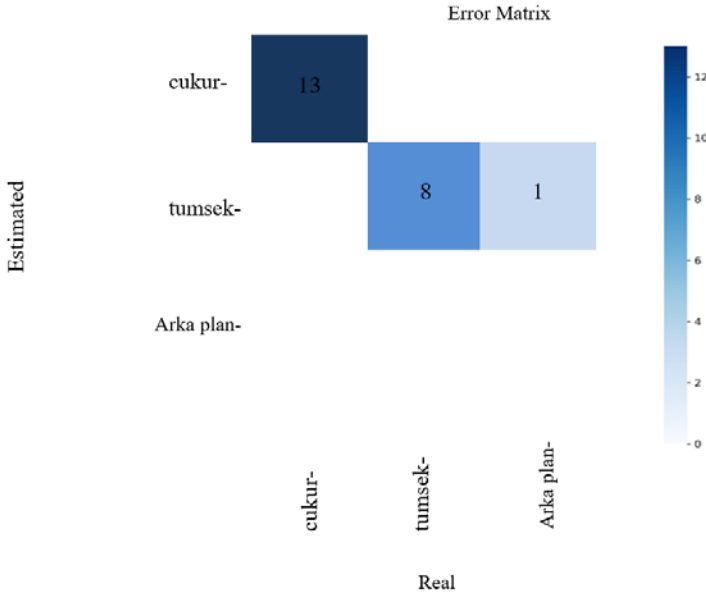


Figure 3. Confusion matrix for the validation set of the YOLOv8n model

4.2. PWM output findings

On pin D9, 0.00 V was measured when no signal was detected, approximately 1.57 V for a “trough” command, and approximately 3.93 V for a “peak” command. The measurements confirmed that the serial commands are converted into three distinct electrical output levels. The highest value appears lower than the peak value of the microcontroller’s output; this is because the multimeter displays the PWM signal as a time-averaged value. The equivalent DC voltages measured at pin D9 for the various detection states are compared in Figure 4.

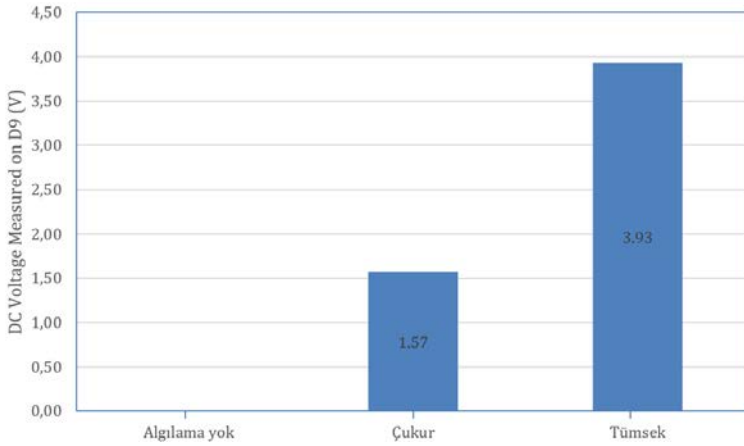


Figure 4. Equivalent DC voltages measured at pin D9 according to detection states

A voltage difference of 2.36 V was found between the levels selected for the trough and the peak. This difference indicates that an electronically distinguishable control output was generated. However, without knowing the coil resistance, inductance, driver current limit, and force-current curve of an MR damper, the damping force corresponding to these voltages cannot be calculated. The result confirms that a control command was generated; it does not confirm the suspension's mechanical response.

4.3. Power Stage Findings

The IRLZ44N-based power stage was configured with a 12 V supply and a 6 Ω , 50 W resistive load. During circuit testing, heating of the MOSFET was observed. It was determined that the power connections must be made with conductors of sufficient cross-sectional area to ensure a secure contact. Under ideal conditions, when a 12 V voltage is continuously applied to a 6 Ω resistor, Ohm's law predicts a current of 2 A and a power of 24 W. These values are theoretical calculations for the fully

conductive state; they are not presented as experimental measurement results.

5. DISCUSSION

The prototype demonstrates an end-to-end workflow that extends from the road image to a discrete control level. In this regard, unlike studies that merely detect road damage, it links the detection result to a physical output channel. While the Raspberry Pi 5 handles the image processing load, the Arduino Nano provides timing for specific PWM generation and the electrical interface with the power stage. The dual-processor architecture simplifies development and debugging by separating the model software from low-level output control.

Mapping the detection class directly to a fixed PWM value results in a low computational load. However, vehicle speed, distance to the defect, pothole depth, bump height, body acceleration, suspension stroke, and wheel load are not taken into account. Two different road geometries within the same class produce the same command. In a real semi-active suspension, the timing of the command is critical. The total response time is the sum of the image acquisition delay, inference time, serial communication, microcontroller cycle time, and actuator response time. This time must be shorter than the time it takes for the wheel to reach the road irregularity. Since end-to-end delay was not measured in this study, the adequacy of the predictive control could not be evaluated.

The decision not to train the “straight road” as an independent class is a significant limitation of the decision logic. The absence of a target in object detection could also indicate detection with safety as low as that of a straight road or an obstruction in the field of view. Therefore, in future designs, scenarios could be categorized as straight road, pothole, bump,

and unknown. In the “unknown” scenario, a safe default damping level could be selected. Additionally, the impact of single-frame erroneous commands can be reduced by using class stability, confidence score thresholds, and temporal filtering across consecutive frames.

Large datasets in the road perception literature indicate that generalization performance under different environmental conditions must also be evaluated [3, 4, 5]. In this study, a total of 106 images were used, and high-performance values were achieved on the validation set. The size of the dataset is limited. Furthermore, the images were collected in a controlled model environment. These characteristics limit the direct generalization of the results to real-world road conditions. Performance should also be measured on an independent test set; conditions such as daytime, nighttime, shade, wet surfaces, asphalt patches, different camera heights, and approach angles should be evaluated.

From a power stage perspective, the use of logic-level MOSFETs is a step in the right direction for hardware design. However, unlike a resistive load, the actual MR choke coil behaves inductively. When driving the coil, reverse voltage suppression, current measurement, closed-loop current control, fuse protection, and thermal protection are required. MOSFET selection should not be based solely on the “gate” threshold voltage; the “drain-source” resistance at the specified “gate” voltage, the safe operating area, the total “gate” load, and thermal resistance values must all be considered together [17, 18].

The term “semi-active control” in the title of this study indicates the application area targeted by the developed decision-making and drive architecture. Experimental validation, however, is limited to resistive loads. Therefore, based on the current findings, it cannot be stated that passenger comfort has increased, body acceleration has decreased, or road holding has improved.

To reach such a conclusion, measurements must be taken on at least a quarter-vehicle test rig. The measurements should include spring-mass acceleration, suspension travel range, and tire dynamic load. Image-based control should be compared to the passive baseline under the same road input. The level of evidence and interpretation limits for the findings are presented in Table 3.

Table 3. Level of evidence and limits of interpretation of the findings

Evaluation Area	In this study, the available evidence	Conclusions
Image Acquisition	showed the generation of 640×480 frames	Connected to the camera software chain
Object Detection	The precision, recall, mAP50, and mAP50-95 values calculated on the validation set	Detection performance on the model's validation set has been determined. Performance on the independent test set has not been evaluated
Serial Communication	Commands were received by the Arduino	Decision transfer between Pi and Arduino worked
PWM Output	0.00 V; 1.57 V; 3.93 V were measured	Three distinct output levels were generated
Suspension Performance	No mechanical setup	No conclusions can be drawn regarding comfort and road holding

6. LIMITATIONS

The first limitation is that the dataset is limited to 106 images, which were acquired in a controlled model environment. Although the model's accuracy, sensitivity, and mAP values were calculated on the validation set, performance was not evaluated on the independent test set of 11 images. The second limitation is that the D9 voltage measurements were not recorded according to

a controlled and repeatable experimental protocol. Information on standard deviation, measurement uncertainty, and repeatability is not available.

The third limitation is that the resistive load does not represent the electrical and mechanical behavior of the MR damper. The fourth limitation is that system delay was not measured. The fifth limitation is that the control levels were not derived from a suspension optimization or force target.

Due to these limitations, the current study is not a suspension performance test but rather a prototype of sensing and control electronics. Nevertheless, the establishment of this integrated structure will provide a starting platform to which measurable delay, a current-controlled driver, and a quarter-vehicle setup can be added in subsequent stages.

7. PROPOSED VALIDATION METHOD

To investigate the effect of the current prototype on the semi-active suspension, it is recommended that subsequent experiments be conducted in four phases: sensing, timing, electrical drive, and mechanical response. These phases are not the result of the current study; rather, they constitute a validation framework designed to address the reported limitations. The input, measurement instrument, and success criterion for each stage must be defined before the experiment begins. This will allow the identification of the layer in the chain—from image classification to mechanical outcome—where the error source originates.

7.1. Measuring Detection Performance

The dataset must be divided into training, validation, and test subsets, taking the image source into account. Assigning consecutive frames from the same video or road segment to

different subsets may lead to data leakage. Therefore, the partitioning process must be based on road segments or recording sessions. The test set must not be used during the training process; separate “precision,” “recall,” and “F1” values, along with mAP50 and mAP50-95, must be reported for potholes and bumps. The confusion matrix must show examples where a pothole is classified as a bump, a bump is classified as a pothole, and both classes are classified as background. By separately labeling conditions such as nighttime, shadows, wet surfaces, and asphalt patches in the test set, the source of performance degradation can be investigated.

7.2. Measurement of End-to-End Latency

For predictive control, the total response time is the sum of image capture, preprocessing, model inference, decision generation, serial transmission, Arduino cycle time, and driver response time. Total delay is denoted as ‘ t_{total} ’; the time it takes for the wheel to reach the defect, ‘ $t_{approach} = d/v$ ’, can be calculated using the distance d at which the camera detects the defect and the vehicle speed v . For the control command to be applied before the wheel contacts the defect, the value of ‘ t_{total} ’ must be less than the value of ‘ $t_{approach}$ ’. The measurement should involve observing the time stamps from the Raspberry Pi and Arduino, along with the MOSFET gate signal, simultaneously on an oscilloscope. In addition to the average delay, the 95th percentile and worst-case values must be reported.

7.3. Electrical and Mechanical Validation

The power stage must first be tested repeatedly under a resistive load. The D9 and ‘gate’ waveforms, load current, MOSFET ‘drain-source’ voltage, and temperature must be recorded at the same PWM levels. When the MR choke is connected, appropriate reverse voltage protection and current feedback must be added to account for the inductive nature of the

coil. The driver can be converted to a closed-loop configuration that tracks the measured coil current instead of the commanded PWM. This approach is necessary to test the effect of changes in the supply voltage and coil temperature on the current.

When transitioning to the MR damper, the electrical characteristics of the selected model must be taken into account. For example, the technical data sheet for the LORD RD-8041-1 model specifies an input voltage of 12 V DC, a maximum input current of 1 A during 30 seconds of continuous operation, and a maximum input current of 2 A during intermittent operation. The manufacturer specifies these values as typical technical specifications [19].

A quarter-vehicle test rig should be used for mechanical evaluation instead of a single-degree-of-freedom load test. The passive baseline and image-based control should be compared under the same road profile and speed conditions. The RMS and peak values of the spring-mass acceleration can be used to evaluate ride comfort. Suspension deflection allows for the evaluation of the operating range. Dynamic tire load, on the other hand, can be used to evaluate the tendency for road holding. Tests should include multiple repetitions; the mean, standard deviation, and measurement uncertainty should be provided. Control levels should be adjusted according to the geometry of potholes and bumps only after these measurements have been taken. The recommended validation plan for the next phase of the prototype is provided in Table 4.

Table 4. Proposed validation plan for the next phase of the prototype

Verification phase	Basic measurements	Outputs to be reported
Object detection	TP, FP, FN, and extraction time	Precision, recall, F1, mAP, and error matrix
End-to-end timing	Capture, extraction, serial transmission, and “gate” delay	Average, 95th percentile, and worst-case latency
Electrical and mechanical verification	Gate signal, load current, temperature, body acceleration, and tire load	Driver stability and mechanical performance relative to the passive system

8. CONCLUSION

In this study, an embedded prototype was developed that identifies potholes and bumps on the road surface from camera images and converts the detection result into a pulse-width modulation (PWM) output. Potholes and bumps were detected using a YOLOv8-based image processing application running on a Raspberry Pi 5. The dataset, prepared using a total of 106 images, was divided into 74 training, 21 validation, and 11 test images. The pre-trained YOLOv8n model was trained for 50 epochs; on the validation set, it achieved a precision of 0.9602, a sensitivity of 0.9969, an mAP50 of 0.9950, and an mAP50-95 of 0.7071. A Raspberry Pi 5 was used as the image processing unit, while an Arduino Nano, receiving commands via a USB serial connection, served as the control unit. The PWM signal generated by the Arduino on pin D9 was applied to the 12 V power stage containing an IRLZ44N logic-level MOSFET. Since a real magnetorheological damper could not be obtained, the power stage was tested on an aluminum-bodied resistor rated at 6 Ω and 50 W. The prototype focused on the feasibility of an integrated control architecture consisting of a camera, a deep learning

model, serial communication, PWM generation, and a MOSFET drive stage. With no detection, DC voltage equivalents of approximately 0.00 V, 1.57 V, and 3.93 V were measured at pin D9 for dip and bump conditions, respectively. The results demonstrate that image-based road information can be converted into different levels of electronic control. Beyond the mechanical suspension performance on a vehicle or quarter-vehicle test rig, this study presents the validation of the sensing, communication, and electronic drive chain at the embedded prototype level. When transitioning to a real MR damper, the electrical characteristics and force-current relationship of the selected model must be taken into account. Future studies are recommended to measure end-to-end delay, perform closed-loop control of load current, and conduct comparative mechanical measurements with a passive system on a quarter-vehicle test rig. This will allow for a quantitative assessment of the contribution of forward road information derived from images to suspension control.

REFERENCES

- [1] Büyükköprü, M., Uzunsoy, E. ve Mouton, X. (2024). Vision based road profile estimation for preview-controlled vehicle suspension systems. *Computers and Informatics*, 4, 30–40. doi:10.62189/ci.1266211
- [2] Theunissen, J., Tota, A., Gruber, P., Dhaens, M. ve Sorniotti, A. (2021). Preview-based techniques for vehicle suspension control: A state-of-the-art review. *Annual Reviews in Control*, 51, 206–235. doi:10.1016/j.arcontrol.2021.03.010
- [3] Maeda, H., Sekimoto, Y., Seto, T., Kashiyama, T. ve Omata, H. (2018). Road damage detection and classification using deep neural networks with smartphone images. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 33, 1127–1141. doi:10.1111/mice.12387
- [4] Arya, D., Maeda, H., Ghosh, S. K., Toshniwal, D. ve Sekimoto, Y. (2021). RDD2020: An annotated image 4dataset for automatic road damage detection using deep learning. *Data in Brief*, 36, 107133. doi:10.1016/j.dib.2021.107133
- [5] Arya, D., Maeda, H., Ghosh, S. K., Toshniwal, D. ve Sekimoto, Y. (2024). RDD2022: A multi-national image dataset for automatic road damage detection. *Geoscience Data Journal*, 11, 846–862. doi:10.1002/gdj3.260
- [6] Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R. ve Farhadi, A. (2016). You only look once: Unified, real-time object detection. 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (s. 779–788) içinde. doi:10.1109/CVPR.2016.91

- [7] Terven, J., Córdova-Esparza, D.-M. ve Romero-González, J.-A. (2023). A comprehensive review of YOLO architectures in computer vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 5, 1680–1716. doi:10.3390/make5040083
- [8] Han, Z., Cai, Y., Liu, A., Zhao, Y. ve Lin, C. (2024). MS-YOLOv8-based object detection method for pavement diseases. *Sensors*, 24(14), 4569. doi:10.3390/s24144569
- [9] Li, Y., Yin, C., Lei, Y., Zhang, J. ve Yan, Y. (2024). RDD-YOLO: Road damage detection algorithm based on improved You Only Look Once version 8. *Applied Sciences*, 14(8), 3360. doi:10.3390/app14083360
- [10] Zeng, J. ve Zhong, H. (2024). YOLOv8-PD: An improved road damage detection algorithm based on YOLOv8n model. *Scientific Reports*, 14, 12052. doi:10.1038/s41598-024-62933-z
- [11] Karnopp, D., Crosby, M. J. ve Harwood, R. A. (1974). Vibration control using semi-active force generators. *Journal of Engineering for Industry*, 96, 619–626. doi:10.1115/1.3438373
- [12] Savaresi, S. M., Poussot-Vassal, C., Spelta, C., Sename, O. ve Dugard, L. (2010). Semi-active suspension control design for vehicles. doi:10.1016/C2009-0-63839-3
- [13] Soliman, A. M. A. ve Kaldas, M. M. S. (2021). Semi-active suspension systems from research to mass-market – A review. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 40, 1005–1023. doi:10.1177/1461348419876392

- [14] Spencer, B. F., Jr., Dyke, S. J., Sain, M. K. ve Carlson, J. D. (1997). Phenomenological model for magnetorheological dampers. *Journal of Engineering Mechanics*, 123, 230–238. doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:3(230)
- [15] Yao, G. Z., Yap, F. F., Chen, G., Li, W. H. ve Yeo, S. H. (2002). MR damper and its application for semi-active control of vehicle suspension system. *Mechatronics*, 12, 963–973. doi:10.1016/S0957-4158(01)00032-0
- [16] Ultralytics. (n.d.). Ultralytics YOLO Docs. Retrieved September 29, 2026, from <https://docs.ultralytics.com/>
- [17] International Rectifier. (2003). IRLZ44NPbF: HEXFET power MOSFET [Datasheet]. Retrieved from <https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/24/49/infineon-irlz44n-datasheet-en.pdf>
- [18] Infineon Technologies. (2026). IRFZ44NPbF: HEXFET power MOSFET (Rev. 2.1) [Datasheet]. Retrieved from <https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/24/49/infineon-irfz44n-datasheet-en.pdf>
- [19] LORD Corporation. (2009). RD-8040-1 and RD-8041-1 dampers (DS7016, Rev. 0) [Technical datasheet]. Retrieved from https://www.parker.com/content/dam/Parker-com/Literature/Assembly---Protection-Solutions-Division/Technical-Datasheets-%28TDS%29/Datasheet--RD-8040-1--RD-8041-1_DS7016.pdf

İLERİ MÜHENDİSLİK MALZEMELERİ VE AKILLI DİNAMİK SİSTEMLER

Mekanik, Dinamik, Termal ve Sayısal Yaklaşımlar

Mühendislik teknolojilerindeki hızlı gelişmeler; ileri malzemelerin geliştirilmesi, bu malzemelerin çoklu fiziksel koşullar altındaki davranışlarının belirlenmesi ve karmaşık mühendislik sistemlerinin akıllı yöntemlerle kontrol edilmesini zorunlu hâle getirmektedir. Bu kitap, **ileri mühendislik malzemeleri ve akıllı dinamik sistemler** ekseninde farklı araştırma alanlarını bir araya getiren disiplinler arası bir bilimsel eser olarak hazırlanmıştır.

Kitabın ilk iki bölümünde **kompozit ve sandviç yapıların mekanik ve dinamik davranışları** ele alınmaktadır. Poliüretan köpükle doldurulmuş intraply hibrit kompozit yüzeyli sandviç panellerin modal davranışı ile ısı yönetimi koşulları altındaki cam elyaf takviyeli vasküler kompozitlerin dinamik özellikleri incelenmekte; kompozit yapıların davranışlarının sayısal ve sonlu elemanlar tabanlı yaklaşımlarla değerlendirilmesine odaklanılmaktadır.

Üçüncü bölüm, kitabın **derleme ve özgün deneysel çalışma boyutlarını bir araya getiren** bölümüdür. Eklemeli imalatla üretilen malzemelerin mekanik, dinamik ve termal davranışları güncel literatür kapsamında değerlendirildikten sonra, **PLA filament kullanılarak 0° ve 90° baskı oryantasyonlarında üretilen numunelerin deneysel modal analizleri** sunulmaktadır. Farklı baskı oryantasyonlarının modal davranış üzerindeki etkileri deneysel sonuçlar üzerinden karşılaştırılmakta ve eklemeli imalat sürecindeki üretim yönünün dinamik karakteristikler üzerindeki rolü ortaya konulmaktadır.

Dördüncü bölümde ise **derin öğrenme tabanlı yol tipi algılama ile PWM kontrollü yarı aktif süspansiyon sistemi** ele alınmaktadır. Bu bölüm; yapay zekâ, araç dinamiği, gömülü sistemler ve akıllı kontrol teknolojilerini bir araya getirerek yeni nesil mühendislik sistemlerine yönelik güncel bir yaklaşım sunmaktadır.

İleri Mühendislik Malzemeleri ve Akıllı Dinamik Sistemler, kompozit malzemelerden eklemeli imalata, deneysel modal analizden sonlu elemanlar yöntemine, termal yönetimden yapay zekâ tabanlı araç kontrolüne kadar geniş bir mühendislik perspektifi sunmaktadır.

Eser; **akademisyenler, araştırmacılar, lisansüstü öğrenciler ve ileri mühendislik teknolojileri üzerine çalışan profesyoneller** için güncel bilimsel yaklaşımları, sayısal analizleri ve deneysel bulguları bir arada sunan disiplinler arası bir başvuru kaynağı olmayı amaçlamaktadır.

yaz

yayınları

YAZ Yayınları

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3

İscehisar / AFYONKARAHİSAR

Tel : (0 531) 880 92 99

yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com

ISBN: 978-625-8926-54-5



9

786258

926545