



Artvin Çoruh Üniversitesi

Mühendislik ve
Fen Bilimleri Dergisi
Artvin Çoruh University
Journal of Engineering
and Sciences ACUJES

Artvin Çoruh University

Mühendislik ve
Fen Bilimleri Dergisi
Artvin Çoruh University
Journal of Engineering
and Sciences ACUJES

Sahibi / Owner

Artvin Çoruh Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Adına
Prof. Dr. Özgür EMİNAGAOĞLU

Baş Editör / Editor in Chief

Doç.Dr.Ayla BİLGİN

Yardımcı Editör / Associate Editor

Dr. Öğr. Üyesi Hakan TEMİZ

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü / Managing Editor

Doç. Dr. Ömer KASAR

Alan Editörleri/ Field Editors

Prof. Dr. Özgür EMİNAGAOĞLU (Yaşam Bilimleri)
Prof. Dr. Yaşar KOBYA (Temel Bilimler)
Doç. Dr. Ayla BİLGİN (Çevre Mühendisliği)
Doç. Dr. Ayşe YAVUZ ÖZALP (Harita Mühendisliği)
Doç. Dr. Ömer KASAR (Elektrik Elektronik Mühendisliği)
Dr. Öğr. Üyesi Hakan TEMİZ (Bilgisayar Mühendisliği)

Editör Kurulu / Editorial Board

Bilgisayar Mühendisliği/ Computer Engineering

Prof. Dr. Ersin ELBASSI (American University of the Middle East)
Doç. Dr. Ahmet TOPÇU (American University of the Middle East)
Dr. Öğr. Üyesi Mete YAĞANOĞLU (Atatürk Üniversitesi)
Dr. Öğr. Üyesi Nuh AZGINOĞLU (Kayseri Üniversitesi)
Dr. Öğr. Üyesi Ramazan TERZİ (Amasya Üniversitesi)
Dr. Öğr. Üyesi Serdar ÇİFTÇİ (Harran Üniversitesi)
Dr. Öğr. Üyesi Faruk Baturalp GÜNAY (Atatürk Üniversitesi)

Çevre Mühendisliği/Environmental Engineering

Prof. Dr. Selim LATİF SANİN (Hacettepe Üniversitesi)
Prof. Dr. Feryal AKBAL (Ondokuz Mayıs Üniversitesi)

Elektrik-Elektronik Mühendisliği/ Electrical Electronics Engineering

Prof. Dr. BÜLENT ORAL (Marmara Üniversitesi)
Doç. Dr. Gökhan ELMACI (Adıyaman Üniversitesi)
Prof. Dr. Nurettin UMURKAN (Yıldız Teknik Üniversitesi)
Prof. Dr. YÜCEL ÖZMEN (Karadeniz Teknik Üniversitesi)
Prof. Dr. MÜSLÜM CENGİZ TAPLAMACIOĞLU (Gazi Üniversitesi)

Harita Mühendisliği/ Surveying Engineering

Prof. Dr. Nursu TUNALIOĞLU ÖCALAN (Yıldız Teknik Üniversitesi)
Prof. Dr. Fusun BALIK ŞANLI (Yıldız Teknik Üniversitesi)
Prof. Dr. Bahattin ERDOĞAN (Yıldız Teknik Üniversitesi)

Matematik/ Mathematics

Prof. Dr. Hanlar REŞİDOĞLU (İğdır Üniversitesi)

Temel Bilimler/ Basic Sciences

Prof. Dr. Cahit YEŞİLYAPRAK (Atatürk Üniversitesi)
Prof. Dr. Ahmet Turan ALAN (Batman Üniversitesi)

Yaşam Bilimleri/ Life Sciences

Prof. Dr. Özgür EMİNAGAOĞLU (Artvin Çoruh Üniversitesi)
Prof. Dr. Temel GÖKTÜRK (Artvin Çoruh Üniversitesi)

Yabancı Dil Editörü / Language Editor

Dr. Öğr. Üyesi Serkan BİÇİCİ

Mizanpaj/ Layout

Arş. Gör. Dr. Haluk KELEŞ
Araş.Gör.Dr. Ali KAYA
Arş. Gör. Bekir BERKCAN

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

ARAŞTIRMA MAKALELERİ RESEARCH ARTICLES

- Coğrafi Bilgi Sistemleri Tabanlı Çok Kriterli Karar Analizi ile Giresun İli Dereli İlçesinin Taşkın Duyarlılık Analizi
Flood Susceptibility Analysis of Dereli District in Giresun Province with Multi-Criteria Decision Analysis Based on Geographical Information Systems
Bilge Köroğlu, Halil Akıncı82 -81
- 3 Boyutlu Yazıcı ile Üretilen Düşük Maliyetli Çift Sırtlı Horn Anten Tasarımı ve Üretimi
A Low Cost 3D Printed Double Ridge Horn Antenna Design And Fabrication
Ömer Kasar82 - 88
- Askeri Uygulamalarda Kullanılan Güç Dönüştürücüleri için Elektromanyetik Girişim Filtresi Tasarımı
Electromagnetic Interference Filter Design for Power Converts Used in Military Applications
Mehmet Özdemir, Necmi Altın89-103
- A Design Software Based on The Placement of Bolts for Bolted Joints
Cıvatalı Bağlantılar için Cıvataların Yerleşim Düzenini Esas Alan Bir Tasarım Yazılımı
Kadir Sarı, Hakan Dilipak104 – 114
- Askeri Araçlar için Fren Balatası Üretimi ve Frenleme Karakteristiğinin İncelenmesi
Brake Pad Production and Braking Characteristics Analysis for Military Vehicles
Cansu Endes Yılmaz, İrem Yaren Çapkın, Osman Dalar, Buse Demirel, Turgay Yıldırım, İlker Sugözü115 – 123
- Şekil Hafızalı Alaşımlar ile Titreşim Sönümleyici Plak Tasarımı
Design of Vibration Damping Plates with Shape Memory Alloys
Oğuzhan Nazım, Ahmet Taşkesen124 – 137

Araştırma Makalesi / Research Article

Coğrafi Bilgi Sistemleri Tabanlı Çok Kriterli Karar Analizi ile Giresun İli Dereli İlçesinin Taşkın Duyarlılık Analizi

Bilge KÖROĞLU¹, Halil AKINCI^{2*}

¹ Artvin Çoruh Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Harita Mühendisliği A.B.D., Artvin, TÜRKİYE

² Artvin Çoruh Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Artvin, TÜRKİYE

bilgecinkir@gmail.com, halil.akinci@artvin.edu.tr

Received/Geliş: 21.08.2023

Accepted/Kabul: 27.10.2023

Özet: Taşkın duyarlılık haritaları, taşkınlara eğilimli alanları ya da gelecekte taşkın olayından etkilenebilecek alanları gösteren, taşkın yönetiminde ve zarar azaltmada kullanılan tematik haritalardır. Bu çalışmada, Çok Kriterli Karar Analizi (ÇKKA) yöntemlerinden biri olan Analitik Hiyerarşi Proses (AHP) yöntemi kullanılarak Giresun'un Dereli ilçesinin taşkın duyarlılık haritası üretilmiştir. AHP yöntemi ile taşkın duyarlılık haritasının üretilmesinde literatürde yaygın olarak kullanıldığı tespit edilen 10 faktör (yağış, eğim, yükseklik, akarsu ağına uzaklık, arazi örtüsü, akış birikimi, drenaj yoğunluğu, topografik nemlilik indeksi, jeoloji/litoloji ve bakı) kullanılmıştır. Üretilen taşkın duyarlılık haritası “çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek” derecede taşkına duyarlı alanları gösteren 5 sınıf içermektedir. Bu sınıflandırmaya göre çalışma alanının yaklaşık %1'inin yüksek veya çok yüksek derecede taşkına duyarlı olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, Dereli ilçe merkezinin yüksek veya çok yüksek derecede taşkına duyarlı alanda kaldığı belirlenmiştir. Üretilen taşkın duyarlılık haritası, ilçede 22 Ağustos 2020 tarihinde yaşanan taşkın envanteriyle karşılaştırılmış ve duyarlılık haritasının bu envanterle %80 düzeyinde örtüştüğü tespit edilmiştir. Bu nedenle, üretilen taşkın duyarlılık haritasının taşkın zararlarını azaltmak için karar vericilere yol gösterebileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: AHP, CBS, Dereli, Giresun, Taşkın, Taşkın duyarlılık haritası

Flood Susceptibility Analysis of Dereli District in Giresun Province with Multi-Criteria Decision Analysis Based on Geographical Information Systems

Abstract: Flood susceptibility maps are thematic maps used in flood management and mitigation, showing areas prone to flooding or areas that may be affected by flooding in the future. In this study, the flood susceptibility map of Dereli district of Giresun was produced using the Analytical Hierarchy Process (AHP) method, which is one of the Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) methods. 10 factors (precipitation, slope, elevation, distance to the river network, land cover, flow accumulation, drainage density, topographic wetness index, geology/lithology, and aspect) that were determined to be widely used in the literature were used to produce the flood susceptibility map with the AHP method. The generated flood susceptibility map includes 5 classes showing “very low, low, moderate, high, and very high” flood-susceptible areas. According to this classification, it has been determined that approximately 1% of the study area is susceptible to high or very high flooding. However, it has been determined that Dereli district center is in a high or very high flood susceptible area. The produced flood susceptibility map was compared with the flood inventory experienced in the district on August 22, 2020, and it was determined that the susceptibility map was 80% compatible with this inventory. Therefore, it is concluded that the produced flood susceptibility map can guide decision-makers in reducing flood damages.

Keywords: AHP, GIS, Dereli, Giresun, Flood, Flood susceptibility map

1. Giriş

Tüm dünyada meydana gelen ve neden oldukları zararların boyutları büyük olan taşkınlar, uygun yönetim faaliyetleri ile kontrol altına alınması gereken en yıkıcı doğal afetlerden biridir. Volkanik patlamalar, heyelanlar, depremler ve tsunami gibi diğer doğal afetlerle karşılaştırıldığında taşkınların önemli sosyo-ekonomik etkileri olduğu görülmektedir (Ouma ve Omai, 2023). Afetlerin Epidemiyolojisi Araştırma Merkezi (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters - CRED)

tarafından yönetilen Uluslararası Acil Durumlar Veri Tabanı (Emergency Events Database ya da kısa adıyla EM-DAT) verilerine göre 2021 yılında Dünya genelinde toplam 432 afet olayı gerçekleşmiş ve bunun yaklaşık %52'sini (223 adet) taşkınlar oluşturmuştur. CRED'in 2021 yılı afet raporuna göre, Hindistan'da muson mevsimi boyunca (Haziran-Eylül), 1282 kişinin hayatını kaybetmesine neden olan bir dizi ölümcül sel/taşkın olayı yaşanmıştır. 2021 yılının Temmuz ayında Çin'de yaşanan Henan Tufanı; 352 kişinin ölümüne ve 16,5 milyar dolar ekonomik zarara neden olmuştur. Aynı ay içinde Afganistan'daki Nuristan taşkınları 260 kişinin ölümüyle sonuçlanmıştır. Temmuz ayında, Orta Avrupa'da yaşanan taşkınlar yalnızca Almanya'da 40 milyar ABD doları tutarında ekonomik zarara neden olmuştur (CRED, 2022).

Türkiye; deprem, taşkın/sel, heyelan ve çığ gibi birçok doğal afetin sıkça yaşandığı ülkelerden biridir. Taşkınlar, ülkemizde en çok karşılaşılan, yıkıcı etkileri ve ekonomik zararları oldukça fazla olan doğal afetlerden biridir. Ülkemizde depremlerden sonra en fazla can ve mal kaybı taşkınlar nedeniyle yaşanmaktadır (Ergünay, 2007). Taşkın olayları, nehirler boyunca hızlı kentleşme ve ormansızlaşma ile yakından ilişkilidir (Tehrany vd., 2013). Akarsu kıyılarının verimli ve zengin biyoçeşitliliğe sahip olması nedeniyle insanlar yerleşim alanlarını asırlardır akarsu kenarlarına kurmayı tercih etmişlerdir (Girayhan, 2015). Zarar azaltıcı tedbirler ve mühendislik önlemleri alınmadan kurulan yerleşimler, zaman içerisinde başta taşkınlar olmak üzere doğal afetlerden etkilenmekte ve ciddi can kayıpları ve ekonomik zararlar yaşanmaktadır.

Taşkınlar, gerekli tedbirlerin alınması durumunda zararları azaltılabilecek doğal afetlerden biridir. Farklı senaryolara göre yaşanabilecek taşkınların boyutunu belirlemek, zararlarını tahmin etmek ve bu zararları azaltmak için taşkın tahmin ve erken uyarı sistemleri kurulabilmekte ve çeşitli haritalar hazırlanabilmektedir. Taşkınların; “insan sağlığı ve hayatı, çevre, kültürel miras, ekonomik faaliyetler ve altyapı sistemleri” üzerinde yarattığı olumsuz etkileri azaltmak Avrupa Birliği (AB)'nin de önemli hedeflerinden biri olmuştur. Bu nedenle, AB'ye üye devletler tarafından 2007 yılında Taşkın Risklerinin Değerlendirilmesi ve Yönetilmesi Direktifi (2007/60/EC) ya da kısa adıyla “AB Taşkın Direktifi” benimsenmiştir (Özcan, 2008). Direktifin geliştirilmesinde iklim değişikliği nedeniyle son yıllarda Avrupa Birliği'ne üye ülkelerde yaşanan büyük çaplı taşkınlar ve neden oldukları ciddi ekonomik zararlar da etkili olmuştur. Taşkın direktifinin temel amacı; “taşkın riski değerlendirmesi ve yönetimi için topluluktaki taşkınların insan sağlığı, çevre, kültürel miras ve ekonomik faaliyetler üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmayı hedefleyen bir çerçeve oluşturmaktır” (URL-1, 2023). Direktif, taşkın risk yönetimi için üye ülkelerin taşkın tehlike haritalarını, taşkın risk haritalarını ve taşkın risk yönetim planlarını üretmesini zorunlu kılmıştır.

Hong vd. (2018), taşkın olaylarının tamamen önlenmesinin mümkün olmadığını, ancak tahmin modelleri aracılığıyla taşkına duyarlı ve hassas alanların belirlenebildiğini dile getirmişlerdir. Taşkınların etkisinin büyüklüğü ve zararlarının geri döndürülemez olması taşkın kontrol ve önleme tedbirlerinin uygulanmasını bir zorunluluk haline getirmektedir. Taşkın zararlarının azaltılmasında ve yönetim önlemlerinin alınmasında karar vericilere (taşkın yönetimi yetkililerine) yol gösterecek ve politika geliştirmelerine yardımcı olacak olan verilerden biri de taşkın duyarlılık haritalarıdır. Duyarlılık, yerel arazi koşullarına bağlı olarak bir alanda tehlikeli bir olayın meydana gelme olasılığı olarak tanımlanmaktadır (Santangelo vd., 2011; Tang vd., 2018).

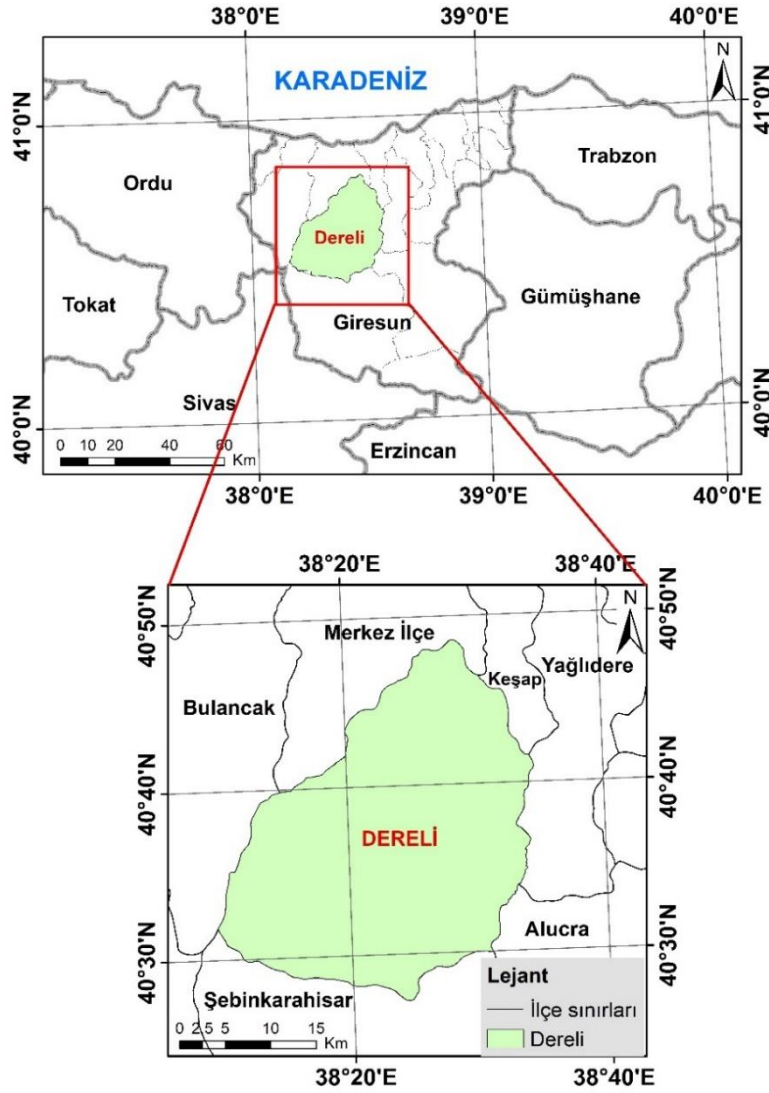
Taşkın duyarlılık haritaları, özellikle kentsel ortamlarda, mevcut antropojenik faaliyetler ile çevre ve iklim koşulları altında taşkına eğilimli alanların yerlerini gösteren haritalardır (Ouma ve Omai, 2023). Tehrany vd. (2015), gelecekteki taşkınları önlemek ve yönetmek için önemli adımlardan birinin de “taşkın duyarlılık haritalaması” olduğunu dile getirmiştir. Taşkın duyarlılık haritalaması, literatürde, taşkın tehlikesinin hafifletilmesinde ve taşkın yönetiminde gerekli ilk adım olarak kabul edilmektedir (Termeh vd., 2018; Zhao vd., 2020).

Bu çalışmada da, 22 Ağustos 2020 tarihinde yaşanan taşkın/sel felaketi nedeniyle can kayıplarının yaşandığı ve büyük ekonomik zararların ortaya çıktığı Giresun ilinin Dereli ilçesine ait taşkın duyarlılık haritasının üretilmesi amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Çalışma Alanı

Araştırma kapsamında çalışma alanı olarak Giresun ilinin Dereli ilçesi seçilmiştir. Harita Genel Müdürlüğünden temin edilen ilçe sınırları verisine (URL-2, 2022) göre Dereli'nin alanı 848,6 km² dir. İlçe coğrafi olarak; 40° 27' 15.26" - 40° 48' 34.57" kuzey enlemleri ile 38° 09' 37.7" - 38° 34' 34.42" doğu boylamları arasında kalmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Çalışma alanı haritası

Ortalama yüksekliğin 1548 m olduğu ilçe sınırları içerisinde yükseklik 150 m ile 3035 m arasında değişmektedir. İlçe merkezinin ortalama yüksekliği ise 254 m dir. İlçe sınırlarını kapsayan alanda eğim 0° ile 73.55° arasında değişmektedir. Ortalama eğim ise 24.08° dir.

Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi verilerine göre Dereli'nin 2022 yılı nüfusu 18.696 kişiden oluşmaktadır. Bu nüfusun, 5.879'u ilçe merkezinde, 12.817'si ise köylerde ikamet etmektedir (TÜİK, 2023).

Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM)'nin 1929-2022 yılları arasında kaydedilen ölçüm verilerine göre Giresun'un merkezinde ortalama sıcaklık 14,6 °C, ortalama güneşlenme süresi 2,4 saat, ortalama yağışlı gün sayısı yaklaşık 161 gün ve aylık toplam yağış miktarı ortalaması 1290,5 mm'dir (MGM, 2023). Dereli ilçesi Karadeniz sahilinden yaklaşık 28 km içeridedir. İlçenin kıyıdan uzak olması ve Giresun Dağları'nın ardında kalması nedeniyle kıyıdaki 1290 mm'lik yağış önemli miktarda azalmaktadır. Dereli'de yıllık ortalama sıcaklık 7,7 °C, yıllık ortalama yağış ise 693 mm civarındadır (Kaymaz, 2019; Apaydın, 2021).

Dereli ilçe merkezinde 2 akarsu bulunmaktadır. Bunlar; ilçenin tam ortasından geçen Aksu Çayı ve Aksu Çayı'nın yan kolu olan Dereli Deresi'dir (Şekil 2). Dereli Deresi, Aksu Çayı ile birleştiği noktadan 4 km yukarıda Akkaya Deresi ve Büyük Dere olmak üzere iki kola ayrılmaktadır. 22 Ağustos 2020 tarihli taşkın, Aksu Çayı ve onun yan kolu olan Dereli Deresi kenarında bulunan Dereli mahallesinde meydana gelmiştir (Apaydın, 2021).



Şekil 2. Dereli ilçe merkezinin Ocak 2023 tarihli Google Earth görüntüsü

2.2. Analitik Hiyerarşi Proses Yöntemi

Saaty (1980) tarafından geliştirilen Analitik Hiyerarşi Proses (AHP) yöntemi, literatürde yaygın olarak kullanılan Çok Kriterli Karar Analizi (ÇKKA) yöntemlerinden biridir. Yöntem, basitliği ve uygulamasının kolay olması nedeniyle başta yer seçimi uygulamaları (Akıncı vd., 2013; Kazemi ve Akıncı, 2018; Akıncı ve Demirarslan, 2022) olmak üzere heyelan duyarlılık haritalama (Kavzoglu vd., 2014; Akıncı vd., 2015), orman yangını duyarlılık haritalama (Akay ve Şahin, 2019; Sari, 2021; Sivrikaya ve Küçük, 2022) ve taşkın duyarlılık haritalama (Özay ve Orhan, 2021; Aydın ve Birincioğlu, 2022; Negese vd., 2022) çalışmalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Bu yöntem, genel olarak, kullanıcıların birden fazla kritere bağlı bir problemi çözerken kriterlerin ağırlıklarını hesaplamalarına olanak tanımaktadır. AHP yöntemi ile karmaşık problemleri çözmeye genel olarak üç aşama söz konusudur: (1) karar verme problemi hiyerarşik bir yapıya dönüştürülür (problem tanımlanır ve karar verici olası alternatifleri belirler), (2) uzmanların görüşlerinden yararlanarak ikili karşılaştırma matrisi oluşturulur ve kriterlerin ağırlıkları hesaplanır, (3) ikili karşılaştırma yargılarının tutarlılık oranı (Consistency Ratio - CR) hesaplanır (Akıncı ve Demirarslan, 2022). Tutarlılık oranı, ikili karşılaştırma yargıları arasındaki tutarlılığı gösteren bir ölçüdür.

İkili karşılaştırma matrisi, köşegen elemanlarının değerleri 1 olan $n \times n$ boyutlu bir kare matristir. Burada n problemi çözmek için kullanılan kriter sayısını ifade etmektedir.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} = 1/a_{12} & 1 & a_{23} \\ a_{31} = 1/a_{13} & a_{32} = 1/a_{23} & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Yukarıdaki denklemde a_{ij} , i . ölçüt ile j . ölçütün ikili karşılaştırma değeridir. a_{ji} değeri ise $1/a_{ij}$ den hesaplanır. a_{ij} değeri, “ i . ölçüt j . ölçüte göre ne kadar önemlidir?” sorusunun cevabıdır. İkili karşılaştırma matrisi oluşturulurken Saaty (1980) tarafından önerilen ve Tablo 1’de sunulan 1-9 tercih ölçeğinden faydalanılır.

Tablo 1. İkili karşılaştırmada kullanılan temel ölçek (Saaty, 1980)

Önem Derecesi	Açıklaması
1	Kriterler eşit derecede öneme sahip
3	İnci kriter 2nci kritere göre biraz daha (orta derecede) önemli
5	İnci kriter 2nci kritere göre fazla önemli (kesinlikle daha önemli)
7	İnci kriter 2nci kritere göre çok fazla önemli
9	İnci kriter 2nci kritere göre aşırı derecede fazla önemli
2, 4, 6, 8	Ara değerler

İkili karşılaştırma matrisindeki tercihlerin tutarlılığını değerlendirmek için Saaty tarafından önerilen bir tutarlılık oranı (Consistency Ratio - CR) kullanılmaktadır (Öztürk ve Batuk, 2007). AHP yönteminde tutarlılık oranı 0.10’dan küçük ise ikili karşılaştırma matrisindeki yargıların yeterince tutarlı olduğu kabul edilir (Saaty, 1980). Tutarlılık oranı aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanır.

$$CI = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1) \quad (2)$$

$$CR = CI / RI \quad (3)$$

İkinci formüldeki CI tutarlılık indeksi (Consistency Index - CI), üçüncü formüldeki RI ise rastgele indeks veya tesadüflik göstergesi (Random Index - RI) olarak adlandırılmaktadır. Tablo 2’de, $n \times n$ boyutlu ikili karşılaştırma matrisleri için RI değerleri verilmiştir.

Tablo 2. Rastgele indeks değerleri (Saaty, 1987)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

2.3. Taşkın Duyarlılık Haritasının Üretilmesinde Kullanılan Veriler

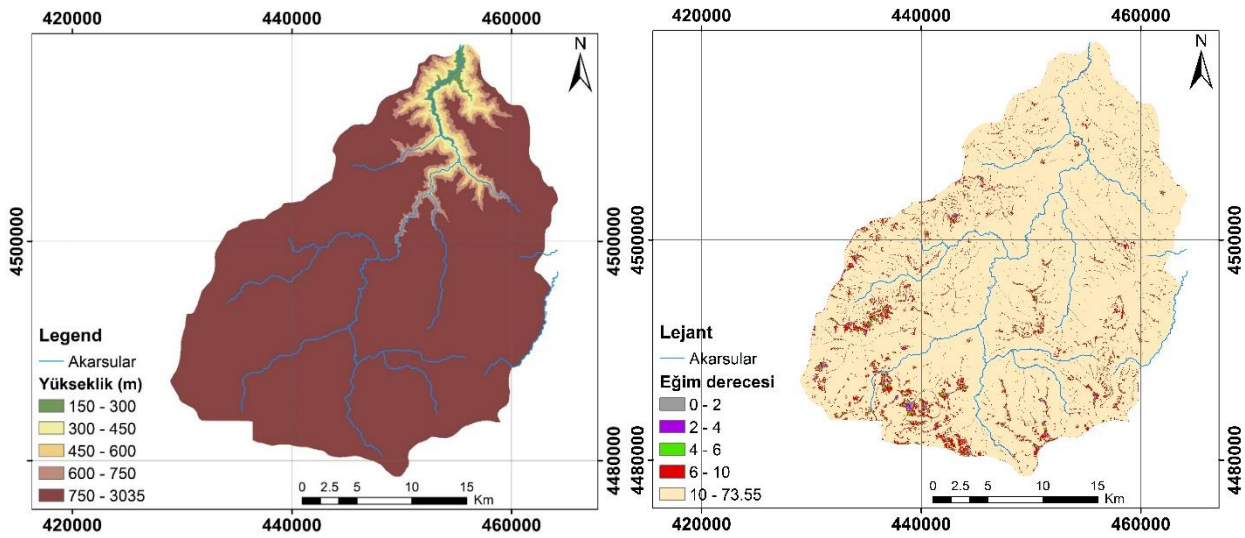
Taşkın duyarlılık haritalamada kullanılan faktörlerin seçimi büyük ölçüde hidrolojik, antropojenik, jeolojik ve topoğrafik faktörlerin mevcudiyetine bağlıdır. Önceki çalışmalarda, taşkın koşullandırma faktörlerinin seçimine yönelik spesifik bir kılavuzun olmadığı görülmüş ve bu nedenle çalışmalarda çok sayıda farklı faktör kullanılmıştır (Ouma ve Omai, 2023). Bu çalışmada, taşkın duyarlılık haritalama literatürüne, yerel koşullara ve mevcut verilere dayalı olarak 10 taşkın koşullandırma faktörü (yükseklik, eğim, bakı, arazi örtüsü, akarsulara uzaklık, drenaj yoğunluğu, akış birikimi, TWI, yağış ve jeoloji) kullanılmıştır.

Raster formattaki (ESRI GRID) faktör haritaları, ArcGIS 10.5 ortamında yeniden sınıflandırma (reclassify) fonksiyonu kullanılarak 1’den (çok düşük) 5’e (çok yüksek) kadar ortak bir ölçeğe göre

yeniden sınıflandırılmıştır. Çalışmada kullanılan faktörlere ait konumsal verilerin nasıl üretildiği ilerleyen bölümlerde açıklanmıştır.

2.3.1. Yükseklik

Literatürdeki önceki çalışmalar, yüksekliğin taşkın olaylarını etkileyen en önemli faktörlerden biri olduğunu göstermiştir (Edamo vd., 2022; Habibi vd., 2022; Mudashiru vd., 2022; Ouma ve Omai, 2023). Taşkınlar genellikle alçak rakımlı alanlarda meydana gelmektedir. Su, yerçekimi kuvveti nedeniyle yüksek rakımlı yerlerden (dağlık alanlardan) alçak rakımlı yerlere (düzlukler ve akarsu kıyılarına) doğru hızla akmakta, alçak rakımlı ve düzlük alanlara dağılarak taşkınları/su baskınlarını meydana getirmektedir (Fatah vd., 2022). Çalışma alanının yükseklik haritası, 10 m çözünürlüklü raster formattaki SYM'den üretilmiştir. Çalışma alanında yükseklik 150 ile 3035 m arasında değişmektedir. Yükseklik verisi SYM'nin 5 sınıfa (150-300, 300-450, 450-600, 600-750, 750-3035) yeniden sınıflandırılmasıyla elde edilmiştir (Şekil 3a).



Şekil 3. Çalışma alanının; a) yükseklik haritası, b) eğim haritası

2.3.2. Eğim

Eğim, taşkınların meydana gelmesinde etkili olan parametrelerin en önemlilerinden birisidir. Rakımı düşük ve eğimi az olan bölgelerde taşkın oluşma olasılığı diğer bölgelere göre daha fazladır (Tehrany vd., 2015). Yağış nedeniyle oluşan yüzeysel akış, dik eğimli yüzeyler tarafından hızlandırılmakta, dolayısıyla toprağın emme oranı düşmektedir. Sonuç olarak, düşük eğimli alanların (düzluk araziler), büyük miktarlardaki suyun durgunlaşması nedeniyle şiddetli taşkınlar maruz kalma olasılığı yüksektir (Msabi ve Makonyo, 2021). Çalışma alanının eğim haritası SYM'den üretilmiştir. Çalışma alanında eğim 0° ile 73.55° arasında değişmektedir. Eğim verisi literatür araştırmaları da göz önünde bulundurularak 5 sınıfa ($0-2^\circ$, $2-4^\circ$, $4-6^\circ$, $6-10^\circ$, $10-73.55^\circ$) ayrılmıştır (Şekil 3b).

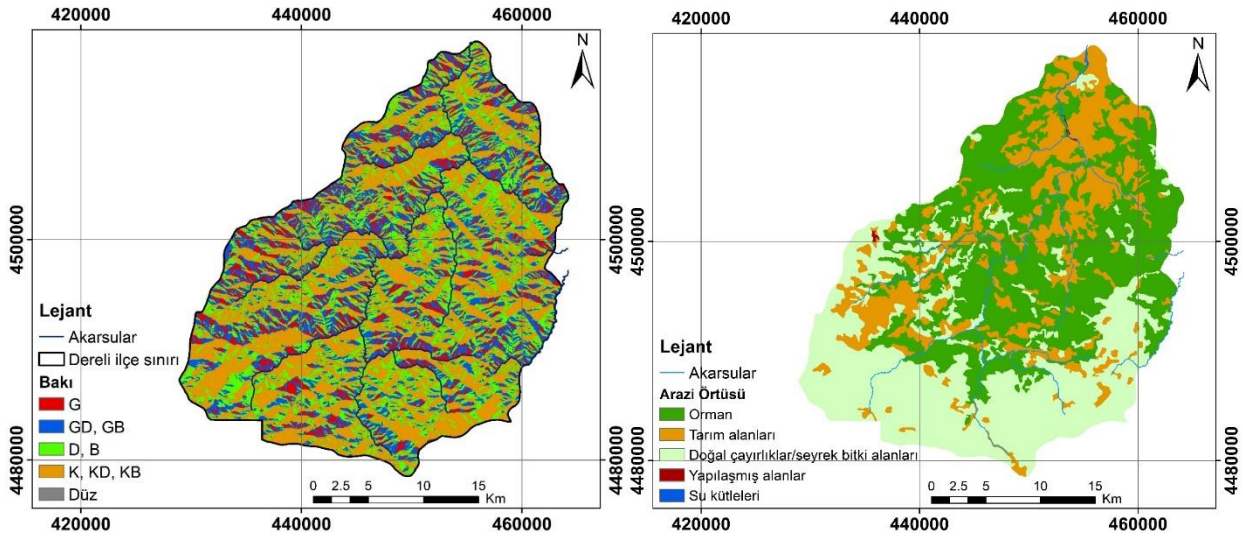
2.3.3. Bakı

Bir yamacın yönünü tanımlayan bakı, taşkın duyarlılık analizi için önemli faktörlerden biridir (Nachappa vd., 2020). Ancak Habibi vd. (2022), bakının taşkın oluşumunu dolaylı olarak etkilediğini ifade etmiştir. Türkiye'nin konumu nedeniyle güney yamaçlar kuzey yamaçlara göre daha fazla güneş radyasyonuna maruz kalmaktadır. Dolayısıyla, güney ve kuzey yamaçlar arasında buharlaşma, toprak nemliliği ve bitki örtüsü bakımından farklılıklar oluşmaktadır. Bu durum da yamaçlarda infiltrasyon farkını ortaya çıkararak, taşkın oluşumunu etkileyebilmektedir. Genel olarak düz araziler ile az güneş alan bakıya sahip bölgeler taşkın açısından riskli kabul edilmektedir (Özay, 2021; Tüzgen ve Karaca,

2021). Çalışma alanının bakı haritası SYM'den üretilmiş ve Özay (2021) tarafından yapılan tez çalışmasında olduğu gibi 5 sınıfa ayrılmıştır (Şekil 4a).

2.3.4. Arazi Örtüsü

Arazi örtüsü; infiltrasyon oranı, yüzeysel akış hızı ve buharlaşma gibi hidrolojik süreçleri etkileyen önemli bir faktör olduğu için taşkın duyarlılık analizinde çok önemlidir (Mudashiru vd., 2022). Yüzeysel suyu akışı ve infiltrasyon (sızma), diğer taşkın koşullandırma faktörlerinden farklı olarak arazi örtüsüne bağlı olduğu için bir havzadaki taşkın derecesi ve sıklığı, arazi örtüsü ile yakından ilişkilidir. Örneğin, bitki örtüsü yoğunluğunun yüzeysel suyu akışı üzerinde olumsuz bir etkisi vardır ve taşkın oluşumu ile negatif bir korelasyona sahiptir. Diğer taraftan, geçirimsiz kentsel yüzeyler (örneğin asfalt yollar) ve çıplak kayalıklar, düşük infiltrasyon nedeniyle yüzeysel suyu akışlarını arttırmaktadır (Ouma ve Omai, 2023). Çalışmada kullanılan CORINE 2018 arazi örtüsü katmanı (URL-3, 2022) temel olarak 5 sınıfa (Su kütleleri, yapılaşmış alanlar, doğal çayırliklar ve seyrek bitki alanları, tarımsal alanlar, orman) ayrılmıştır (Şekil 4b).



Şekil 4. Çalışma alanının; a) bakı haritası, b) arazi örtüsü haritası

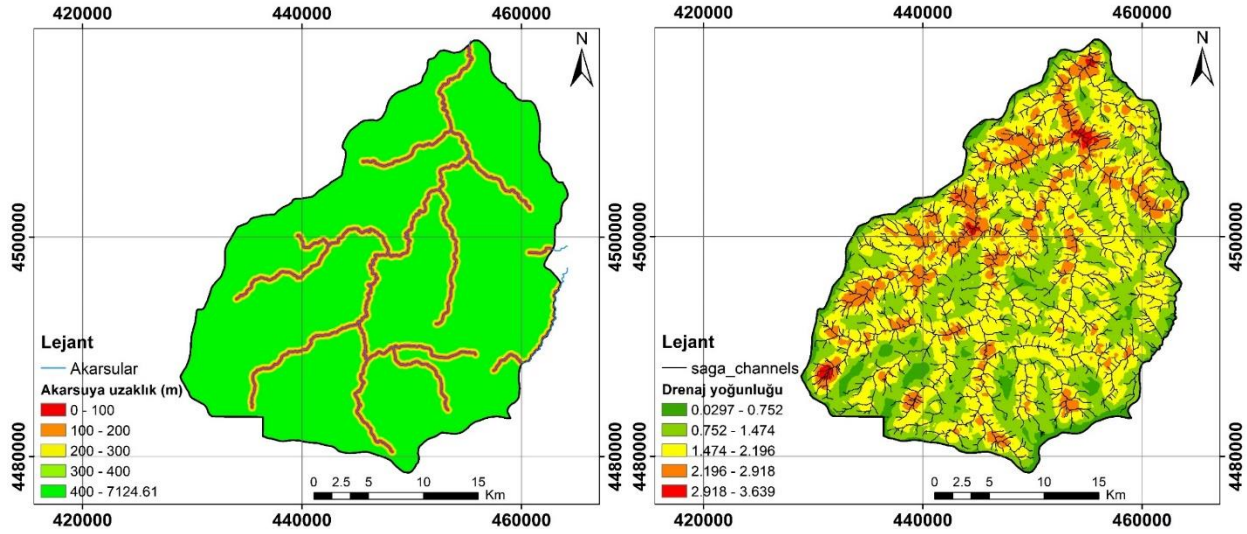
2.3.5. Akarsulara Uzaklık

Akarsulara yakın alanlar taşkınlara en yatkın alanlardır (Fatah vd., 2022; Habibi vd., 2022). Akarsular gibi su kütlelerine yakın bölgelerdeki arazi neredeyse düz olacağından, şiddetli yağmur durumunda bu alanların sular altında kalması muhtemeldir (Ouma ve Omai, 2023). Küçük akarsular, birkaç metre genişliğindeki tampon bölgeleri sular altında bırakabilirken, büyük nehirler birkaç kilometre boyunca taşabilmektedir (Fatah vd., 2022). Bu çalışmada Copernicus Arazi İzleme Servisinden (URL-4, 2022) indirilen akarsu ağı kullanılmıştır. ArcGIS 10.5 ortamında "Euclidean Distance" fonksiyonu kullanılarak akarsulara uzaklık haritası üretilmiştir. Daha sonra, literatür çalışmaları göz önünde bulundurularak akarsulara uzaklık 5 sınıfa (0-100, 100-200, 200-300, 300-400, >400 m) ayrılmıştır (Şekil 5a).

2.3.6. Drenaj Yoğunluğu

Drenaj yoğunluğu, havzanın toplam akarsu uzunluğu ile genel havza alanı arasındaki orandır (Fatah vd., 2022). Drenaj yoğunluğu, taşkın oluşumuna güçlü bir şekilde katkıda bulunan temel koşullandırma faktörüdür (Msabi ve Makonyo, 2021). Taşkın tehlikesi, drenaj yoğunluğuyla doğru orantılıdır. Drenaj yoğunluğunun artması, yüzeysel suyu akışını ve taşkın duyarlılığını arttırmaktadır (Fatah vd., 2022). Çalışmada, önce SYM'den çalışma alanının drenaj ağı üretilmiştir. Daha sonra,

ArcGIS 10.5 yazılımının “line density” fonksiyonu kullanılarak drenaj yoğunluğu belirlenmiştir. Drenaj yoğunluğu son olarak 5 sınıfa; (0.0297-0.752, 0.752-1.474, 1.474-2.196, 2.196-2.918, 2.918-3.639) ayrılmıştır (Şekil 5b).



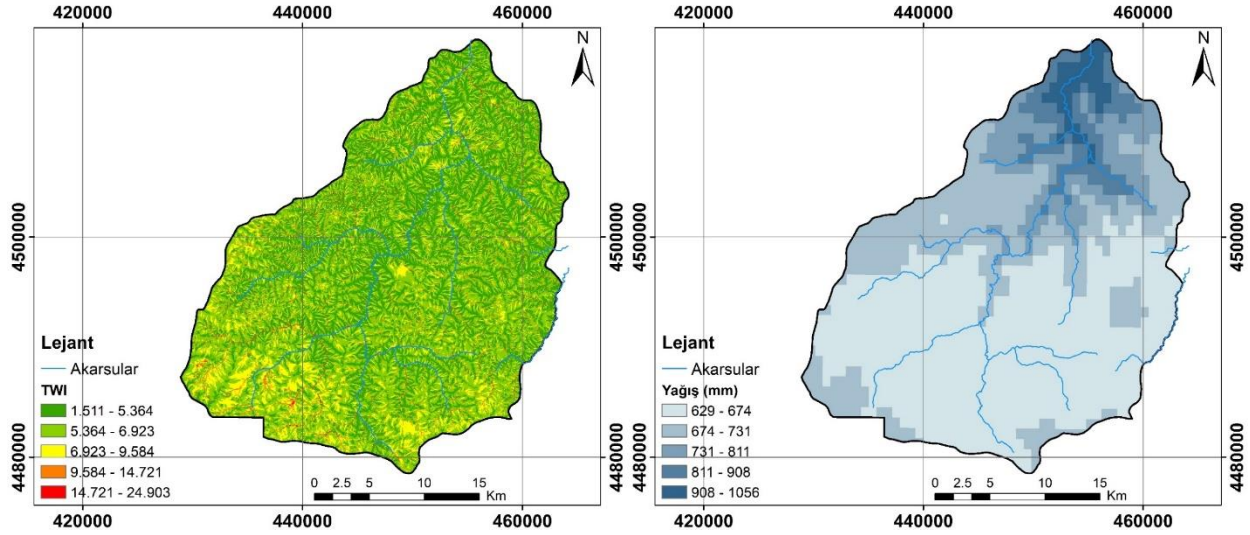
Şekil 5. Çalışma alanının; a) akarsuya uzaklık haritası, b) drenaj yoğunluğu haritası

2.3.7. Topografik Nemlilik İndeksi

Topografik nemlilik indeksi (Topographic Wetness Index - TWI) taşkın olaylarının mekânsal değişimini etkileyen önemli hidrolojik faktörlerden biridir (Ouma ve Omai, 2023). TWI, toprak nem içeriğini ve yüzey doygunluğunu temsil eder. TWI'nin, yani toprak nemi içeriği ve toprak doygunluğunun yüksek olması taşkın olasılığını arttırmaktadır. Doygunluk seviyesi arttığında, yeraltı suyu tablası yükselir ve bölge taşkın için elverişli hale gelir. Bu nedenle, daha yüksek TWI değerine sahip alanlar taşkına daha yatkındır (Vilasan ve Kapse, 2022). SAGA GIS yazılımı kullanılarak SYM'den çalışma alanının TWI haritası üretilmiştir. TWI daha sonra 5 sınıfa (1.511-5.364, 5.364-6.923, 6.923-9.584, 9.584-14.721, 14.721-24.903) ayrılmıştır (Şekil 6a).

2.3.8. Yağış

Yağış, genel olarak taşkınların en önemli nedenlerinden biridir. Taşkınla sonuçlanan yüzeysel su akışının oluşumu, yağışı gerektirir. Bu nedenle, yüzeysel akış büyük ölçüde yağışa bağlıdır (Mudashiru vd., 2022). Kısa sürede meydana gelen şiddetli yağışların veya düşük yoğunluklu uzun süreli yağışların taşkınların ana nedeni olduğu kabul edilmektedir (Fatah vd., 2022; Habibi vd., 2022). Bu nedenle, çalışma alanının taşkın duyarlılık modellemesi için yağış faktörü de dikkate alınmıştır. Dereli ilçesinin yağış haritasını oluşturmak için WorldClim sitesinden indirilen yağış verileri kullanılmıştır (URL-5, 2022). Yağış verisi 5 sınıfa (629-674, 674-731, 731-811, 811-908, 908-1056) ayrılarak çalışma alanının yağış haritası elde edilmiştir (Şekil 6b).



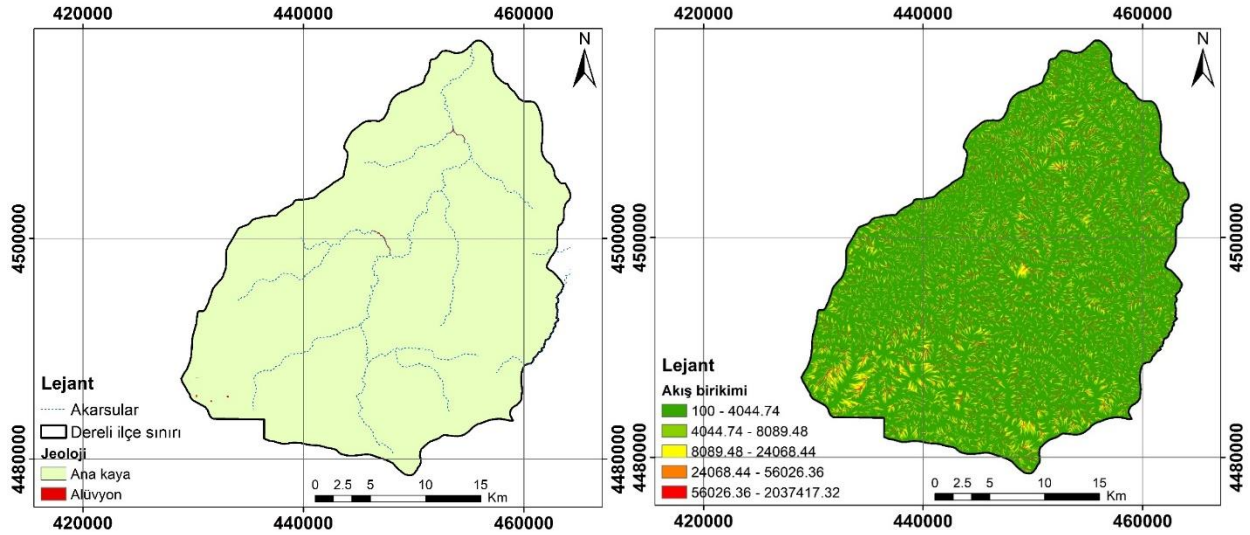
Şekil 6. Çalışma alanının; a) TWI haritası, b) yağış haritası

2.3.9. Jeoloji / Litoloji

Taşkınlar, toprak gözenekliliği ve geçirgenliği üzerindeki etkilerinden dolayı jeolojik yapı ile ilişkilidir. Çok dayanıklı kayalarda geçirimsizlik çok düşüktür ve sonuç olarak taşkın potansiyeli daha yüksektir (Habibi vd., 2022). Kayaçların geçirgenliği ile sızma hızı arasında önemli bir ilişki vardır. Daha yüksek geçirgenliğe sahip litolojik birimler sızma sürecini hızlandırırken, geçirimsiz katman yüzeyel akışı artırarak taşkınları tetikleyebilmektedir (Msabi ve Makonyo, 2021). Tang vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada, litolojinin drenaj sistemlerinin inşası ile ilgili bir faktör olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, yüksek dirençli kayalara sahip bir bölgenin daha düşük drenaj yoğunluğuna sahip olacağı ve bunun da daha yüksek taşkın potansiyeline neden olacağı ifade edilmiştir. Söz konusu katmanın oluşturulmasında MTA Genel Müdürlüğünden temin edilen 1/100.000 ölçekli jeoloji haritası kullanılmıştır. Jeoloji katmanı alüvyon ve ana kaya olmak üzere 2 sınıfa ayrılmıştır (Şekil 7a).

2.3.10. Akış Birikimi

Akış birikimi (flow accumulation), taşkın duyarlılık haritalamada ve hidrolojik çalışmalarda yaygın olarak kullanılan faktörlerden biridir (Msabi ve Makonyo, 2021; Fatah vd., 2022). Bu faktör, havza içindeki belirli bir noktadaki toplam akışı gösterir. Daha yüksek bir akış birikim değeri, daha yüksek bir su birikimi olasılığını, dolayısıyla daha yüksek bir taşkın olasılığını ifade etmektedir (Das, 2020; Msabi ve Makonyo, 2021; Fatah vd., 2022; Ouma ve Omai, 2023). Bu çalışmada, ArcGIS 10.5 ortamında, SYM'den, önce akış yönleri (flow direction) hesaplanmış, sonra "flow accumulation" fonksiyonu kullanılarak akış birikimi üretilmiştir. Akış birikimi değerleri 5 sınıfa ayrılarak çalışma alanının akış birikimi haritası elde edilmiştir (Şekil 7b).



Şekil 7. Çalışma alanının; a) jeoloji haritası, b) akış birikimi haritası

2.4. AHP Yönteminin Uygulanması

Bu çalışmada, Giresun ili Dereli ilçesinin taşkın duyarlılık haritasını üretmek için AHP yöntemi kullanılmıştır. Taşkın duyarlılık haritalamada kullanılan faktörler ve bu faktörlerin ağırlıklarını belirlemek için literatürdeki çalışmalardan faydalanılmıştır. Literatür taraması sonucunda taşkın duyarlılık haritalarının üretiminde en çok kullanılan 10 parametre belirlenmiştir. Bu parametreler; yağış, eğim, yükseklik, akarsu ağına uzaklık, arazi örtüsü, akış birikimi, drenaj yoğunluğu, TWI, jeoloji/litoloji ve bakı olmuştur. Literatürdeki çalışmalara göre parametrelerin önem dereceleri ya da öncelikleri belirlenmiş ve Tablo 3'te yer alan ikili karşılaştırma matrisi oluşturularak parametrelerin ağırlıkları hesaplanmıştır (Tablo 4). Tutarlılık oranının 0.10'den küçük olması üzerine (0.079) hesaplanan ağırlıkların çalışmada kullanılmasına karar verilmiştir. Diğer taraftan, yine ilgili literatür incelenerek (Yılmaz, 2015; Selçuk vd., 2016; Gerger ve Tanrıverdi, 2018; Şengün vd., 2019; Tanrıverdi, 2019; Ocak ve Bahadır, 2020; Özay, 2021; Tüzgen ve Karaca, 2021) alt parametreler ve alt parametrelerin puanları belirlenmiştir (Tablo 5). Son olarak ArcGIS 10.5 yazılımında ağırlıklı toplam yapılarak çalışma alanının taşkın duyarlılık haritası üretilmiştir.

Tablo 3. İkili karşılaştırma matrisi

	YGS	EGM	YKSL	AKSU	ARZO	AKSB	DRNJ	TWI	JEO	BAKI
YGS	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	6.000	7.000	8.000	9.000	9.000
EGM	0.500	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	6.000	7.000	9.000	9.000
YKSL	0.333	0.500	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	6.000	7.000	8.000
AKSU	0.250	0.333	0.500	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	6.000	7.000
ARZO	0.200	0.250	0.333	0.500	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	6.000
AKSB	0.167	0.200	0.250	0.333	0.500	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000
DRNJ	0.143	0.167	0.200	0.250	0.333	0.500	1.000	2.000	3.000	4.000
TWI	0.125	0.143	0.167	0.200	0.250	0.333	0.500	1.000	2.000	3.000
GEO	0.111	0.111	0.143	0.167	0.200	0.250	0.333	0.500	1.000	2.000
BAKI	0.111	0.111	0.125	0.143	0.167	0.200	0.250	0.333	0.500	1.000

Tablo 4. Faktörlerin ağırlıkları

	YGS	EGM	YKSL	AKSU	ARZO	AKSB	DRNJ	TWI	JEO	BAKI	Ağırlık
YGS	0.3401	0.4154	0.3887	0.3450	0.3040	0.2693	0.2407	0.2172	0.1935	0.1667	0.2881
EGM	0.1701	0.2077	0.2591	0.2588	0.2432	0.2244	0.2063	0.1900	0.1935	0.1667	0.2120
YKSL	0.1134	0.1038	0.1296	0.1725	0.1824	0.1795	0.1719	0.1629	0.1505	0.1481	0.1515
AKSU	0.0850	0.0692	0.0648	0.0863	0.1216	0.1346	0.1375	0.1357	0.1290	0.1296	0.1093
ARZO	0.0680	0.0519	0.0432	0.0431	0.0608	0.0898	0.1032	0.1086	0.1075	0.1111	0.0787
AKSB	0.0567	0.0415	0.0324	0.0288	0.0304	0.0449	0.0688	0.0814	0.0860	0.0926	0.0563
DRNJ	0.0486	0.0346	0.0259	0.0216	0.0203	0.0224	0.0344	0.0543	0.0645	0.0741	0.0401
TWI	0.0425	0.0297	0.0216	0.0173	0.0152	0.0150	0.0172	0.0271	0.0430	0.0556	0.0284
GEO	0.0378	0.0231	0.0185	0.0144	0.0122	0.0112	0.0115	0.0136	0.0215	0.0370	0.0201
BAKI	0.0378	0.0231	0.0162	0.0123	0.0101	0.0090	0.0086	0.0090	0.0108	0.0185	0.0155
TOPLAM											1.0000
<p>YGS: Yağış, EGM: Eğim, YKSL: Yükseklik, AKSU: Akarsulara uzaklık, ARZO: Arazi örtüsü AKSB: Akış birikimi, DRNJ: Drenaj yoğunluğu, TWI: Topoğrafik nemlilik indeksi, JEO: Jeoloji</p> <p>$\lambda_{\max} = 11.05478$, CI = 0.117198, RI = 1.49, CR = 0.079</p>											

Tablo 5. Alt kriterlerin puanlandırılması

Kriter	Alt kriter	Puan	Kaynak
Yağış	908-1056	5	Ocak ve Bahadır, (2020) Özay, (2021) Penki ve ark. (2022) Nsangou ve ark. (2022)
	811-908	4	
	731-811	3	
	674-731	2	
	629-674	1	
Yükseklik	150 - 300	5	Sözer ve ark. (2019) Özay, (2021) Tüzgen ve Karaca, (2021) Penki ve ark. (2022)
	300 - 450	4	
	450 - 600	3	
	600 - 750	2	
	750 - 3035	1	
Eğim (°)	0-2	5	Ocak ve Bahadır, (2020) Tüzgen ve Karaca, (2021) Penki ve ark. (2022) Nsangou ve ark. (2022)
	2-4	4	
	4-6	3	
	6-10	2	
	> 10	1	
Akarsuya uzaklık (m)	0 - 100	5	Tüzgen ve Karaca, (2021) Özay, (2021) Nsangou ve ark. (2022)
	100 - 200	4	
	200 - 300	3	
	300 - 400	2	
	> 400	1	
Arazi örtüsü	Sulak alanlar	5	Negese ve ark. (2022) Mudashiru ve ark. (2022)
	Yapılaşmış (kentsel) alanlar	4	
	Doğal çayırliklar/seyrek bitki alanları	3	
	Tarım (ekili) alanları	2	
	Orman	1	

Tablo 5'in devamı

Kriter	Alt kriter	Puan	Kaynak
TWI	14.721 - 24.903	5	Sözer ve ark. (2019) Özay, (2021) Penki ve ark. (2022) Nsangou ve ark. (2022)
	9.584 - 14.721	4	
	6.923 - 9.584	3	
	5.364 - 6.923	2	
	1.511 - 5.364	1	
Akış birikimi	56026.36 - 2037417.32	5	Sözer ve ark. (2019) Negese ve ark. (2022)
	24068.44 - 56026.36	4	
	8089.48 - 24068.44	3	
	4044.74 - 8089.48	2	
	100 - 4044.74	1	
Drenaj yoğunluğu	2.918 - 3.639	5	Özay, (2021) Penki ve ark. (2022) Nsangou ve ark. (2022) Negese ve ark. (2022)
	2.196 - 2.918	4	
	1.473 - 2.196	3	
	0.752 - 1.473	2	
	0.029 - 0.752	1	
Jeoloji	Alüvyon	5	Tüzgen ve Karaca, (2021)
	Diğer kayalar	1	
Baki	Düz	5	Özay, (2021)
	K, KD, KB	4	
	D, B	3	
	GD, GB	2	
	G	1	

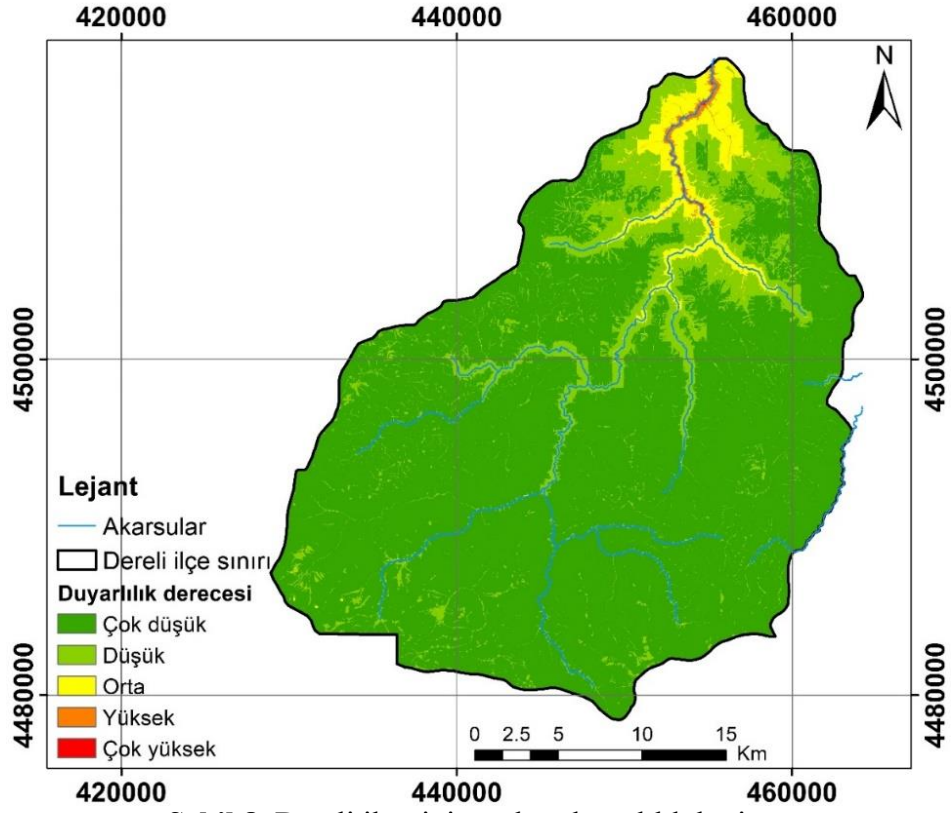
3. Bulgular ve Tartışma

Kriterlerin ağırlıkları belirlendikten sonra ArcGIS 10.5 yazılımında ağırlıklı toplam (weighted sum) bindirme analizi kullanılarak çalışma alanının taşkın duyarlılık indeksi hesaplanmıştır. Bir pikselin indeks değerinin yüksek olması, o pikselin taşkın duyarlılığının yüksek olduğu, indeks değerinin düşük olması ise o pikselin taşkın duyarlılığının düşük olduğu anlamına gelmektedir. 1 ile 4.83 arasında değişen indeks değerleri eşit aralıkla 5 sınıfa ("Çok yüksek, Yüksek, Orta, Düşük ve Çok düşük") ayrılmış ve çalışma alanının taşkın duyarlılık haritası elde edilmiştir (Şekil 8).

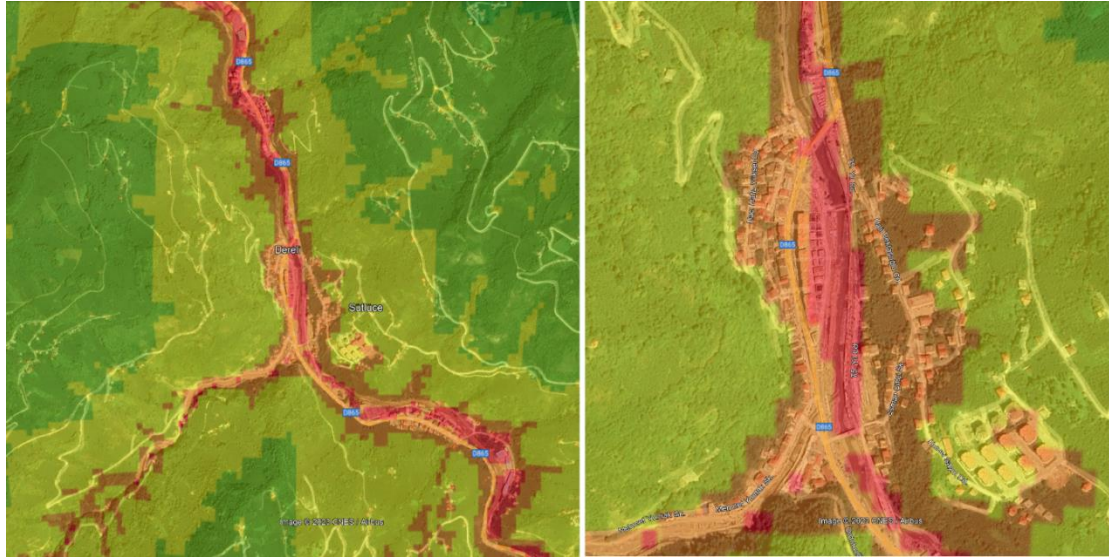
Çalışma alanının yüzölçümü 84.552,7 ha'dır. Bu alanın; %80.56'sı (68120.17 ha) çok düşük derecede, %14.65'i (12387.11 ha) düşük derecede, %4.14'ü (3499.27 ha) orta derecede, %0.54'ü (453.09 ha) yüksek derecede ve %0.11'i (93.04 ha) ise çok yüksek derecede taşkına duyarlı alan içinde kalmaktadır.

CORINE 2018 arazi örtüsü (URL-3, 2022) verisine göre Dereli ilçesinin %0.11'i yapay bölgeler (kesikli/sürekli şehir yapısı), %22.94'ü tarımsal alanlar, %76.83'ü orman ve yarı doğal alanlar, %0.12'si ise su kütleleri ile kaplıdır. Arazi örtüsü katmanı taşkın duyarlılık haritası ile karşılaştırıldığında; yapay bölgelerin %57.63'ünün, tarımsal alanların %1.49'unun, orman ve yarı doğal alanların ise %0.16'sinin yüksek ve çok yüksek derecede taşkına duyarlı alanların içerisinde kaldığı belirlenmiştir.

Üretilen taşkın duyarlılık haritası ArcGIS 10.5 yazılımının "Layer to KML" fonksiyonu kullanılarak ".KMZ" formatına dönüştürülmüş ve Google Earth yazılımı kullanılarak görüntülenmiştir (Şekil 9). Bu görselleştirme ile Dereli ilçe merkezinin neredeyse tamamının yüksek ve çok yüksek derecede taşkına duyarlı bölgeler içerisinde kaldığı görülmüştür (Şekil 9).

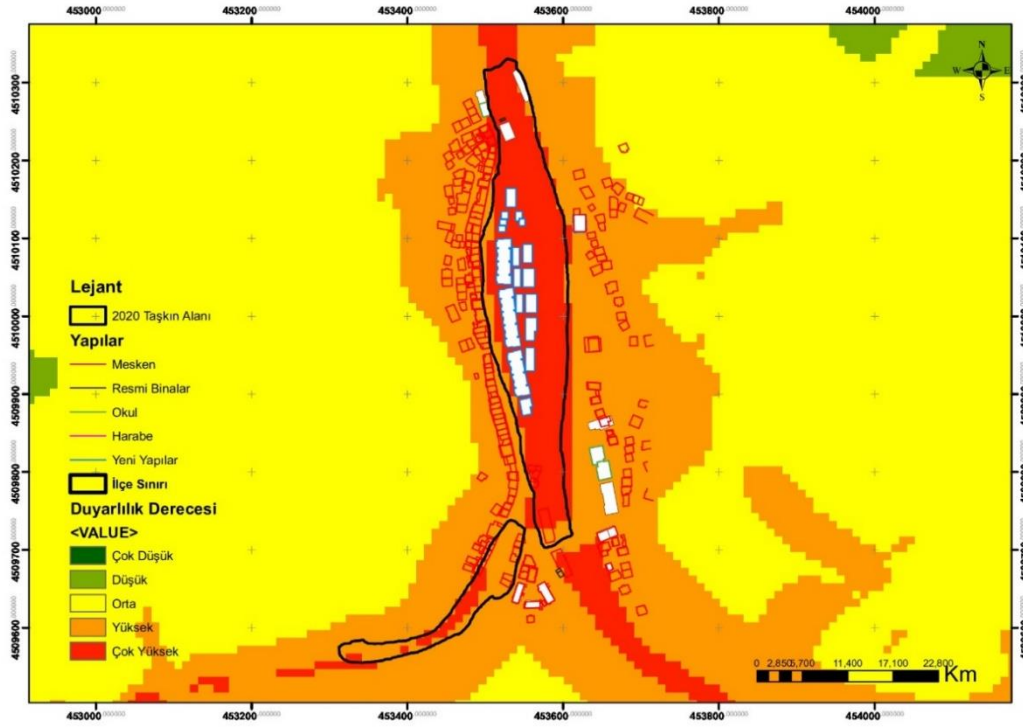


Şekil 8. Dereli ilçesinin taşkın duyarlılık haritası



Şekil 9. Taşkın duyarlılık haritasının Google Earth görüntüsü üzerinde gösterimi

Şekil 10'da kalın siyah çizgi ile gösterilen alanlar, 22 Ağustos 2020 tarihinde Dereli'de meydana gelen taşkından etkilenen alanları (taşkın sınırını) göstermektedir. Bu sınır, taşkın duyarlılık haritası ile karşılaştırılarak üretilen taşkın duyarlılık haritasının doğrulaması (validation) yapılmıştır. Envanter taşkın alanının %80'inin çok yüksek derecede, %20'sinin ise yüksek derece taşkına duyarlı alanlarla çakıştığı tespit edilmiştir (Şekil 10). Bu sonuç, çalışma kapsamında üretilen taşkın duyarlılık haritasının güvenilir olduğunu ve Dereli ilçesinde taşkın nedeniyle gelecekte oluşacak zararları azaltmada kullanılabileceğini göstermiştir.



Şekil 10. Taşkın envanteri ve taşkın duyarlılık haritasının çakıştırılmış hali

20 Ağustos 2020 yılında büyük bir sel felaketi yaşayan Dereli ilçesinde Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ile TOKİ tarafından yapılan çalışmalarla altyapı tesisleri, konut ve ticari alanlar yeniden inşa edilmiştir. Ancak Su Politikaları Derneği (SPD), “taşkın sonrasında dere yatağı düzenlenirken büyük bir mühendislik hatasının yapıldığını ve Dereli Taş Kemer Köprü bölgesinde yatak kesitinin daraltıldığını” vurgulamıştır. Nitekim bu daralma ilk taşkında karşı sahildeki yolun istinat duvarının altını boşaltmış ve yolda çökmelere neden olmuştur (Şekil 11). Bu durum, dere yataklarındaki köprü ve menfez açıklıklarının uygun bir şekilde projelendirilmesi ve sürekli temizlenerek açık tutulması gerektiğini bir kez daha gözler önüne sermiştir (URL-6, 2022).



Şekil 11. 2022 yılında meydana gelen taşkın sonrası yolda oluşan çökmeler (URL-6, 2022)

Dereli ilçesinde 2020 yılında yaşanan sel felaketinden sonra yıkılan binaların yerine yapılan yeni binalar taşkın duyarlılık haritasında yüksek ve çok yüksek derecede taşkına duyarlı alanlar içerisinde yapılmıştır (Şekil 12). Oysa taşkın felaketinin yaşandığı alan, 2944 sayılı Cumhurbaşkanı Kararı ile 6306 sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun'un 2. maddesi gereğince “Riskli Alan” ilan edilmiştir. Bu karar 09.09.2020 tarih ve 31239 sayılı Resmi Gazetede yayımlanarak yürürlüğe girmiştir (T.C. Resmi Gazete, 2020). Riskli alan ilan edilmesine rağmen aynı alana 71 konut ve 82 iş yeri yapılmıştır. Yine aynı bölgede Dereli Belediyesi hizmet binası, Kaymakamlık, Emniyet Müdürlüğü, Yüksek Okul, İlkokul ve Açık otopark yapılması planlanmıştır. Taşkın duyarlılık haritasında yüksek ve çok yüksek derecede taşkına duyarlı alan içinde Orman İşletme Müdürlüğü ve lojmanları, 2 adet Cami, Öğretmen evi, Halk pazarı, Polis lojmanları, Çok

programlı Anadolu Lisesi, Orta Öğretim Erkek Öğrenci Pansiyonu, PTT binası ve 204 adet mesken bulunmaktadır.



Şekil 12. Taşkından sonra yeniden inşa edilen Dereli ilçesi (URL-7, 2022)

Taşkın felaketinden sonra afetzedeler için TOKİ tarafından yapılan konut ve işyerlerinin riskli bölgelere inşa edildiği ulusal basında da eleştiri konusu olmuştur (URL-8, 2023; URL-9, 2023). TOKİ tarafından yapılan yazılı açıklamada; “Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü’nce yapılan hesaplamalar sonucu belirlenen dere taşkın kotuna göre proje çalışmalarının yapıldığı, yapılan proje çalışmalarında dere kret kotunun altında hiçbir bağımsız bölüm oluşturulmadığı, bodrum katı yapılmadığı, tüm alanın dolgu ile yükseltilerek dere kret kotunun üzerine çıkartıldığı” ifade edilerek açıklamaların gerçeği yansıtmadığı belirtilmiştir (URL-9, 2023).

5. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, CBS analiz fonksiyonları ve AHP yöntemi kullanılarak Dereli İlçesinin taşkın duyarlılık haritası üretilmiştir. Literatürde yaygın olarak kullanıldığı belirlenen 10 faktör dikkate alınarak üretilen taşkın duyarlılık haritası, 5 duyarlılık sınıfına sahip olacak şekilde üretilmiştir. Taşkın duyarlılık haritasına göre çalışma alanının yaklaşık %1’inin yüksek ve çok yüksek derecede taşkına duyarlı olduğu belirlenmiştir. Yüksek ve çok yüksek derecede taşkına duyarlı alan oranı her ne kadar çok küçük ve önemsiz gibi görünse de ilçe merkezinin tamamının bu riskli alanın içinde kaldığı tespit edilmiştir. Taşkın duyarlılık haritası, 2020 yılında meydana gelen taşkın felaketinin sınırları kullanılarak doğrulanmış ve 2020 yılındaki taşkından etkilenen alanların %80’inin üretilen haritada çok yüksek derecede taşkına duyarlı bölgelerle çakıştığı tespit edilmiştir.

Üretilen taşkın duyarlılık haritasına göre, Dereli ilçesinde önümüzdeki yıllarda meydana gelebilecek olası taşkınlarda yerleşim alanlarının yeniden taşkından etkilenebileceği görülmektedir. Bu nedenle, çalışma kapsamında üretilen taşkın duyarlılık haritasının ilçede gelecekte yaşanması muhtemel taşkın olaylarının zararlarını azaltmak için dikkate alınması gerektiği görülmüştür. Her ne kadar bu çalışmalar sırasında Giresun ilinin İl Afet Risk Azaltma Planı (İRAP)’na erişilememiş olsa da, İRAP’ın güncellenmesi aşamasında bu çalışmadan üretilen duyarlılık haritasından faydalanılması, vatandaşların can ve mal güvenliğini sağlamak açısından yararlı olacaktır.

Çalışma sonucunda Dereli ilçesinde taşkınlara karşı alınabilecek önlemler ve öneriler aşağıda sıralanmıştır;

- Üretilen taşkın duyarlılık haritası dikkate alınarak ilçenin imar planı güncellenmeli ve taşkından etkilenebilecek riskli alanların yeşil alan olarak değerlendirilmesi sağlanmalıdır,
- İlçenin yer aldığı akarsu havzasının ve alt havzaların üst kısımlarında ağaçlandırma arttırılmalı ve plansız/kaçak ağaç kesimleri engellenmelidir,
- Bölgedeki akarsuların taşkın debileri yeniden hesaplanmalı buna göre menfez ve köprü gibi yapılar tekrar gözden geçirilerek gerekiyorsa yeniden projelendirilmelidir,
- Yerleşim merkezinde drenaj sistemlerinin kapasiteleri arttırılmalı ve alt yapı standartları eksiksiz bir şekilde uygulanmalıdır,
- Akarsu yataklarının civarında betonlaşma ve asfaltlamadan uzak durulmalıdır,
- Akarsu yatakları düzenli aralıklarla temizlenmeli ve temiz kalması için halk bilinçlendirilmelidir,
- DSİ tarafından Giresun, Rize, Trabzon, Gümüşhane ve Bayburt'ta toplam 125 dereye kurulan taşkın erken uyarı sistemi etkin bir şekilde kullanılmalı ve sürdürülebilirliği sağlanmalıdır,
- Uzaktan algılama teknikleri kullanılarak taşkın duyarlılık haritalamada kullanılan bazı faktörlere (örneğin taşkın envanteri, NDVI, arazi örtüsü/kullanımı gibi) ait güncel ve doğru verilerin üretilmesi sağlanmalıdır,
- Web of Science ve Scopus gibi veri tabanlarında tarama yapılarak, son 10-15 yılda taşkın duyarlılık haritalama konusunda yapılan çalışmalar ayrıntılı bir şekilde incelenmeli, taşkın duyarlılık haritalamada kullanılan faktörler ve yöntemler analiz edilmelidir,
- Özelde Dereli ilçesi genelde de Giresun ilinde önceki yıllarda yaşanan taşkınlarla ilgili güvenilir taşkın envanter verileri oluşturulmalı, makine öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmaları ile doğruluğu yüksek taşkın duyarlılık haritalarının üretilmesi sağlanmalıdır.
- Taşkın duyarlılık haritalarının üretilmesi aşamasında güncel ve doğru verilere ulaşmak, haritaların doğruluğunu sağlamak açısından oldukça önemlidir. Ancak, kurumlar arası koordinasyon ve işbirliği eksikliği veri paylaşımını kısıtlamakta ve özellikle bilimsel çalışmalar için engel oluşturmaktadır. Bu nedenle, Türkiye Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemi (TUCBS) tam fonksiyonel olarak bir an önce devreye alınmalı, özellikle Üniversitelerin Doğal Afet Araştırma Merkezlerinin bu sisteme erişimi sağlanarak deprem, heyelan ve taşkın/sel afetlerine yönelik bilimsel araştırmalar ve çalışmalar için ihtiyaç duyulan konumsal verilere erişim sağlanmalıdır.

Teşekkür

Bu çalışma, birinci yazarın makale ile aynı isimli yüksek lisans tez çalışmasından üretilmiştir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar, çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Kaynaklar

Akay, A.E. & Şahin, H. (2019). Forest Fire Risk Mapping by using GIS Techniques and AHP Method: A Case Study in Bodrum (Turkey). *European Journal of Forest Engineering*, 5(1), 25-35.

Akıncı, H., Yavuz Özalp, A. & Turgut, B. (2013). Agricultural land use suitability analysis using GIS and AHP technique. *Computers and Electronics in Agriculture*, 97, 71–82.

Akıncı, H., Yavuz Özalp, A. & Temuçin Kılıçer, S. (2015). Coğrafi Bilgi Sistemleri ve AHP Yöntemi Kullanılarak Planlı Alanlarda Heyelan Duyarlılığının Değerlendirilmesi: Artvin Örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 1(1-2), 40-53.

Akıncı, H. & Demirarslan, K.O. (2022). Site Selection for Municipal Solid Waste Landfill: Case Study of Artvin, Turkey. *Environmental & Engineering Geoscience*, 28(3), 293–310.

Apaydın, A. (2021). 22 Ağustos 2020 Tarihli Taşkına Neden Olan Dereli Deresi (Giresun) Havza Analizleri, Taşkın Nedenleri ve Sonuçları. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 11(2), 392-425.

Aydın, M.C. & Birincioğlu, E.S. (2022). Flood risk analysis using GIS-based analytical hierarchy process: a case study of Bitlis Province. *Applied Water Science*, 12(6), 122. doi:10.1007/s13201-022-01655-x

CRED, (2022). 2021 Disasters in numbers. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED). Retrieved from https://cred.be/sites/default/files/2021_EMDAT_report.pdf.

Das, S. (2020). Flood susceptibility mapping of the Western Ghat coastal belt using multi-source geospatial data and analytical hierarchy process (AHP). *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20, 100379. doi:10.1016/j.rsase.2020.100379

Edamo, M.L., Ukumo, T.Y., Lohani, T.K., Ayana, M.T., Ayele, M.A., Mada, Z.M. & Abdi, D.M. (2022). A comparative assessment of multi-criteria decision-making analysis and machine learning methods for flood susceptibility mapping and socio-economic impacts on flood risk in Abela-Abaya floodplain of Ethiopia. *Environmental Challenges*, 9, 100629. doi:10.1016/j.envc.2022.100629

Ergünay, O. (2007). Türkiye'nin afet profili, TMMOB Afet Sempozyumu, İMO Kongre ve Kültür Merkezi, Ankara, Türkiye, s.1-14.

Fatah, K.K., Mustafa, Y.T. & Hassan, I.O. (2022). Flood Susceptibility Mapping Using an Analytic Hierarchy Process Model Based on Remote Sensing and GIS Approaches in Akre District, Kurdistan Region, Iraq. *Iraqi Geological Journal*, 55(2C), 121-149.

Gerger, R. & Tanrıverdi, M. (2018). Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) Tabanlı Çok Ölçütlü Karar Analizi İle Şanlıurfa İl Merkezinin Taşkın Alanlarının Belirlenmesi, VII. Uzaktan Algılama-CBS Sempozyumu (UZAL-CBS 2018), Eskişehir, Türkiye.

Girayhan, T.F. (2015). Nicel Taşkın Risk Değerlendirmesiyle Hasar Modellemesi ve Metodolojinin Geliştirilmesi, Uzmanlık Tezi, T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Ankara, Türkiye.

Habibi, A., Delavar, M.R., Sadeghian, M.S. & Nazari, B. (2022). Flood Susceptibility Mapping and Assessment Using Regularized Random Forest and Naïve Bayes Algorithms. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, X-4/W1-2022, 241–248.

Hong, H., Tsangaratos, P., Ilia, I., Liu, J., Zhu, A-X. & Chen, W. (2018). Application of fuzzy weight of evidence and data mining techniques in construction of flood susceptibility map of Poyang County, China. *Science of the Total Environment*, 625, 575–588.

Kavzoglu, T., Sahin, E.K. & Colkesen, I. (2014). Landslide susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis, support vector machines, and logistic regression. *Landslides*, 11, 425–439.

Kaymaz, H. (2019). Dereli İlçe Merkezi'nin Coğrafyası, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Erzurum, Türkiye.

Kazemi, H. & Akinci, H. (2018). A land use suitability model for rainfed farming by Multi-criteria Decision making Analysis (MCDA) and Geographic Information System (GIS). *Ecological Engineering*, 116, 1–6. doi:10.1016/j.ecoleng.2018.02.021

MGM, (2023, Haziran 26). İllerimize Ait Genel İstatistik Verileri, Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM), <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=GIRESUN>

Msabi, M.M. & Makonyo, M. (2021). Flood susceptibility mapping using GIS and multi-criteria decision analysis: A case of Dodoma region, central Tanzania. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 21, 100445. doi:10.1016/j.rsase.2020.100445

- Mudashiru, R.B., Sabtu, N., Abdullah, R., Saleh, A. & Abustan, I. (2022). Optimality of flood influencing factors for flood hazard mapping: An evaluation of two multi-criteria decision-making methods. *Journal of Hydrology*, 612(Part A), 128055. doi:10.1016/j.jhydrol.2022.128055
- Nachappa, T.G., Piralilou, S.T., Gholamnia, K., Ghorbanzadeh, O., Rahmati, O. & Blaschke, T. (2020). Flood susceptibility mapping with machine learning, multi-criteria decision analysis and ensemble using Dempster Shafer Theory. *Journal of Hydrology*, 590, 125275. doi:10.1016/j.jhydrol.2020.125275
- Negese, A., Worku, D., Shitaye, A. & Getnet, H. (2022). Potential flood-prone area identification and mapping using GIS-based multi-criteria decision- making and analytical hierarchy process in Dega Damot district, northwestern Ethiopia. *Applied Water Science*, 12, 255. doi:10.1007/s13201-022-01772-7
- Nsangou, D., Kpoumié, A., Mfonka, Z., Ngouh, A.N., Fossi, D.H., Jourdan, C., Mbele, H.Z., Moucherou, O.F., Vandervaere, J-P. & Ngoupayou, J.R.N. (2022). Urban flood susceptibility modelling using AHP and GIS approach: case of the Mfoundi watershed at Yaoundé in the South-Cameroon plateau. *Scientific African*, 15, e01043. doi:10.1016/j.sciaf.2021.e01043
- Ocak, F. & Bahadır, M. (2020). Örnek Taşkın Risk Modeli Oluşturulması ve Ünye Şehrindeki Derelere Ait Taşkın Risk Analizleri. *The Journal of Academic Social Science Studies*, 13(80), 499-524.
- Ouma, Y.O. & Omai, L. (2023). Flood Susceptibility Mapping Using Image-Based 2D-CNN Deep Learning: Overview and Case Study Application Using Multiparametric Spatial Data in Data-Scarce Urban Environments. *International Journal of Intelligent Systems*, 2023, 5672401. doi:10.1155/2023/5672401
- Özay, B. (2021). Coğrafi Bilgi Sistemleri Tabanlı Taşkın Duyarlılık Analizi; Mersin İli Örneği, Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin, Türkiye.
- Özay, B. & Orhan, O. (2021). Using analytical hierarchy process (AHP) for flood susceptibility mapping of Mersin, Turkey, *2nd Intercontinental Geoinformation Days*, 5-6 Mayıs 2021, Mersin, Türkiye, s.167-170.
- Özcan, O. (2008). Sakarya Nehri Alt Havzası'nın Taşkın Risk Analizinin Uzaktan Algılama ve CBS İle Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Bilişim Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Öztürk, D. & Batuk, F. (2007). Çok Sayıda Kriter ile Karar Vermede Kriter Ağırlıkları. *Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 25(1): 86-98.
- Penki, R., Basina, S.S. & Tanniru, S.R. (2022). Application of geographical information system-based analytical hierarchy process modeling for flood susceptibility mapping of Krishna District in Andhra Pradesh. *Environmental Science and Pollution Research*, doi: 10.1007/s11356-022-22924-x.
- Saaty, T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill Comp., New York, U.S.A.
- Saaty, R.W. (1987). The Analytic Hierarchy Process – What it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3-5), 161-176.
- Santangelo, N., Santo, A., Di Crescenzo, G., Foscari, G., Liuzza, V., Sciarrotta, S. & Scorpio, V. (2011). Flood susceptibility assessment in a highly urbanized alluvial fan: the case study of Sala Consilina (southern Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 2765–2780.
- Sari, F. (2021). Forest fire susceptibility mapping via multi-criteria decision analysis techniques for Mugla, Turkey: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *Forest Ecology and Management*, 480, 118644. doi:10.1016/j.foreco.2020.118644

Sivrikaya, F. & Küçük, Ö. (2022). Modeling forest fire risk based on GIS-based analytical hierarchy process and statistical analysis in Mediterranean region. *Ecological Informatics*, 68, 101537. doi:10.1016/j.ecoinf.2021.101537

Sözer, B., Kocaman, S., Nefeslioğlu, H. A., Fırat, O. & Gökçeoğlu, C. (2019). Değiştirilmiş AHP (M-AHP) Yöntemi Kullanılarak Ankara İçin Taşkın Duyarlılık Haritası Üretimi. *Harita Dergisi*, 162, 12-24.

Selçuk, Ö., Selçuk, A. & Kasapoğlu, D. (2016). Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) Tabanlı Çok Kriterli Karar Analizi (ÇKKA) Kullanılarak, Van İli Merkez İlçelerinin Kentsel Taşkın Duyarlılık Değerlendirmesi, Van/Türkiye. *Yerbilimleri*, 37(1), 1-18.

Şengün, M.T., Karadeniz, E. & Şaman, B. (2019). Tavşanlı Deresinde (Sivas-Hafik) Taşkın Risk Analizi, 1. *İstanbul Uluslararası Coğrafya Kongresi*, 20-22 Haziran 2019, İstanbul, Türkiye, s.653-668.

Tang, Z., Zhang, H., Yi, S. & Xiao, Y. (2018). Assessment of flood susceptible areas using spatially explicit, probabilistic multi-criteria decision analysis. *Journal of Hydrology*, 558, 144–158.

Tang, X., Li, J., Liu, M., Liu, W. & Hong, H. (2020). Flood susceptibility assessment based on a novel random Naïve Bayes method: A comparison between different factor discretization methods. *Catena*, 190, 105436. doi:10.1016/j.catena.2020.104536

Tanrıverdi, M. (2019). Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) Tabanlı Çok Ölçütlü Karar Analizi İle Şanlıurfa İl Merkezi'nin Taşkın Alanlarının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa, Türkiye.

T.C. Resmi Gazete, (2020). 2944 Sayılı Cumhurbaşkanı Kararı (31239), 09.09.2020.

Tehrany, M.S., Pradhan, B. & Jebur, M.N. (2013). Spatial prediction of flood susceptible areas using rule based decision tree (DT) and a novel ensemble bivariate and multivariate statistical models in GIS. *Journal of Hydrology*, 504, 69–79.

Tehrany, M.S., Pradhan, B., Mansor, S. & Ahmad, N. (2015). Flood susceptibility assessment using GIS-based support vector machine model with different kernel types. *Catena*, 125, 91–101.

Termeh, S.V.R., Kornejady, A., Pourghasemi, H.R. & Keesstra, S. (2018). Flood susceptibility mapping using novel ensembles of adaptive neuro fuzzy inference system and metaheuristic algorithms. *Science of the Total Environment*, 615, 438–451.

TÜİK, (2023, Haziran 26). Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları. Retrieved from <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Adrese-Dayali-Nufus-Kayit-Sistemi-Sonuclari-2022-49685>

Tüzgen, G.A. & Karaca, Ö. (2021). Çerçi ve Murt Deresi (Fethiye-Muğla) Taşkın Duyarlılık Alanlarının CBS İle Çok Kriterli Karar Verme Analizi Kullanılarak Haritalanması. *Yerbilimleri*, 42(1), 121-143.

URL-1, (2023). 2007/60/EC Sayılı Konsey ve Avrupa Parlamentosu Direktifi. Retrieved from https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/ab%20mevzuati/taskin_direktifi.pdf, 2 Haziran 2023.

URL-2, (2022). Türkiye Mülki İdare Sınırları. Retrieved from <https://www.harita.gov.tr/urun/turkiye-mulki-idare-sinirlari/232>, 19 Aralık 2022.

URL-3, (2022). CORINE Land Cover (CLC 2018). Retrieved from <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018>, 19 Aralık 2022.

URL-4, (2022) EU-Hydro - River Network Database. Retrieved from <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-hydro/eu-hydro-river-network-database>, 19 Aralık 2022.

URL-5, (2022). Historical climate data. Retrieved from <https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html>, 33 Aralık 2022.

URL-6, (2022). SPD Giresun Dereli taşkını için açıklama yaptı. Retrieved from <https://www.hidropolitikakademi.org/tr/detail/29539/spd-giresun-dereli-taskini-icin-aciklama-yapti>, 21 Nisan 2022.

URL-7, (2022). Dere yatağına tam 216 ev! Cumhurbaşkanı Erdoğan bugün vatandaşa teslim etti. Retrieved from <https://www.yenicaggazetesi.com.tr/giresunda-dere-yatagina-tam-216-ev-cumhurbaskani-recep-tayyip-erdogan-bugun-vatandasa-teslim-etti-504413h.htm>, 21 Nisan 2022.

URL-8, (2023). Ders almıyoruz: Dereli’de 15 kişinin öldüğü dere yatağına 216 konut. Retrieved from <https://www.sozcu.com.tr/2022/gundem/derelide-dere-yatagina-216-konut-6919353/>, 24 Haziran 2023.

URL-9, (2023). Selden sonra TOKİ: Dereli’de taşkın bölgesinde yapılaşma ısrarı. Retrieved from <https://gezegen24.com/dereli-taskin-bolgesinde-yapilasma/>, 24 Haziran 2023.

Vilasan, R.T. & Kapse, V.S. (2022). Evaluation of the prediction capability of AHP and F- AHP methods in flood susceptibility mapping of Ernakulam district (India). *Natural Hazards*, 112, 1767–1793.

Yılmaz, I. (2015). Çorum İli Taşkın Tehlikesinin Analitik Hiyerarşi Yöntemi Kullanılarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, Türkiye.

Zhao, G., Pang, B., Xu, Z., Peng, D. & Zuo, D. (2020). Urban flood susceptibility assessment based on convolutional neural networks. *Journal of Hydrology*, 590, 125235.

Araştırma Makalesi / Research Article

3 Boyutlu Yazıcı ile Üretilen Düşük Maliyetli Çift Sırtlı Horn Anten Tasarımı ve Üretimi

Ömer KASAR^{1*}

¹ Artvin Çoruh Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Artvin, TÜRKİYE
omerkasar@artvin.edu.tr

Received/Geliş: 27.09.2023

Accepted/Kabul: 10.11.2023

Özet: Eklemeli imalatın anten tasarımı üzerindeki olumlu etkileri, gelecekteki üretim süreçlerinde önemli bir rol oynayacaktır. Bu teknoloji, geleneksel üretim yöntemlerine göre daha hızlı ve verimli bir şekilde karmaşık anten yapılarının üretilmesini sağlayacaktır. Bu çalışma, eklemeli imalat kullanılarak tasarlanan çift sırtlı horn antenin performansını incelemektedir. Anten, elektromanyetik simülasyonlarla tasarlanmış, PLA malzemesi kullanılarak 3D yazıcı ile üretilmiş ve metalik sprey kaplama ile optimize edilmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, tasarlanan anten 2.65 GHz ile 5 GHz arasında çalışabilir. Anten, merkez frekansı olan 3.2 GHz'de maksimum -0.65 dB reel kazanç sahiptir. Ayrıca, yarı güç ışın genişliği (HPBW) 75° olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, çift sırtlı horn antenin kablosuz iletişim uygulamalarında başarıyla kullanılabilirliğini göstermektedir. 3D yazıcılarla anten üretim teknolojisi, karmaşık anten yapılarının daha hızlı ve verimli bir şekilde üretilmesine katkıda bulunacaktır. Sonuç olarak, bu çalışma, eklemeli imalatın anten tasarımı alanındaki önemini vurgulayarak gelecekteki kablosuz iletişim uygulamaları için umut verici bir perspektif sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: 3D Yazıcı, Horn anten, Metalik kaplama

A Low Cost 3D Printed Double Ridge Horn Antenna design And Fabrication

Abstract: The positive impacts of additive manufacturing on antenna design will play a significant role in future manufacturing processes. This technology will enable the faster and more efficient production of complex antenna structures compared to traditional manufacturing methods. This study investigates the performance of a dual-ridged horn antenna designed using additive manufacturing. The antenna was designed through electromagnetic simulations, fabricated using PLA material with a 3D printer, and optimized with metallic spray coating. According to the study results, the designed antenna can operate between 2.65 GHz and 5 GHz. It achieves a maximum real gain of -0.65 dB at its center frequency of 3.2 GHz. Additionally, the half-power beamwidth (HPBW) is determined to be 75°. These findings demonstrate the successful applicability of the dual-ridged horn antenna in wireless communication applications. The technology of antenna production using 3D printers will significantly contribute to the production of complex antenna structures. In conclusion, this study underscores the importance of additive manufacturing in antenna design, offering a promising perspective for future wireless communication applications.

Keywords: 3D Printer, Horn antenna, Metal plating

1. Giriş

Mühendislik, teknolojinin sürekli evrimiyle geleneksel üretim tekniklerini sürekli olarak yeniden tanımlamaktadır. Bu dönüşümün en önemli parçalarından biri 3D baskı olarak bilinen katmanlı üretim teknolojisidir. Bu yenilikçi teknoloji, tasarım, verimlilik ve gelir potansiyeli açısından endüstrilere benzeri görülmemiş fırsatlar sunmaktadır (Callister, 2005). Elektronik sektörü, özellikle mikrodalga frekanslarda test ekipmanlarının üretiminde katmanlı imalat yoluyla anten ve iletim hattı üretiminde büyük bir ilerleme kaydetmektedir. Özellikle istenilen boyutta tasarlanabilmesi, kazancının geleneksel yöntemlerdeki antenlerle eşdeğer olması, bant genişliğinin anten geometrisi ile yaralanabilir olması ve plastik malzemeden yapılmasına rağmen metalik yüzey oluşturularak

*: Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

elektromanyetik dalgaları alma ve iletme özelliği gibi 3D yazıcıların pek çok faydalarından bahsedilebilir (Genç vd., 2018). Bu ilerleme, mühendislik becerileriyle birleştiğinde mikrodalga iletişiminde önemli yenilikler getirmektedir (Kasar vd., 2020).

Geleneksel üretim yöntemlerinde, istenen yapıyı elde etmek için malzemeyi yontma işlemi kullanılırken, eklemeli imalat, tasarım verilerini kullanarak yapıyı katman katman oluşturur. Bu fark, mühendislere özgün geometrilerde tasarım yapma özgürlüğü sağlar. Katmanlı üretim ve anten teknolojisinin birleşmesi, geleneksel olmayan geometrilerde tasarlanmış ve optimize edilmiş antenlerin üretimini kolaylaştırır. Bu esneklik, anten özelliklerini ele alarak elektromanyetik modeli ve mikrodalga tekniğini kapsar.

Anten üretiminde eklemeli imalatın kullanılması, bazı zorlukları da beraberinde getirir. Tutarlı ve öngörülebilir anten performansı elde etmek, özellikle mikrodalga ve milimetre dalga frekanslarında malzeme seçimini dikkatle yapmayı gerektirir. Ayrıca, büyük ölçekli ve karmaşık antenlerin üretimi, verim ve hassasiyet arasında denge gerektirir. Baskı parametrelerinin optimize edilmesi, yüksek çözünürlüklü baskı elde etmek için önemlidir (Balanis, 2005).

Bu çalışma, üç boyutlu anten üretiminde eklemeli imalatın zorlukları ve fırsatları üzerine odaklanmıştır. Antenleri metal malzeme ile kaplama yöntemleri de incelenmiştir. Temel anten tasarımı ve parametreleri açıklanmış, 3D antenler ve baskı çalışmaları hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca, PLA ve ABS 3D baskılarında yaygın hataların belirlenmesi ve azaltılması üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar, anten baskı süreçlerini daha iyi anlamamıza ve geliştirmemize yardımcı olmaktadır.

2. Anten Tasarım Parametreleri

Antenler metal ve dolayısıyla iletken yüzeyleri ile elektromanyetik dalgaları alıp gönderebilen yapıdaki kablosuz ekipmanlardır. Eklemeli imalat ile üretilen antenler de tıpkı geleneksel antenler gibi temel anten parametrelerini sağlamalıdır. Bir antenin belirtilen bir frekansta çalışmasının en birincil ölçütü geri dönüş kaybının $|S_{11}| = 10$ dB sınırından fazla olmasıdır. Literatürde, anten uygulamalarında, bir anten için yeterli yansıma eşiği, Saçılma Parametrelerinden temel $|S_{11}|$, geri dönüş kaybı ile temsil eder. Burada referans sınır genellikle -10 dB olarak kabul edilir (Kumar ve Ray, 2002). Haberleşme sistemlerinde, frekansın bandının 10 dB'yi kestiği en düşük ve en yüksek kesişim frekansları arasında kalan aralığa 'Bant Genişliği' adı verilir. Bir başka ifade ile, bant genişliği, antenin $|S_{11}| \geq 10$ dB koşulunu sağladığı aralığa denir (Pozar, 2006).

Bir diğer önemli anten parametresi de anten yönlü kazancıdır. Kazanç G (Gain) anten yönlülüğü ile direkt ilişkilidir. Bir antenin yönlü kazancı; bir yönde ışıma şiddetin, tüm yönlerde yaptığı toplam ışıma şiddetine bölünmesi ile elde edilir. Antenin kazancı (1)'de gösterilmiştir Denklem (2)'de verildiği gibi, yönlü anten kazancı; ışıma verimliliği ile verilen yöndeki anten yönlülüğünün çarpımına eşittir (Balanis, 2005). Anten kazancı genellikle logaritmik (dB) şekilde ifade edilir. Matematiksel olarak lineer çarpım, logaritmada toplama işlemi olarak ifade edildiğinden, burada dB cinsinden büyüklükler toplanmıştır (Kasar, 2015).

$$G(\theta, \phi) = e_{cd} \left[4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \right] \quad (1)$$

$$G(\theta, \phi)(dB) = e_{cd}(dB) + D(\theta, \phi)(dB) \quad (2)$$

Burada $G(\theta, \phi)$; θ ve ϕ açılara bağlı bir yöndeki kazancı göstermektedir. e_{cd} , ışıma verimliliğini, $D(\theta, \phi)$ de yine θ ve ϕ açılara bağlı bir yöndeki yönlülüğü temsil etmektedir (Oliner vd., 2007).

Eklemeli imalat olarak da bilinen 3D baskı alanı, çeşitli endüstrilerde nesnelere üretme biçimimizde çok büyük ilerleme kaydedilmesine olanak sağlamıştır. Baskılarda yaygın olarak kullanılan Polilaktik Asit (PLA) ve Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) en popüler seçeneklerden ikisidir (Tayyab vd., 2017).

Endüstride FDM tarzı olarak bilinen 3D yazıcıların baskı malzemeleri genellikle bu ABS ve PLA malzemeleri kullanmaktadır. Yazıcılar, plastiği eriterek, çizim programından yüklenen dosyadan aldığı bilgi ile; x, y ve z konumlarına göre eritilmiş malzemeyi tablaya ittirirler. Yazıcının ucundan çıkan plastik de anında donarak katlaşır ve şekil alır. Böylelikle katmanlar yükseldikçe çizim programındaki şekil ortaya çıkar.

Bahsedilen termoplastik polimerler kullanım kolaylığı, dayanıklılık ve baskı kalitesi arasında bir denge sunar. Bununla birlikte, herhangi bir üretim sürecinde olduğu gibi, PLA ve ABS malzemelerinin kullanıldığı 3D baskı da kusurlar da meydana gelebilmektedir. Bu kusurlar kısaca şöyle özetlenebilir:

- Katman Yapışma Sorunları,
- Çekme ve Sızma,
- Çıkıntı ve Köprüleme Sorunları,
- Katman Yanlış Hizalama ve Kaydırma.

Yukarıda bahsedilen sorunlar 3D yazıcılardaki baskı kalitesine ve prototiplemeye doğrudan etki eden problemlerdir.

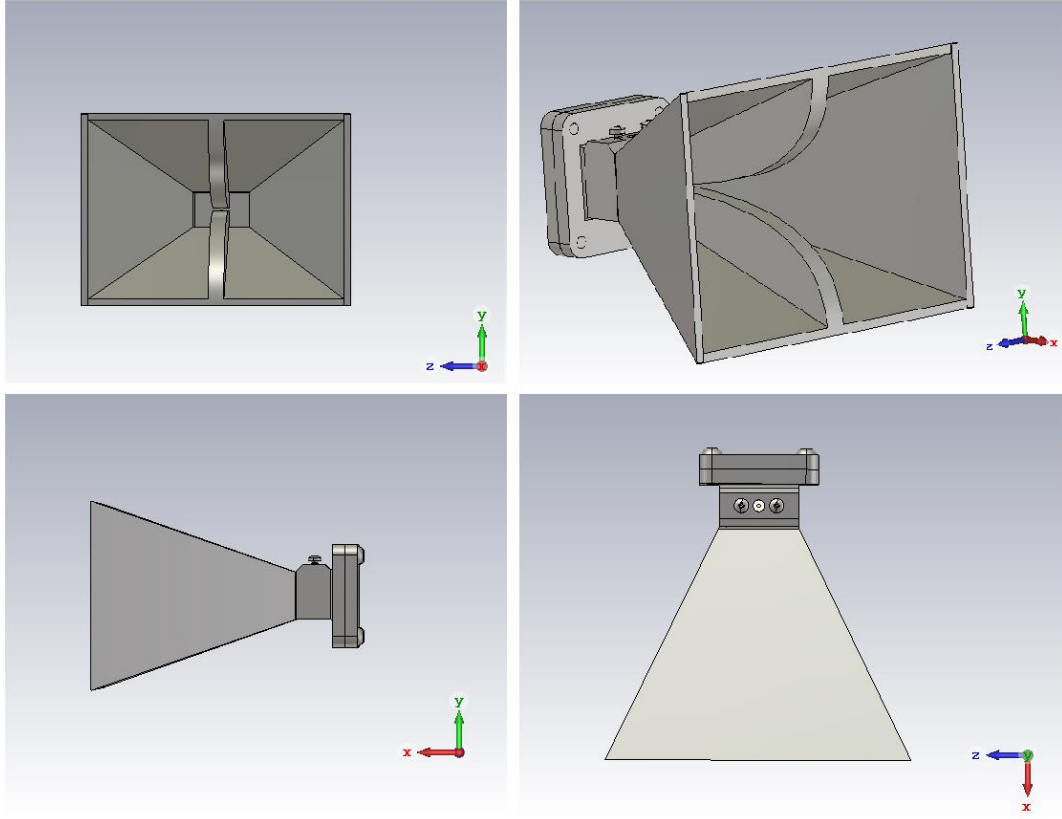
Bu çalışmanın konusu, 3D yazıcılarla gerçekleştirilen bir antenin baskı kalitesi ve kaplamasının niteliğidir. 3D yazıcıda üretilen bir antenin metal kaplama gereksinimi bulunmaktadır. Öyle ki bu kaplamanın kalınlığı, antenin çalıştığı frekanslarda, elektromanyetik olarak derinliğinin (skin dept) altında kalmamalıdır. Bu amaçla literatürde ve endüstriyel piyasada birkaç metal kaplama tekniği kullanılmaktadır. Bunlardan birkaçı: soğuk daldırma ve elektroliz, metalik sprey kaplama ve metal folyo ile kaplamadır. Bu çalışmada PLA ile üretilen anten metalik sprey ile kaplanarak iletken yüzey oluşturulmuştur. Tasarlanan 'Çift Sırtlı Horn Anten', 3D elektromanyetik simülasyon programı olan CST MWS Studio ile gerçekleştirilmiştir. Ardından metal kaplanmış ve SMA konektör bağlantısı yapılarak ölçülmüştür.

3. Çift Sırtlı Horn Anten Tasarımı

Horn antenler yapılarındaki genişleyen ağız sayesinde büyük bant genişliğine sahip antenlerdir. Bu çalışmamızda kullanılan çift sırt yapısı da, antenin iç kısmında en dar boğaz kısmının çevresini uzatılması amaçlanmıştır. Böylece çalışma frekansına göre daha küçük bir anten yapısı elde edilmiştir. Böyle yapılara elektriksel küçük antenler denilmektedir.

Anten tasarım boyutları olarak dış ağızı 100x70 mm² anten yüksekliği de 110 mm olarak tasarlanmıştır. Horn antenin geniş tarafını ortalamayan iki sırt yapısının kalınlığı da 5 mm'dir. Antenin arka tarafı 50x50 mm olacak şekilde dalga kılavuzu benzeri bir yapıda tasarlanmıştır. Anten tasarımında (Majumdar B. ve arkadaşları (2016)) çalışmasının tasarımına benzer bir yapı gözönüne alınmış olmasına rağmen önerilen tasarımın söz konusu antenden farkı rezonans frekansları ve konektör bağlantısının farklı yapılmış olmasıdır. Çift Sırtlı Horn Anten Tasarımı Şekil 1'de önden, perspektiften, yandan, ve üstten görünüşleri verilmiştir. Simülasyon programında tasarlanan horn anten, PLA filament ile yazıcıda basılmıştır. Horn anten tasarımını 3D yazıcının anlayacağı boyutlara

getirmek için baskı öncesi çeşitli ayarlamalar yapılmıştır. Bu antenlerin tamamı için katman kalınlığı 0.20 mm, duvar kalınlığı da 2 mm seçilmiştir. Yapının iç doluluk oranı da minimum %60 olacak şekilde baskılar oluşturulmuştur.



Şekil 1. Çift sırtlı horn anten tasarımının (sırasıyla) önden, perspektiften, yandan, ve üstten görüşleri

Antenin PLA malzemesi üzerine (sadece içe bakan yönüne) metal kaplama işlemi yapılmıştır. Antenin iç kısmı metalik spreyle boyanmıştır. Boyama işlemi birkaç kat uygulanmıştır. Sonuçta antenin iç kısmında yüksek iletkenlik elde edilmiştir.

Antenin dış kısmı kırmızı akrilik spreyle boyanmıştır. Bu boyama işleminin antenin iletkenliğine bir zararı olmamıştır. Belirtilmesi gereken ikinci nokta da konnektörün toprak (ground) kısmının iç metal kısım ile olan bağlantısı ince bir tel yardımıyla sağlanmıştır. Şekil 3'de 3D Basılan Çift Sırtlı Horn Anten Perspektif, üstten ve önden görünümü gösterilmiştir.

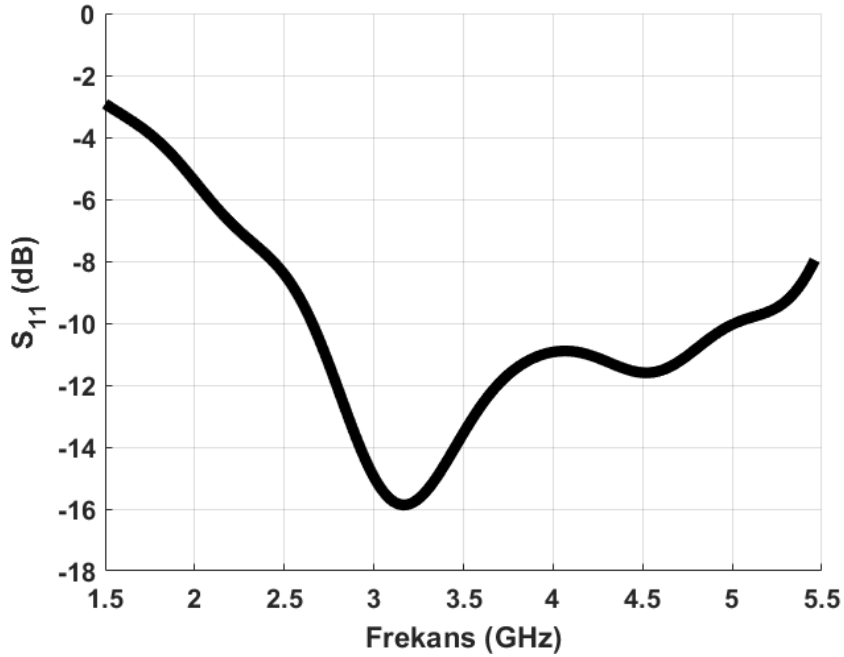


Şekil 2. Çift sırtlı horn anten perspektif, üstten ve önden görünümü

Çift sırtlı horn antenin veri alış kısmının yapısı SMA konnektörle bağlanmıştır. Bu antenlerin yapısı gereği konnektörün toprak ucu (ground) dış kısımdan temasla antenin her tarafında kısa devredir. Konnektörün canlı ucu ise diğer konnektör olmayan sırta içeriden kısa devre edilmiştir. Böylece rezonans tüm antenin boyutu ile orantılı olacaktır ve antenin bant genişliği biraz daha yükselebilecektir.

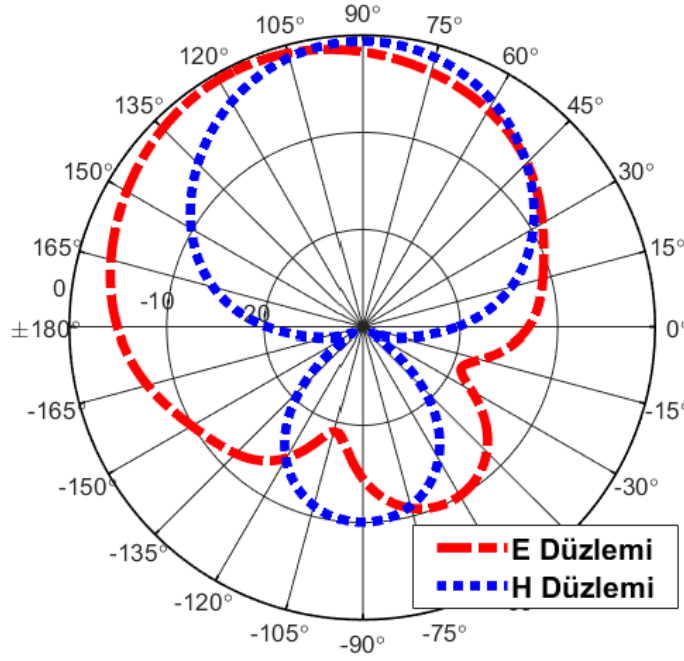
4. Bulgular

PLA anten olarak tasarlanan ve metalik spreyl boya ile kaplanan antenin cihaz üzerinden alınan S_{11} bilgisinin MATLAB programında işlenerek elde edilen geri dönüş kaybı-frekans grafiği de Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekle göre antenin -10 dB'yi kestiği alt ve üst kesim frekansları sırasıyla 2.65 GHz ile 5 GHz arasındadır.



Şekil 3. Çift sırtlı horn antenin geri dönüş kaybı-frekans grafiği

3 boyutlu, PLA baskılı ve metalik spreyl kaplamalı çift sırtlı horn anten merkez frekansı olan $f_m = 3.2$ GHz rezonansında kazanç ışınma örüntüsü grafiği Şekil 4'te çizdirilmiştir. Grafiğe göre antenin maksimum reel kazancı -0.65 dB olarak gerçekleşmiştir. Anten yarı güç değerlerini kesiştiği açı değerleri 55° ile 130° arasındadır. Böylelikle f_m frekansında yarı güç ışınma genişliği (HPBW) 75° olarak hesaplanabilir.



Şekil 4. Rezonans frekansında kazanç ışıma örüntüsü grafiği

5. Değerlendirme

Bu çalışmada eklemeli imalat ile çift sırtlı horn anten tasarımı yapılmıştır. Elektromanyetik olarak simülasyon programında tasarlanan anten 3D yazıcı ile PLA malzemeden üretilmiş ve metalik sprej ile metal kaplanmıştır. Tasarlanan anten sırasıyla 2.65 GHz ile 5 GHz arasında çalışmaktadır. Antenin merkez frekansı olan $f_m = 3.2$ GHz rezonansında maksimum reel kazancı -0.65 dB ve yarı güç ışıma genişliği (HPBW) de 75° olarak gerçekleşmiştir. Önerilen çift sırtlı horn antenin, uygun çalışma koşulları altında ve performans gerekliliklerine göre pek çok kablosuz haberleşme uygulamasında kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmanın elde ettiği bilimsel sonuçlar ve ilerlemeler, "AÇÜ-BAP-2022.F14.02.01" proje numarasıyla desteklenen Artvin Çoruh Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından finanse edilmiştir. Yazar, Artvin Çoruh Üniversitesi'ne olan teşekkürlerini ve minnetlerini ifade etmektedir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Kaynaklar

Balanis, C. A. (2005). Antenna Theory, Analysis and Design (third edition.). Wiley. 047166782X.

Callister, W. D. (2005). Fundamentals of Materials Science and Engineering , Wiley ,(second edition., Vol. 471660817). London.

Genc, A., Basyigit, I. B., Colak, B., & Helhel, S. (2018). Investigation of the characteristics of low-cost and lightweight horn array antennas with novel monolithic waveguide feeding networks. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 89, 15-23. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2018.03.024>.

Kasar, Ö. (2020). Determining the water level in pvc water pipes with micro-strip dipole antennas. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(4), 1165-1169.

Kasar, Ö., Geçin, M., & Gözel, MA. (2021). Design and implementation of a 3D printed rf power transceiver clamp to measure the water level in pvc water pipes. *Int J RF Microw Comput Aided Eng.*, 31:e22644.,<https://doi.org/10.1002/mmce.22644>.

Kasar, Ö. (2015). Dikdörtgen ve Dairesel Yama Antenler Üzerinde Reel Empedans Uyumlandırma Tekniklerinin Nümerik ve Deneysel Yöntemlerle İncelenmesi, Suleyman Demirel Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Isparta.

Majumdar, B., Baer, D., Chakraborty, S., Esselle, K.P. and Heimlich, M. (2016), Advantages and limitations of 3D printing a dual-ridged horn antenna. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 58, 2110-2117. <https://doi.org/10.1002/mop.30026>

Oliner, A.A., Jackson, D.R., & Volakis, J. (2007). *Antenna Engineering Handbook*, McGraw Hill.

Pozar, D. M. (1998). *Microwave Engineering*, Wiley, (second edition.),NY,ABD.

Tayyab, M., Sharawi, M. S., & Al-Sarkhi, A. (2017). A radio frequency sensor array for dielectric constant estimation of multiphase oil flow in pipelines. *IEEE Sensors Journal*, 17(18), 5900-5907.

Araştırma Makalesi / Research Article

Askeri Uygulamalarda Kullanılan Güç Dönüştürücüleri için Elektromanyetik Girişim Filtresi Tasarımı

Mehmet ÖZDEMİR¹ , Necmi ALTIN^{2*} 

¹ Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Teknikokullar, Ankara, TÜRKİYE

² Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara, TÜRKİYE
mehmetozdemir6127@gmail.com, naltin@gazi.edu.tr

Received/Geliş Tarihi: 26.10.2023

Accepted/Kabul Tarihi: 06.12.2023

Özet: Askeri uygulamalarda farklı gerilim ve güç seviyelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaçlar sistem içerisinde çok sayıda ve farklı topolojide AA/DA ve DA/DA dönüştürücü kullanımı gerektirmektedir. Askeri amaçlı hava/kara araçlarında kullanılan güç dönüştürücülerinin genellikle küçük hacim ve düşük ağırlık gibi özelliklere sahip olması büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle güç elektroniği dönüştürücülerinin anahtarlama frekansları gittikçe yükselmektedir. Dönüştürücülerin anahtarlama frekanslarının yükselmesi elektromanyetik gürültü seviyesinin artmasına sebep olmaktadır. Gürültü seviyesinin yükselmesi aynı kaynaktan beslenen veya yakınındaki cihazların çalışmasını olumsuz etkilemektedir bu nedenle "MIL-STD-461" askeri standardı oluşturulmuştur. Herhangi bir askeri kara/hava aracı için yapılacak dönüştürücünün ilgili standarda uyması gerekmektedir. Bu çalışmada askeri bir birim için tasarlanan AA/DA dönüştürücü "MIL-STD-461F" CE102 gereksinimi karşılayabilmesi için bir filtre tasarımı ve gerçekleştirilmesi anlatılmıştır. Yapılan testler sonucunda tasarlanan filtrenin standartlarda belirtilen şartları karşıladığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: AA/DA dönüştürücü, Elektromanyetik girişim, Ortak mod gürültüsü, Fark mod gürültüsü, DA/DA dönüştürücü

Electromagnetic Interference Filter Design for Power Converts Used in Military Applications

Abstract: Different voltage and power levels are needed in military applications. These needs require the use of AC/DC and DC/DC converters in many different topologies in a system. It is generally important for the power converters used in military air/land vehicles to have features such as small volume and low weight. Therefore, the switching frequencies of power electronic converters are increasing. Increasing the switching frequencies of converters causes the electromagnetic noise level to increase. The increase in the noise level negatively affects the operation of devices supplied from the same source or nearby, so the "MIL-STD-461" military standard was created. The converter to be design for any military land/air vehicle must comply with the relevant standard. In this study, the design and implementation of a filter to meet the "MIL-STD-461F" CE102 requirement for an AA/DA converter designed for a military unit is described. Obtained test results showed that the designed filter met the conditions specified in the standards.

Keywords: AC/DC converter, Electromagnetic interference, Common mode noise, Differential mode noise, DC/DC converter

1. Giriş

Elektromanyetik uyumluluk (Electromagnetic compatibility, EMC) güç elektroniği çalışmalarında geçmişten günümüze kadar sonucu belirsiz yaklaşımlar olarak kabul edilmektedir (Tihany, 1995; Ott, 1998). Gelişen teknoloji ile birlikte Elektromanyetik girişim (Electromagnetic interference, EMI) kaynakları ve yayılımına ilişkin giderek daha fazla matematiksel modelleme ve analiz çalışması yapılmış ve EMI üretim mekanizmasının daha iyi anlaşılmasına ışık tutmuştur (Çadircı vd., 2005;

Zhang vd., 2017; Nawawi vd., 2017). Herhangi bir sistem üzerinde çalışan bir güç elektroniği cihazının EMI kaynağı gibi çalışması istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle güç elektroniği tasarımı açısından iletilen EMI modelleme ve simülasyon çalışması en çok arzu edilen durumdur. Bu modelleme sadece temel elektrik devresi davranışını değil aynı zamanda güç dönüştürücü içindeki karmaşık EMI üretim mekanizmasını da ele almak zorundadır.

EMI modelleme ve benzetim çalışması son yıllarda araştırmacıların önemli ölçüde ilgisini çekmiştir. Güç elektroniği alanındaki bir dizi çalışmada üç fazlı AA/ DA dönüştürücüler DA/DA dönüştürücüler ve AA motor sürücüler için çeşitli EMI modelleri önermiştir (Lai vd., 2002; Schanen vd., 2002; Chen, 2000; Mugur vd., 2001). Bir dönüştürücünün EMI seviyelerini azaltmak için kullanılan açık döngü kontrollü frekans modülasyon tekniklerin teorisi frekans modülasyonun bir sinyalin spektrumunu nasıl etkilediğini göstermek için fark denklemleri türetilmiş ve sunulmuştur (Balthasar, 1946). Farklı modülasyon tekniklerinin dönüştürücü EMI performansına etkileri de tartışılmıştır (Balcells vd., 2005; Santolaria vd., 2002; Lorenzo, 2004). Lorenzo (2004)'da bir dönüştürücünün hem ortak mod (Common mode, CM) hem de fark mod (Differential mode, DM) gürültüleri üzerinde olumlu bir etkiye sahip olmak için kapsamlı bir analizle modülasyon profillerinin nasıl olacağına dair araştırma yürütülmüştür. Filtre elemanlarının belirlenmesinde gürültüyü ayırma yönteminin sağladığı kolaylıklar Khun vd. (2007)'de görülmektedir. Gürültü ayırmak için literatürde genellikle gürültü ayırma cihaz kullanımı öne çıkmaktadır (Çadircı vd., 2005; Khun vd., 2007; Guo vd., 1995). Yalçın (2023)'da yapılan çalışmada gürültü ayırma için bir devre tasarımı ve üretimi yapılmış fakat ölçüm sonuçları ve devrenin parazitik etkisi gibi kavramlar incelenmemiştir. Kircher ve Pommerenke (2022)'de yapılan çalışmada ise makale kapsamında anlatılana benzer şekilde elemanların ESR ve ESL gibi ideal elemana eklenmesi gereken değerlerin ölçüm sonuçlarına etkisi incelenmiştir. Murugan vd. (2023)'de tasarlanan dönüştürücüde ise sadece kullanılan bileşenlerin değil aynı zamanda baskılı devre kartının ve kabloların etkileri de simülasyona eklenip ileri çalışmaları için referans niteliğinde bir çalışma yapılmıştır. Makale kapsamında yapılan ölçümlerde gürültüyü ayırmak için ölçüm devresinin farklı noktalarından alınan ölçümlerin matematiksel olarak ayrılması metodu kullanılmıştır.

Endüstride genel olarak kullanılan ölçüm cihazlarından alınan sonuçlarda ortaya çıkan gürültü grafiğinde ortak mod ve fark mod gürültüleri birleşik şekilde ölçülür. Bu grafik üzerinden gürültüleri kategorize etmek mümkün gözükmemektedir. Dolayısıyla elde edilen test sonuçlarına göre hangi filtre devresinde iyileştirme yapılmasının gerektiği de net değildir.

Bu çalışmada askeri taşıt uygulamaları için tasarlanan üç fazlı bir AA/ DA dönüştürücü için ortak ve fark mod filtreler tasarlanmıştır. Dönüştürücü üç fazlı kontrolsüz bir doğrultucu devresi ile tam köprü DA/DA dönüştürücü devresinden oluşmaktadır. Bu çalışma kapsamında benzetim programları kullanılarak gürültüleri ortak mod ve fark mod olarak ayrılacak ve filtreler gürültü özelinde tasarlanmıştır. Bu sayede filtre boyutu en uygun düzeyde tutulacak ve test maliyeti minimuma indirilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca tüm filtre tasarım süresi adım adım açıklanmış ve elde edilen sonuçlara göre tasarlanan filtrenin performansı benzetim sonuçları ile doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlar hem ortak mod hem de fark mod gürültülerinin askeri uygulamalar için geliştirilmiş olan MIL-STD-461F standardında belirtilen sınırların altına indirildiği gösterilmiştir.

2. Elektromanyetik Gürültü Tanımı

Elektrik-Elektronik ve Elektromekanik sistemlerin çalışırken ortaya çıkardıkları elektromanyetik enerji veya ortamda mevcut halde bulunan elektromanyetik enerji ile karşılıklı olarak birbirlerini etkilemeleri ve bu etkileme sonucunda sistemlerin çalışma performanslarında bozulma oluşması veya tamamen çalışamaz hale gelmeleri EMI olarak adlandırılır. Girişim, elektrik ve elektronik cihazların performansında bozulmaya, cihazların istenmeyen tepkiler vermesine veya hatalı çalışmasına yol

açan radyo frekanslarında doğal veya insan kaynaklı her türlü bozucu etki, işaret ve emisyonudur. EMI standartları oluşmasında geçmişte platform ve can kaybı oluşması en büyük etkenlerdendir örneğin: 1982 yılında Falkand savaşı sırasında İngiliz Sheffield destroyeri girişim sebebi ile Elektronik Destek tedbiri sistemini kapattı bu olay geminin atılan füzeyi algılamamasına e geminin batmasına ve mürettebattan kayıplar olmasına sebep oldu. Başka bir olayda ise 1980'li senelerde ABD ordusuna ait beş adet Black Hawk UH-60 modelli helikopter, etraftaki vericilerin uçuş kontrol sisteminde sebep olduğu girişim sonucunda farklı tarihlerde kazaya uğradı ve bu kazalarda 22 kişi hayatını kaybetmiştir.

EMI problemindeki ana sebepler basit olarak üç'e ayrılır bunlar; kaynak, kuplaj yolu ve etkilenen sistem olarak tanımlanabilir. Kaynak, elektromanyetik girişim enerjisini yayan bileşendir. Kuplaj yolu ise girişim enerjisinin iletimini açıklar. Etkilenen sistem ise bu girişim enerjisinden etkilenen sistemi tanımlar. Sistemler, girişim enerjisinden radyasyon yoluyla (Radiated emission, RE) ve elektriksel iletkenlik (Conducted emission, CE) yoluyla yayılım olmak üzere iki şekilde etkilenirler. Radyasyon yoluyla yayılım, uzak alan ve yakın alan olarak ikiye ayrılabilir ve yakın alandaki etkileşim kapasitif veya endüktif olabilir. Diğer kuplaj mekanizması olan elektriksel iletkenlik için çeşitli filtreler tasarlanarak değerinin sınırlandırılması mümkündür. Yayılım miktarı ulusal/uluslararası standartlar tarafından sınırlandırılmıştır. Bu nedenle sistemlerin tasarım aşamasında benzetim programları, uygulama aşamasında ise testler ile ilgili standartlara uygunluğu doğrulanmalıdır. Sistemleri bu standartlara uygun hale getirmek için ek önlemler ve özel filtre tasarımları gerekli olabilir. Bu filtrelerde kullanılacak devre elemanlarının bazı seçim kriterleri bu çalışmada açıklanacaktır.

2.1. Filtre Tipleri

EMI bastırmak için tasarlanan farklı filtre tipleri mevcuttur. Filtre tipi seçilirken 2 parametre göz önüne alınır:

a) Giriş-Çıkış Empedansları

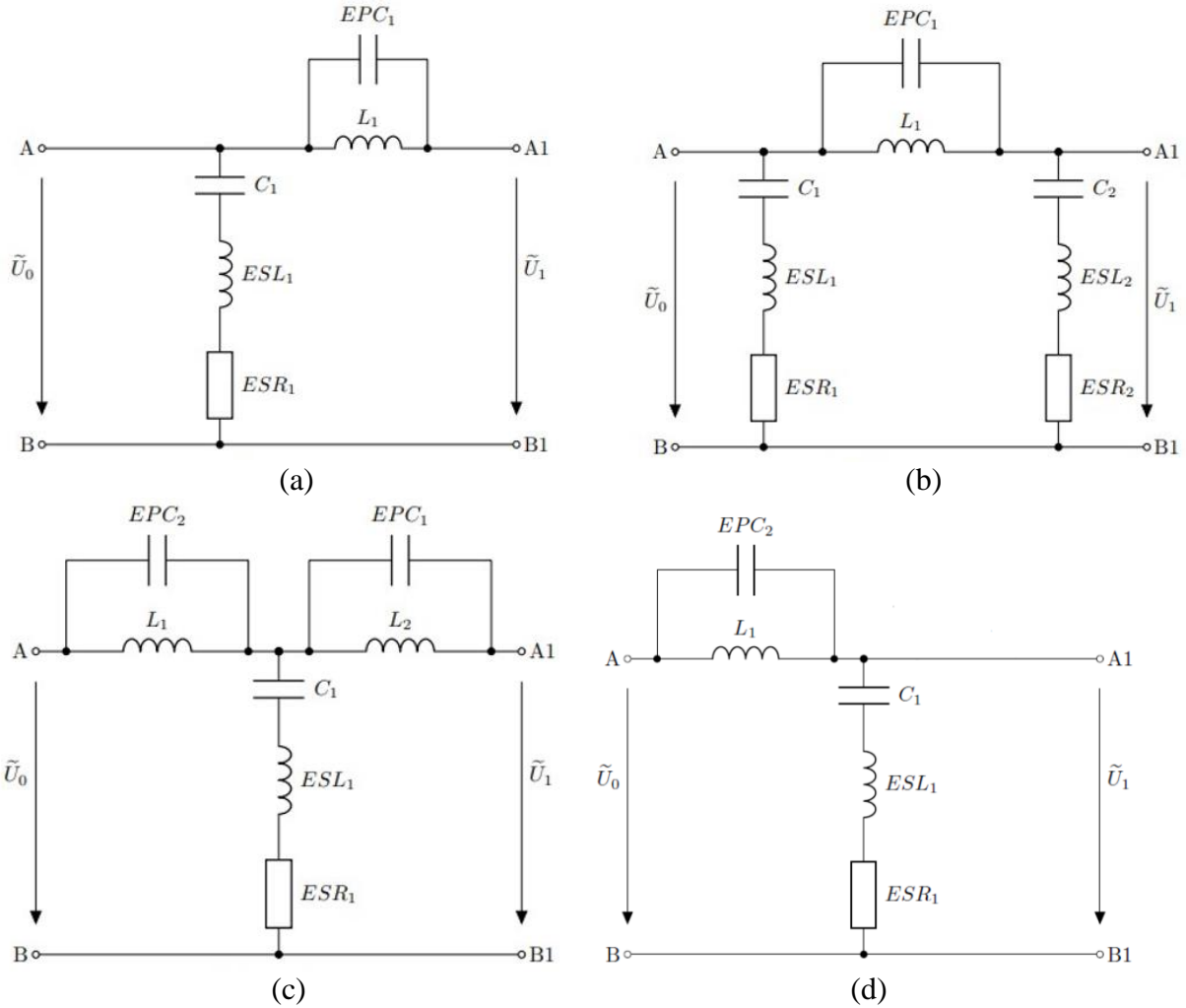
Gürültü frekansında filtre empedansı, şebeke çıkış ve devre giriş empedansı ile eşleşmelidir. Aksi takdirde hatta yansımalar meydana gelecek ve filtre istenilen bastırma etkisini gösteremeyecektir. Bu sebeple giriş ve çıkış empedansları ölçülmelidir. Filtre tipi seçilirken empedansı düşük taraf için bobin, empedansı yüksek taraf için kondansatör yerleştirilmelidir ($X < 100\Omega$ düşük empedans, $X > 100\Omega$ yüksek empedans olarak kabul edilebilir).

b) Bastırma seviyesi

Çok katlı/dereceli filtre tasarımları ile daha yüksek oranda bastırma sağlanabilir. Hedeflenen frekanstaki gürültüye göre filtre kat sayısı belirlenmelidir. İki katlı bir filtre ile 10/15 dBuV, 3 katlı bir filtre ile 20/25dBuV bastırma sağlanabilir.

Klasik devre teorisine göre dört farklı EMI filtresi topolojisi mevcuttur. Diğer tüm türler, bu temel topolojilerin kombinasyonlarını temsil eder. Topolojiler tipik olarak kapasite ve indikatörlerden oluşur, Yüksek güç kayıpları nedeniyle dirençler diğer elemanlara görece nadir kullanılır. Şekil 1'de görülen T filtre ve π filtre 60dB, Γ filtre ve L filtre ise 40dB zayıflatma etkisine sahiptir. Çok katlı filtrelerin zayıflatma değeri fazla olmasına karşın eleman sayısının daha fazla olması, özellikle 3 fazlı askeri sistemlerde sistemin hacimsel olarak büyümesine ve güç yoğunluğunun düşmesine sebep olduğu için daha çok boyut problemi olmayan endüstriyel tasarımlarda kullanımı yaygındır, bu ve benzeri sistemlerde sistemler de kullanılacak filtrenin yüksek zayıflatma etkisi genellikle iki katlı bir filtre olması istenir. Herhangi bir elektriksel sistemin EMI performansı genelde bilinemediği için iki katlı filtre yetebilecek çoğu uygulama yeterli benzetim çalışması yapılmadığı için güvenli bölgede kalmak amacıyla çok katlı filtre kullanımı yaygındır, Makale kapsamında yapılacak olan çalışmada

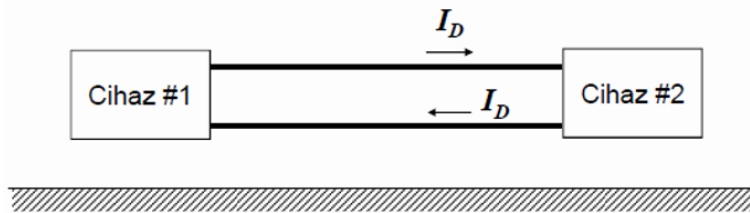
dönüştürücü devresinin gürültü grafiğine göre yerleştirilecek iki katlı filtrenin doğru hesaplanmasının çok katlı filtre kullanımına gerek bırakmadığını gösterebilmek amacıyla Şekil 1’de gösterilen L tipi filtrenin kullanımı uygun görülmüştür.



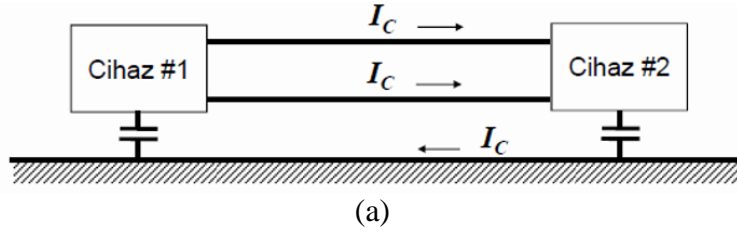
Şekil 1. Filtre tipleri a) Γ filtre, b) T filtre c) π filtre d) L filtre (elemanların parasitik bileşenleri de gösterilmiştir.)

3. Seçilen Filtre Tipleri ile Ortak Mod ve Fark Mod Gürültülerin Filtrenmesi

Elektriksel iletkenlik yoluyla iletilen gürültü fark ve ortak mod gürültüsü olarak ikiye ayrılır. Şekil 2 'de gösterildiği gibi, iki güç kaynağı hattında birbirine zıt yönlere fark mod gürültüsü iletilir. Ortak mod gürültüsü, ise tüm hatlarda aynı yönde iletilir.

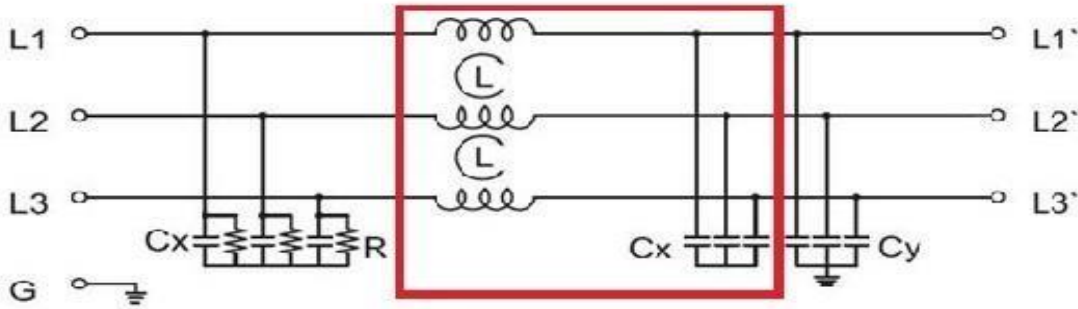


(a)



Şekil 2. (a) Fark modu gürültüsünün yayılımı, (b) Ortak mod gürültüsünün yayılımı

Üç fazlı bir sistem için fark modu gürültüsünü filtre etmek için kullanılacak filtre Şekil 3'te gösterildiği gibi sıklıkla kullanılan LC filtre ile aynıdır. Faz ve nötr arasına bağlanır. Fark mod gürültüleri filtrelenirken bobin, yüksek frekanslı akımlara karşı yüksek empedans, kondansatör ise düşük empedans gösterir. Bu sayede hatta akım dalgalanması gözükmez ve gürültü filtrelenmiş olur.



Şekil 3. Üç fazlı bir kaynak için fark mod filtre örneği

Ortak mod filtre ise yine LC filtre olarak kullanılır fakat bobin hem faza hem nötre kuplaj yapılarak yerleştirilir. Bu sayede filtre fark akıma karşı empedans göstermezken, ortak mod akımlara karşı yüksek empedans gösterir ve yine akım dalgalanmaları toprağa bağlı kondansatörler ile toprağa çekilir.

4. Filtre Tasarımı

Filtre değerleri hesaplanırken hangi frekansta filtreleme yapılacağı ve ne oranda bastırma yapılacağı belirlenmesi gereklidir. Hızlı Fourier dönüşümü (Fast Fourier Transform, FFT) grafiğinde genelde ilk anahtarlama frekansı ve ilk harmoniklerde yüksek gürültüler görülür. Limit üstünde kalan noktalar göz önüne alınır. Genelde test başlangıç değeri ile anahtarlama frekansının iki katı arasında frekanslar filtreleme frekansı olarak seçilir. FFT grafiği ile "MIL-STD-461F" standardından gelen limit değerler karşılaştırılır. Filtreleme frekansındaki gürültü seviyesinin hangi seviyeye inmesi gerektiği hesaplanır ve limit altında kalmayı garantilemek için bu değer üzerine 3-6 dBuV değerinde bir pay eklenir.

Bir filtrede kazanç değerinin 3dB yani 0.707 katına indiği frekansa köşe frekansı denir. Bu frekansın seçimi filtre için önem arz eder ve aşağıdaki formül üzerinden hesaplanır.

$$F_c = F_r \times 10^{-A_{tt}/40} \quad (1)$$

Burada F_c köşe frekansını (Hz), F_r filtreleme frekansını (Hz) ve A_{tt} gereken zayıflatma miktarını (dBuV) gösterir. Köşe frekansı belirlendikten sonra bu frekansa göre L ve C değerleri aşağıdaki formül üzerinden hesaplanabilir:

$$L = 1 / (2 \times \pi \times F_c \times \sqrt{C}) \quad (2)$$

L ve C değerleri hem ortak hem fark mod gürültüleri için aynı yolla belirlenebilir. Köşe frekansı belirlendikten sonra L ve C değerleri seçebilmek için birinin değerinin baştan seçilmesi gerekir. Bu seçimleri yapabilmek için dikkate almamız gereken bazı limitler ve eleman durumları vardır.

4.1. Bileşen Seçim Kriterleri

4.1.1. Bileşenin Maksimum Değeri

İki filtre için de temel amaç yüksek frekanslı akımlara karşı devre girişinde alternatif bir yol oluşturmaktır. Bu sayede devrenin şebekeden ve şebekenin devreden korunması sağlanır. Bu yüksek frekanslı akımlara karşı koyabilmek için olabildiğince büyük değerlerde ve olabildiğince ideal bobin ve kondansatörlere ihtiyaç duyulur. Ancak bobinlerin parazitik kapasitansları, kondansatörlerin ise parazitik endüktans değerleri filtrenin yüksek frekansta farklı ve istenmeyen empedansa sahip olmasına sebep olacağından filtrelemeyi olumsuz etkiler. Filtre yüksek frekanslı akımlara karşı koyamaz ve filtreleme başarısız olur.

Bu nedenle filtre devre elemanları seçilirken aşırı yüksek değerlerin seçilmemesine dikkat edilmesi gerektiği söylenebilir. Çünkü endüktans ve kapasitans büyüdükçe parazitik bileşenlerin değerleri de büyür. Parazitik bileşenler büyüdükçe öz-rezonans frekansı daha düşük frekanslara iner. Kısaca yüksek frekanslara çıktıkça istenen filtre empedansı elde edilemez.

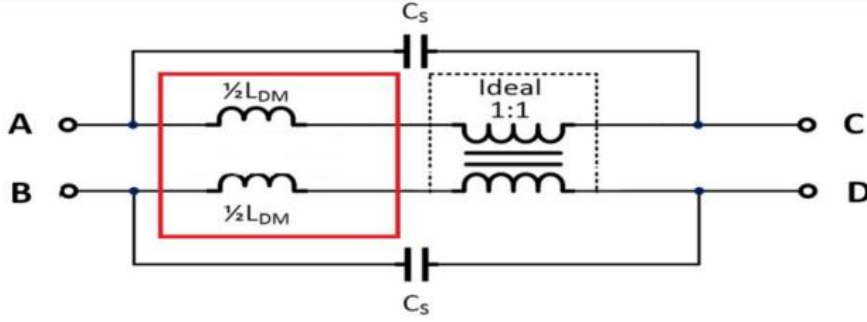
4.1.2. Bileşenin Minimum Değeri

Aynı filtre için bir elemanın değeri sabitken diğer eleman değeri azaldıkça, o frekanstaki bastırma değeri de azalır. Bu yüzden minimum bastırma ihtiyacı için minimum eleman değerleri ortaya çıkar. Filtrede kullanılacak kondansatörler, doğrudan şebekeye bağlı çalışacağından hasar görmeleri ve bozulmaları durumunda istenmeyen kötü sonuçlar meydana gelebilir. Bu sebeple bu kondansatörler sıradan kondansatörlere göre farklı standartlarla üretilir ve özel olarak isimlendirilirler. Fark mod filtre içerisinde kullanılan kondansatörler türlerine X1-X2 (Faz-Faz, Faz-Nötr bağlantı) kondansatörü, ortak mod filtre içerisinde kullanılan kondansatör türlerine ise Y1-Y2 (Faz-Toprak, Nötr-Toprak bağlantı) kapasite değeri denir.

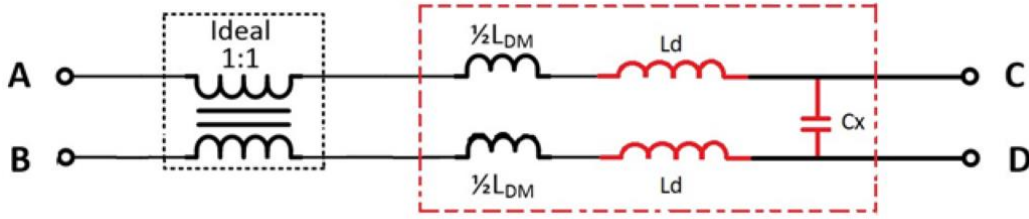
X1-X2 kondansatörleri, yüksek frekanslı fark akımları sağlamakla sorumlu olduğundan olabildiğince yüksek değerlerde olması daha iyi filtreleme sağlarken değeri büyüdükçe öz rezonans frekansı düşer. Bu sebeple, maksimum ve minimum değerler arasında seçim yapılmalıdır. Bir X kapasite değeri seçildikten sonra köşe frekansı üzerinden gerekli endüktans değeri fark mod filtre için hesaplanabilir. X1-X2 kapasiteleri için üretilen ve sık kullanılan değerler $22\text{nF} < C_x < 4.7\mu\text{F}$ aralığında iken fark mod filtre için sık kullanılan endüktans değerleri $1\ \mu\text{H} < L_{dif} < 1\text{mH}$.

Fark mod filtre indüktörü için 2 farklı tercih yapılabilir. Birinci yol, ortak mod filtresindeki şok bobinini kullanmaktır. Bu bobin, kuplajının ideal olmamasından kaynaklı Şekil 4'te gösterildiği gibi (genel olarak %1-5 oranında) bir kaçak endüktansa sahiptir. Bu kaçak endüktans bir fark filtre indüktansı gibi davranabilir. Bu sebeple eğer yüksek değerlerde bir ortak mod bobini kullanılıyor ise kaçak endüktansını ölçerek bu değere göre bir kondansatör seçilir ve fark mod filtre oluşturulabilir.

İkinci yol ise bu ortak mod kaçak endüktansının istenen seviyede olmaması durumunda, Şekil 5'te görüldüğü gibi ona seri bir endüktans bağlanacak şekilde, istenen endüktans değerine gelecek bir değer hesaplamak ve buna göre bir bobin seçmektir.



Şekil 4. İdeal olmayan bir ortak mod filtrenin kaçak endüktansı



Şekil 5. Ortak mod kaçak endüktans değerine bobin ilave edilerek fark mod filtre oluşturulması

Ortak mod filtre için bileşen değerleri belirlenirken fark mod ile yine aynı yöntem izlenir. Ortak mod gürültü grafiği elde edilir, filtreleme frekansı ve bastırma oranı hesaplanır. Filtre köşe frekansı da hesaplandıktan sonra yine L ya da C değerinin başlangıçta seçilmesi gerekmektedir. Bu noktada yine kondansatör değeri seçilerek filtre tasarımına başlanabilir. Kondansatör değeri seçmek için 2 koşul vardır. Birincisi ve en önemlisi, güvenlik standartları gereği (EN 60950-1 Bilgi teknolojileri ekipmanı, IEC60601 Sağlık ekipmanlar ve EN 55014 Cihazlar) toprağa bağlı kondansatörlerin değerinde bir sınır mevcuttur. Bu sınırlar ürün kullanıcısının sağlığı açısından tehlike yaratmayacak bir akım değeri için kapasitansı limitler. Sınır limit akım değerini biliniyorsa, kullanılacak maksimum kapasite değeri aşağıdaki formül ile hesaplanabilir:

$$L_{I-leakage} = 2 \times \pi \times f \times V \times C_y \quad (3)$$

burada f şebeke frekansı, V , şebekenin faz-nötr gerilimi, C_y kondansatör kapasitesidir. İkinci koşul ise minimum kapasite değeridir. Daha düşük frekanslarda bastırma yapabilmek için daha yüksek kapasite değerine ihtiyaç duyulur. Bu sebeple gereken minimum kapasite değeri sağlanmadığı takdirde istenen frekansın filtrelenmesi başarısız olabilir.

Bu iki koşul göz önünde bulundurularak bir kondansatör ardından o kondansatöre göre bir endüktans değeri köşe frekansı üzerinden hesaplanır. Sık kullanılan Y1-Y2 kondansatör değerleri $100\text{pF} < C_y < 47\text{nF}$ aralığında iken sık kullanılan ortak mod endüktans değerleri $1\text{mH} < L_y < 40\text{mH}$ aralığındadır. Hesaplanan değerlerin ardından uygun malzemeler seçilerek test edilir.

4.1.3. Elemanların Seçiminde Dikkat Edilmesi Gerekenler

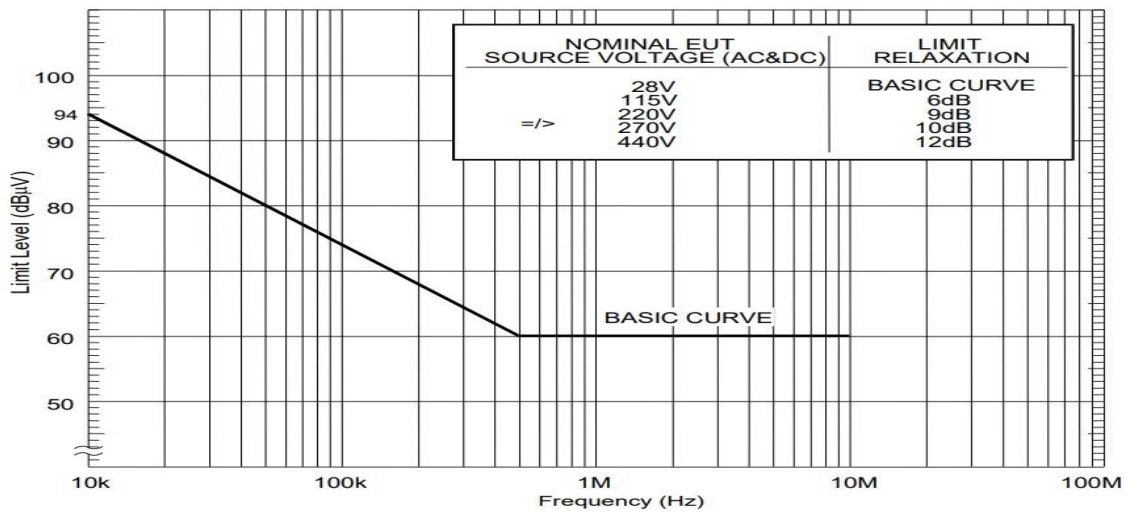
Filtre elemanları seçilirken dikkat edilmesi gereken parametreler aşağıda sıralanmıştır:

- Dağılma faktörü (Dissipation factor)
- Anma gerilim değeri
- Anma akım değeri
- Sıcaklık

- Öz-rezonans (SRF) frekansı
- Nüve (Core) (I) Ferrite , II) Amorphous, III) Nanocrystalline)
- Sarım şekli
- Tel kalınlığı
- DCR- Parasitic DA direnç değeri

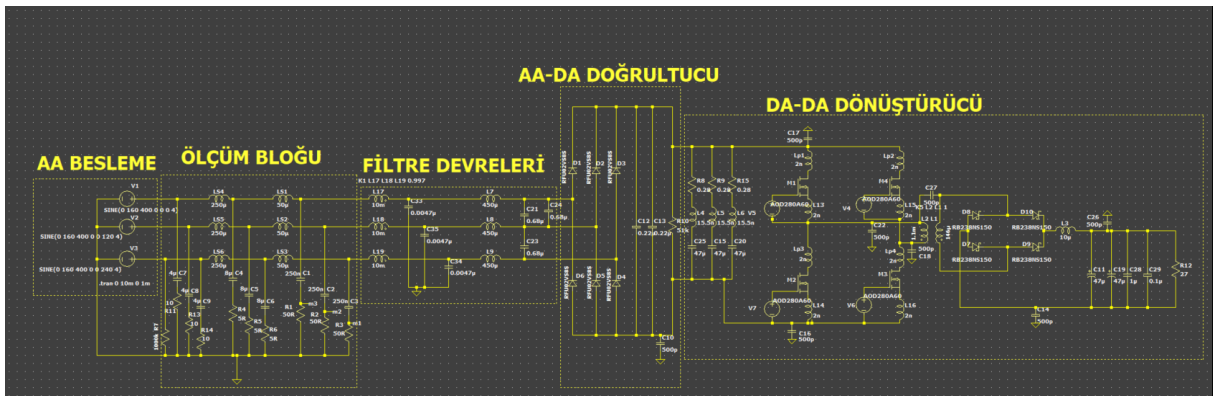
5. Örnek Filtrenin Tasarım ve Benzetimi

Askeri elektromanyetik uyumluluk standardı olan “MIL-STD-461F” standardına uygun bir AA/DA dönüştürücü yapılmak istenildiğinde ilk aşama olarak ilgili devrenin herhangi bir filtre devresi olmadan oluşturduğu gürültü grafiği ortak mod ve fark mod olarak ayrı ayrı çıkarılır yukarıda açıklanan tasarım adımları kullanılarak tasarlanan filtreler yardımı ile Şekil 6’da gösterilen limit değerlerinin altına inmesi makale kapsamında tasarlanacak olan filtreler ile sağlanır.



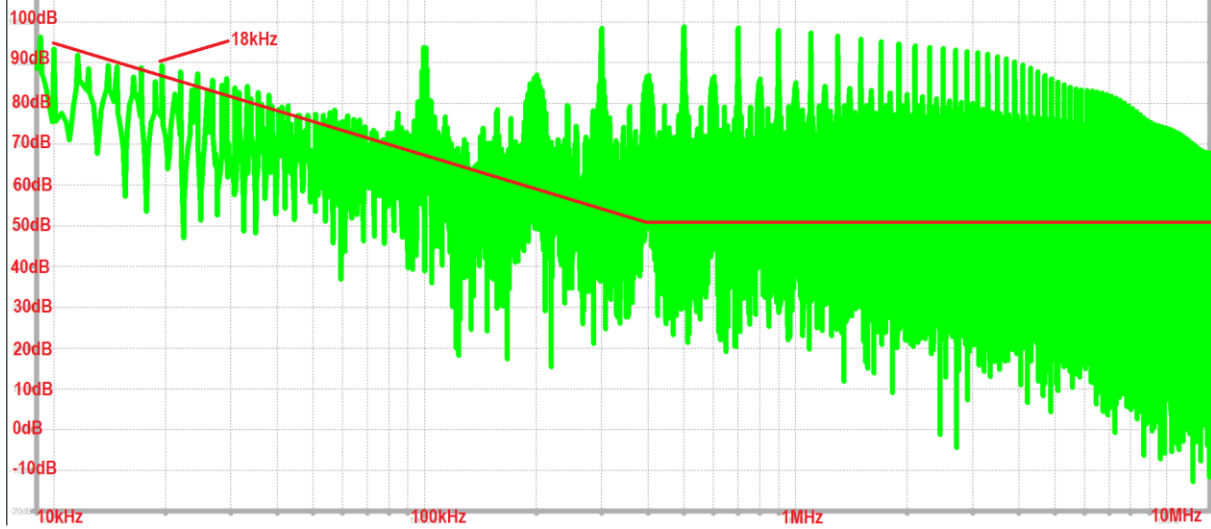
Şekil 6. “MIL-STD-461F” standardının CE102 maddesinde belirtilen iletilen gürültü için limit değerler

AA/DA dönüştürücü devresinin gürültü modellemesi yapılabilmesi için devre elemanların parazitik bileşenleri de eklenerek gerçek modele en yakın olduğu düşünülen modeli elde edilmelidir. Bu çalışmada, 3 faz şebeke gerilimi üç fazlı kontrolsüz bir doğrultucu ile doğrultulduktan sonra üretilen DA gerilimin tam köprü DA/DA dönüştürücü devresi regüle edilerek AA/DA dönüşümün elde edildiği iki aşamalı bir dönüştürücü yapısı ele alınmıştır. Bu dönüştürücü devresi gerçek sisteme en yakın biçimde LtSpice programında Şekil 7’de gösterildiği gibi modellenmiştir.



Şekil 7. 3 faz AA/DA dönüştürücü LTSpice modeli

Şekil 7’de verilen 3 faz AA/DA dönüştürücü LTSpice modeli ile yapılan benzetim çalışmaları sonucunda devrenin fark mod gürültüsü Şekil 8’de gösterildiği gibi elde edilmiştir. Şekil 6’da verilen “MIL-STD-461F” standardının CE102 maddesinde belirtilen iletilen gürültü için limit değer gürültü grafiği üzerinde kırmızı renk ile gösterilmiştir.



Şekil 8. AA/DA dönüştürücü devresinin filtre kullanılmadığı durumda fark mod gürültü grafiği

Testin 10 kHz-10 MHz aralığında yapılacağı dikkate alınarak limit değerler incelendiğinde çift harmoniklerde (2., 4., 6., ...) limit değerlerinin aşıldığı görülmektedir. Filtre tasarımı için başlangıç frekansı 10 kHz değerine yakın bir frekans seçilmelidir. 18 kHz seçimi iyi bir başlangıç olacaktır. Şimdi bu frekanstaki gürültünün, limit değerinin altına inebilmesi için gereken bastırma miktarı (dBuV) hesaplanmalıdır.

Differential mod filtre için hesaplama yaparken 18kHz ve 22kHz’deki limit tepe değerleri sırasıyla 94 dBuV ve 88 dBuV olarak tespit edilmiştir. Güvenlik payı 5dBuV alındığında

$$A_{Bastırma} = 94 - 88 + 5 = 11 \text{ dBuV} \quad (4)$$

$$A = 11 \text{ dBuV} \quad (5)$$

olarak elde edilir. Gereken bastırma değeri referans alınarak köşe frekansı, Eş. 1 kullanılarak hesaplanabilir:

$$f_{corner} = 18 \text{ kHz} \times 10^{\frac{-11}{40}} = 9,55 \text{ kHz} \quad (6)$$

$$f = 9,55 \text{ kHz} \quad (7)$$

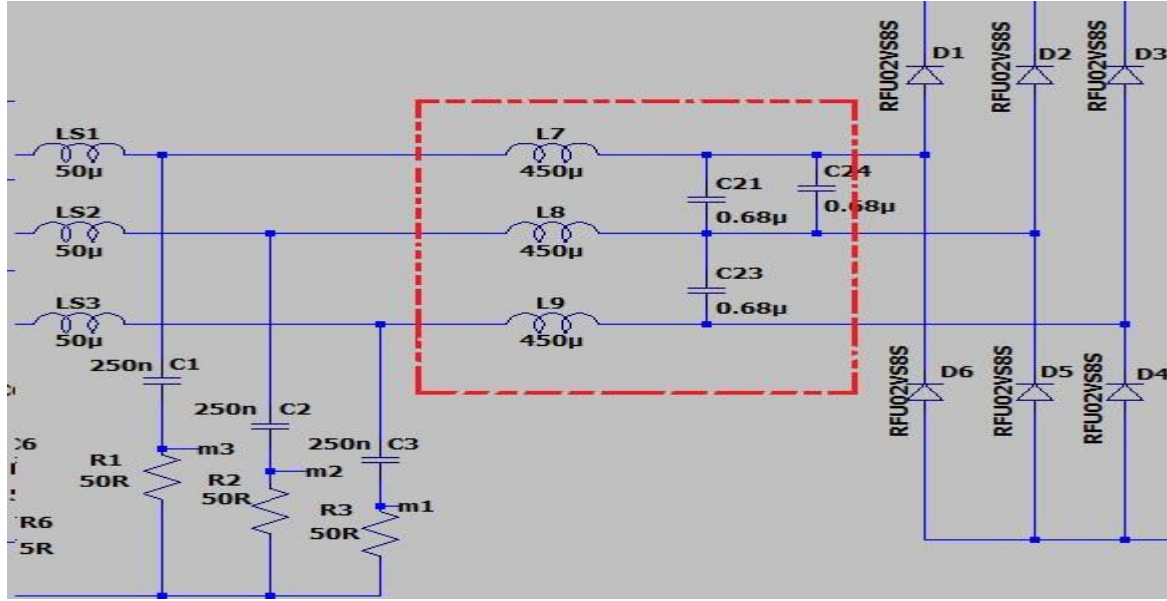
İki kademeli (ikinci dereceden) bir L tipi filtre ile bu bastırma değeri sağlanabilir. Gereken bastırma değerinin yüksek olması sebebiyle kapasite, sınır değerleri aralığında üst sınırlardan başlanarak aşağıya doğru seçilebilir. Test aralığı için kapasite empedansının 10MHz e kadar lineer değişmesi gerekir. Bu sebeple mümkün olan maksimum değeri belirlerken bilgi sayfalarındaki empedans/frekans tablosuna bakılmalıdır. Bu aralıktan 0.68 μF değeri C_x için uygun görülmüştür.

Hesaplana köşe frekansı ve C_x değeri kullanılarak fark mod filtre bobini için endüktans değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

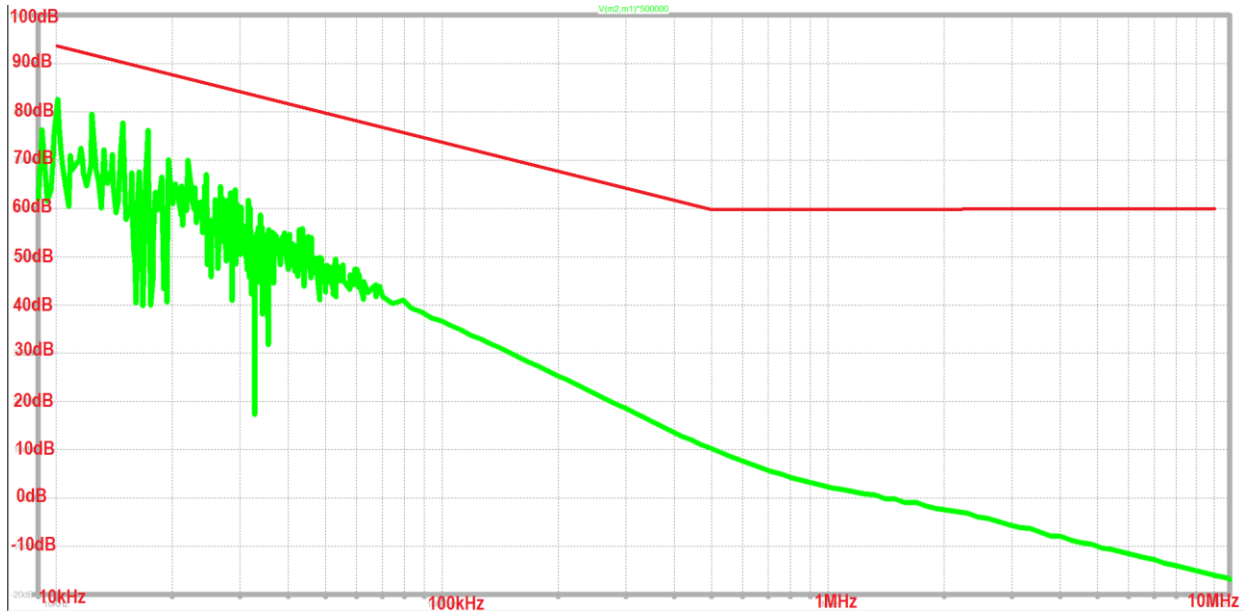
$$9,55kHz = \frac{1}{2} \times \pi \times \text{sqrt}(L \times 0,68\mu F) \quad (8)$$

$$L = 407 \mu H \quad (9)$$

Filtre bobini için satın alınabilecek yaygın bir değer olan $450\mu H$ değeri kullanılacaktır. Hesaplanan filtre değerlerine göre filtre modeli 3üç fazlı doğrultucunun LtSpice modeline Şekil 9'da gösterildiği gibi eklenmiştir. Filtre devresinin eklenmesi ile oluşan fark mod gürültü grafiği Şekil 10'da gösterilmiştir. Hesaplanan ve beklenen bastırma etkisi, filtre köşe frekansı etrafında görülebilmektedir. Bu aşamada benzetim sonuçlarından tasarlanan fark mod filtrenin uygun olduğu görülmektedir.



Şekil 9. Hesaplanan fark mod filtrenin LTSpice modeline yerleştirilmesi



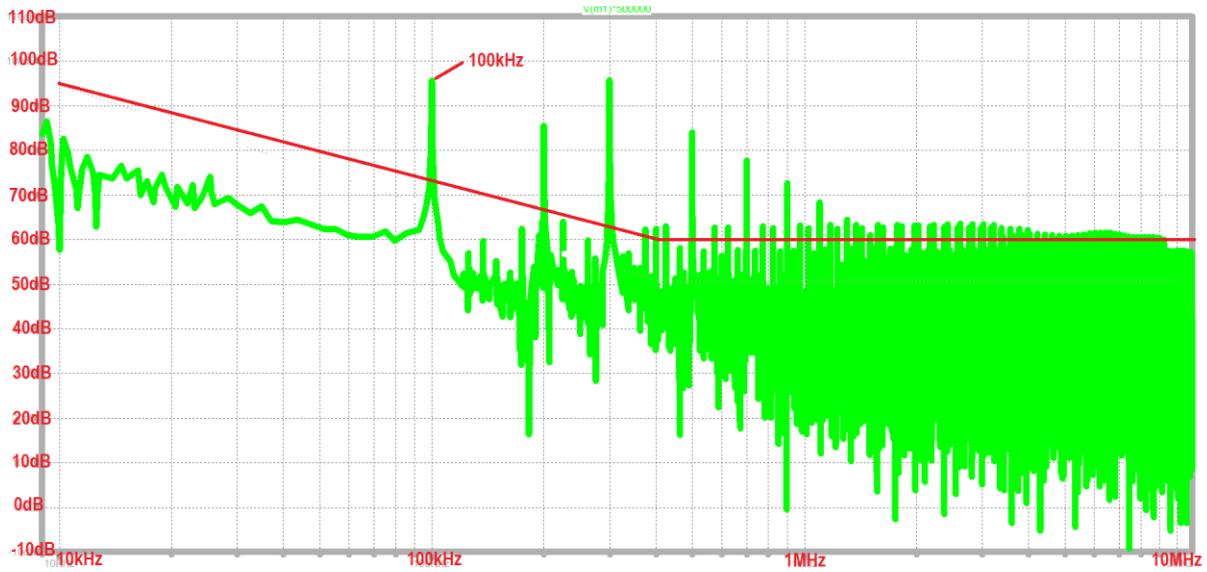
Şekil 10. Filtre eklenmesi sonucu oluşan fark mod gürültüsü

Şekil 7'de verilen 3 faz AA/DA dönüştürücü LTSpice modeli ile yapılan benzetim çalışmaları sonucunda devre için elde edilen ortak mod gürültüsü fark mod filtre kullanılmadığı ve kullanıldığı

durumlar için sırasıyla Şekil 11 ve Şekil 12’de gösterilmiştir. Gürültü grafikleri üzerinde Şekil 6’da verilen limit grafiği kırmızı renk ile işlenmiştir.



Şekil 11. AA/DA dönüştürücü devresinin fark mod filtre olmadan ortak mod gürültü grafiği



Şekil 12. AA/DA dönüştürücü devresinin fark mod filtre eklendikten sonraki ortak mod gürültü grafiği

Fark mod filtre eklenmiş devre grafiği referans alınarak önce kapasite sonrasında ise ortak mod şok bobini için indüktans hesaplanabilir. İlk limit aşımının meydana geldiği 100kHz frekansı ortak mod filtre tasarımı için uygun görülmüştür. Öncelikle bu frekans için gerekli bastırma miktarı hesaplanmalıdır. Gürültü sinyalinin 100kHz tepe değeri: 98dBuV iken MIL-STD-461F'e göre 300kHz'deki limit değeri 75dBuV 'dir. 5dBuV güvenlik payı dikkate alınarak gerekli bastırma değeri hesaplanabilir:

$$A_{\text{Attenuation, Bastırma}} = 98 - 75 + 5 = 28\text{ dBuV} \quad (10)$$

$$A = 28\text{ dBuV} \quad (11)$$

Gerekli bastırma değeri 28 *dBuV* olarak hesaplanmıştır. Bu değer ve filtreleme frekansı kullanılarak köşe frekansı hesaplanabilir:

$$f_c = 100kHz \times 10^{\frac{-28}{40}} = 20kHz \quad (12)$$

$$f = 20kHz \quad (13)$$

olarak köşe frekansı hesaplanmıştır. Kondansatör kapasite değeri seçildikten sonra bobin endüktans değeri köşe frekansı formülü üzerinden hesaplanabilir.

Kondansatör değeri seçilirken yine öz-rezonans frekansı ve standartlar gereği toprak kondansatör akım limiti değerleri dikkate alınmalıdır. Standartlar, toprağa bağlı kondansatörün akım değerini 5 mA ile limitler. Bu akım değerine göre maksimum kapasite değeri aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$I_{leakage} = 2 \times \pi \times f \times V_{max,p-n} \times C_y \quad (14)$$

$$5mA = 2 \times \pi \times 400Hz \times 115 \times 1.1 \times C_y$$
$$C_y = 15.7 \text{ nF} \quad (15)$$

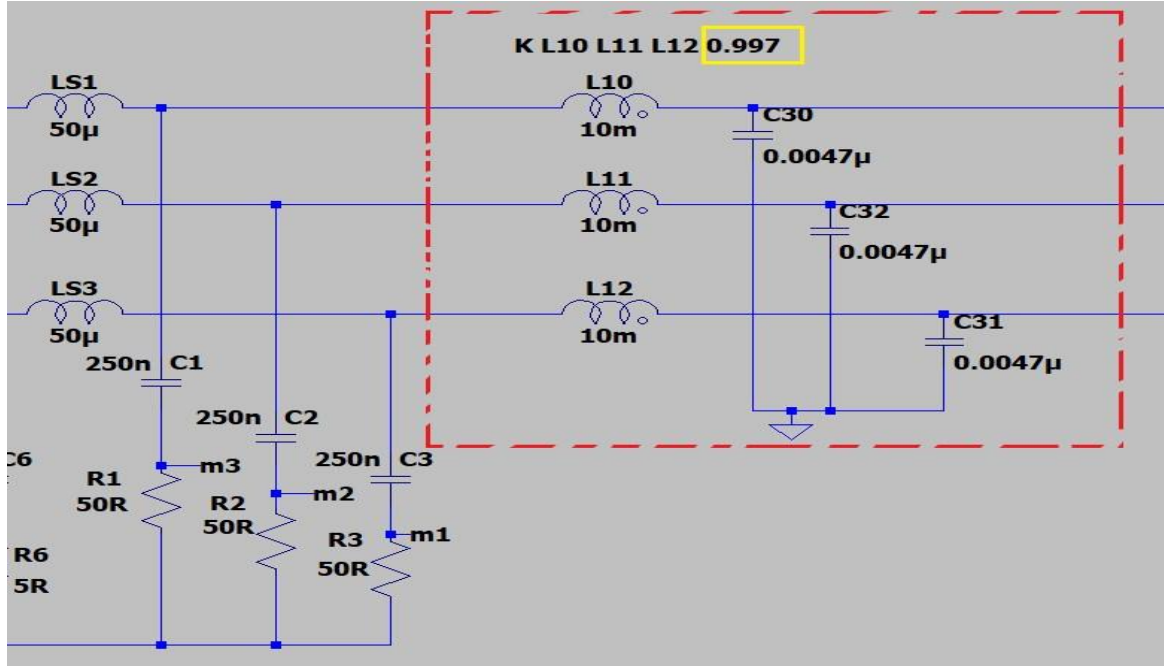
Bu limit değeri, kullanıcının toprağa bağlı kondansatörler üzerinden deşarj riski sebebiyle standartlar gereği 5mA değerine limitlenmiştir. Bu akım değerini aşmamak için en fazla 15.7nF kullanılabilir. Limit değerinden uzaklaşmak için 4.7nF Y2 kapasite değeri daha uygun görülmüştür. Seçilen bu Y2 kondansatör değeri ve köşe frekansı kullanılarak ortak mod filtre için bobin endüktans değeri hesaplanabilir:

$$20 \text{ kHz} = \frac{1}{2 \times \pi \times \text{sqrt}(L \times 4.7 \text{ nF})} \quad (16)$$

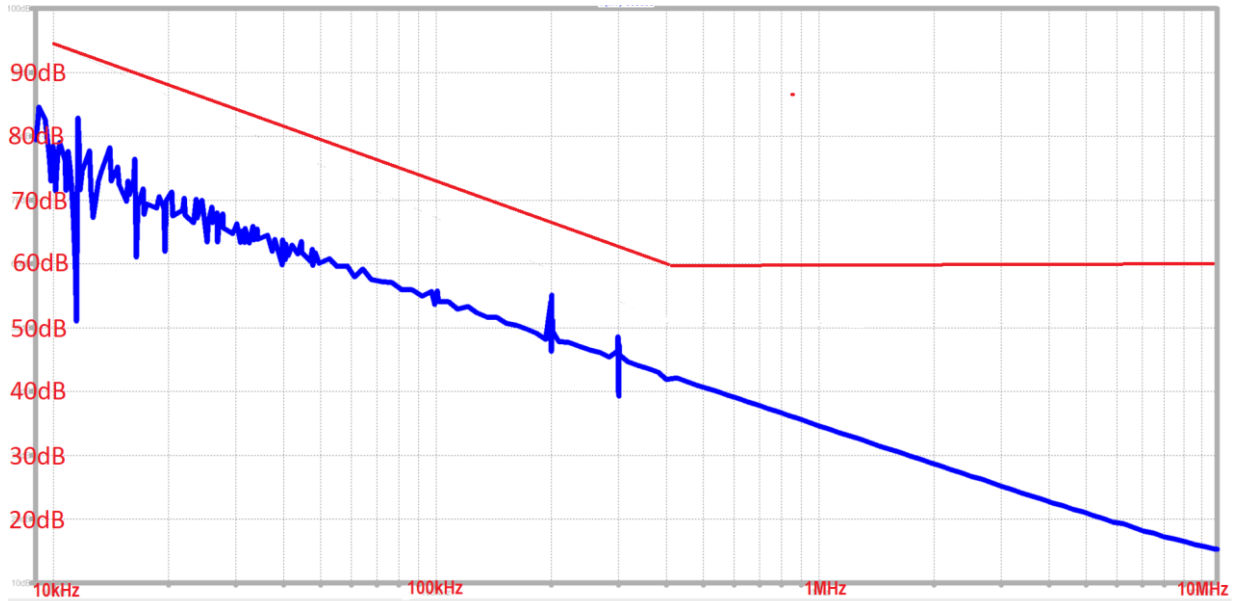
$$L = 13.5 \text{ mH} \quad (17)$$

Hesaplama sonuçlarına göre satın alınabilecek yaygın bir değer olan 10mH değeri kullanılacaktır.

Kullanılan devre parametrelerine uygun olarak bulunabilecek bobinler incelendiğinde kaçak endüktans değerinin ortalama %0.3 civarında olduğu görülebilir. Bu sebeple benzetim çalışmalarında kuplaj oranı 0.997 olarak güncellenmiştir. Tasarımı tamamlanan ortak mod filtre devresinin Şekil 12'deki gibi LtSpice modeline eklenmiş ve benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 13'te AA/DA dönüştürücü devresinde filtre devreleri eklendikten sonra oluşan gürültü grafiği Şekil 14'te gösterilmiştir. Yine MIL-STD-461F'de tanımlanan sınır değer eğri üzerinde işaretlenmiştir. Gürültü grafiği tasarlanan filtrenin yeterli olduğunu açıkça göstermektedir.



Şekil 13. Hesaplanan ortak mod filtrenin LTSpice modeline eklenmesi



Şekil 14. Ortak mod filtre eklendikten sonra ortak mod gürültüsü

6. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada askeri hava/kara araçlarında kullanılmak üzere tasarlanan AA/DA dönüştürücülerin "MIL-STD-461F-CE102"de tanımlanan iletkenlik yoluyla yayılım gereksinimine uygun hale getirilmesi amacıyla elektromanyetik girişim filtre tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada sistemin filtre olmadan gürültü grafiği benzetim programı kullanılarak çıkarılmıştır. Çıkarılan gürültü grafiği analiz edilerek adım adım fark mod ve ortak mod filtre tasarımı gerçekleştirilmiş ve filtre bileşenlerinin değerleri hesaplanmıştır. Fark mod filtre eklendikten sonra ortak mod gürültü grafiğinde de iyileştirme görüldüğü gösterilmiştir, fakat limit değerinin altına inilememiştir. Tasarlanan ortak mod filtrenin de sisteme eklenmesiyle eklenen ölçüm devreleri aracılığıyla benzetim programında yapılan çalışmalar hem ortak mod ve hem de fark mod gürültülerinin standart da belirtilen limitin yaklaşık 10 dBuV güvenlik marjı bırakılarak altına indiği görülmüştür. Benzer filtreleme metodu kullanan Heller vd. (2022)'de yapılan çalışmada ise güvenlik marjı yaklaşık dBuV

hatta tam yük değerinde standart eğrisinin üstünde kalan noktalar bulunmaktadır. Tasarım yapılırken limitler ile güvenlik payı bulunduracak şekilde tasarım yapılması ile devrenin imalatında ve/veya baskı devre tasarımı sırasında öngörülemeyen parazitik etkilerden dolayı oluşacak limit üstü değerlerin önüne geçilmesi sağlanmıştır. Örneğin Ma vd. (2023)'de yapılan çalışmada 6dBuV güvenlik marjı bırakılmış ve baskılı devre kartından oluşabilecek etkenler benzetim çalışmasına eklenmiştir. Böylece muhtemel iyileştirme nedeniyle ortaya çıkabilecek maliyet artışı ve görece yüksek maliyeti bulunan test ve ölçümlerin tekrar edilmesi gereksinimleri ortadan kaldırıldığından tasarım maliyeti iyileştirme elde edilmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Kaynaklar

- Tihanyi, L. (1995). *Electromagnetic Compatibility in Power Electronics* Piscataway, NJ: IEEE Press.
- Ott, H.W. (1998). *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems*, Wiley, Second Edition. New York, ABD.
- Çadırcı, I., Saka, B. & Eriştiren, Y. (2005). Practical EMI-Filterdesign Procedure for High-Power High-Frequency SMPS According to MIL-STD 461. *IEE Proc.Electr.Power Appl.*,152(4), 775-782.
- Zhang, H., Yang, L., Wang, S. & Puukko, J. (2017). Common-Mode EMI Noise Modeling and Reduction with Balance Technique for Three-level Neutral Point Clamped Topology. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64, 7563-7573.
- Nawawi, A., Tong, C.F., Sakanova, A. & Liu, Y. (2017). Design and Demonstration of High Power Density Inverter for Aircraft Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 53, 1168-1176.
- Lai, J. S., Huang, X., Chen, S. & Nehl, T. (2002). EMI Characterization and Simulation with Parasitic Models for a Low-Voltage High Current AC Motor Drive. *Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference*, 13-18 October 2002, Pittsburgh, ABD.
- Schanen, J.L., Jourdan, L. & Roudet, J. (2002). Layout Optimization to Reduce EMI of a Switched Mode Power Supply. *2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 23-27 June 2002, Cairns, QLD, Australia.
- Chen, C. (2000). Novel EMC Debugging Methodologies for High-power Inverters. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 21-25 August 2000, Washington, DC, USA.
- Mugur, P.R., & Roudet, J. & Crebier, J.C. (2001). Power Electronic Converter EMC Analysis through State Variable Approach Techniques. *IEEE Trans. Electromagn. Compat*, 43(2), 229–238.
- Balthasar V.D.P. (1946). The Fundamental Principles of Frequency Modulation. *J. Inst. Elect. Eng. Part III Radio Commun. Eng.*, 93(23), 153–158.
- Balcells, J., Santolaria, A., Orlandi, A., Gonzalez, D. & Gago, J. (2005). EMI Reduction in Switched Power Converters Using Frequency Modulation Techniques. *IEEE Trans. Electromagn. Compat*, 47(3), 569–576.
- Santolaria, A., Balcells, J. & Gonzalez, D. (2002). Theoretical & Experimental Results of Power Converter Frequency Modulation. *IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society*, 05-08 November 2002, Seville, Spain.

- Lorenzo, J.A.S. (2004). SSCG Methods of EMI Emissions Reduction Applied to Switching Power Converters. *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference*, 20-25 June 2004, Aachen, Germany.
- Khun, C., Khan-ngern, W. & Kando, M. (2007). Passive EMI Filter Performance Improvements with Common Mode Voltage Cancellation Technique for PWM Inverter. *7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, 27-30 November 2007, Bangkok, Thailand.
- Guo, T., Chen, D.Y. & Lee, F.C. (1995). Diagnosis of Power Supply Conducted EMI Using a Noise Separator. *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 05-09 March 1995, Dallas, USA.
- Yalçın, S. (2023). Güç Elektroniklerinde EMI. *Doğa Bilimleri ve Matematikte Yenilikçi Çalışmalar*, ISBN: 978-625-6507-38-8, 76-95.
- Kircher, D. & Pommerenke, D.J. (2022). EMC Analysis of the Inverting Boost/Buck Converter Topology. *Electronics*, 11(20), 3388.
- Murugan, R., Chen, J., Tripathi, A., Nayak, B.P., Muniganti, H. & Gope, D. (2023). Multiscale EMC Modeling, Simulation, and Validation of a Synchronous Step-Down DC-DC Converter. *IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques*, 8, 269-280.
- Heller, M.J., Krismer, F. & Kolar, J.W. (2022). EMI Filter Design for the Integrated Dual Three-Phase Active Bridge (D3AB) PFC Rectifier. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(12), 14527-14546.
- Ma, Z., Wang, S., Sheng, H. & Lakshmikanthan, S. (2023). Modeling, Analysis and Mitigation of Radiated EMI Due to PCB Ground Impedance in a 65W High-Density Active-Clamp Flyback Converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 70(12), 12267-12277.

Araştırma Makalesi / Research Article

A Design Software Based on The Placement of Bolts for Bolted Joints

Kadir SARI^{1*}, Hakan DİLİPAK²

¹ Gazi University, Institute of Science, Department of Manufacturing Engineering, Ankara, TÜRKİYE

² Gazi University, Faculty of Technology, Department of Manufacturing Engineering, Ankara, TÜRKİYE
kadir.sarion@gmail.com, hdilipak@gazi.edu.tr

Received/Geliş Tarihi: 01.11.2023

Accepted/Kabul Tarihi: 08.12.2023

Bolted joints are one of the basic detachable mechanical joint methods designed to hold parts securely together. The design of bolted joints is critical in terms of safety and strength. The calculation of the number of bolts, placement and location of bolts constitutes a complex and time-consuming design process. In this study, a design study was carried out for the optimization of bolted joints under lateral load. For this purpose, a software with a graphical user interface was developed using C# programming language in Visual Studio environment. The user-friendly graphical interface guides the user accurately and facilitates the use with its visual structure. Design outputs are calculated automatically by the software with few user inputs. The study is based on the principle of bolt placement. In the software, bolt diameter, number of tours in row and column are taken as input. In line with the inputs, the software gives the minimum and maximum values of the plate width and length, the distances between the bolts, the distances of the bolts to the edges and creates a design range for the design of the joint. The calculated design parameters are reflected to the designer with a visualization. With the developed software, the design of bolted joints is realized for very few user inputs. As a result, user workload in design processes is minimized and time is saved. By comparing the results obtained with the software and the theoretical solutions, the developed software was found to be 100% reliable.

Keywords: Bolted joint, Design, Optimization, Placement, Software

Abstract:

Cıvatalı Bağlantılar için Cıvataların Yerleşim Düzenini Esas Alan Bir Tasarım Yazılımı

Özet: Cıvatalı bağlantılar, parçaları güvenli bir şekilde bir arada tutmak için tasarlanan temel sökülebilir mekanik bağlantı yöntemlerinden biridir. Cıvatalı bağlantıların tasarımı, güvenlik ve dayanım yönünden oldukça kritiktir. Cıvataların sayısı, yerleşim düzeni ve konumlarının hesabı karmaşık ve zaman alan bir tasarım süreci meydana getirmektedir. Bu çalışmada, yanal yük altındaki cıvatalı bağlantıların optimizasyonuna yönelik bir tasarım çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla Visual Studio ortamında C# programlama dili kullanılarak grafik kullanıcı arayüzüne sahip bir yazılım geliştirilmiştir. Kullanıcı dostu grafik arayüz, kullanıcıyı doğru bir şekilde yönlendirmekte ve kullanımı görsel yapısıyla kolaylaştırmaktadır. Tasarım çıktıları, az sayıda kullanıcı girdisi ile yazılım tarafından otomatik hesaplanmaktadır. Çalışma, cıvataların yerleşim düzeni prensibini esas almaktadır. Yazılımda, cıvata çapı, satır ve sütundaki tur sayıları girdi olarak alınmaktadır. Yazılım, girdiler doğrultusunda bağlantının tasarımı için, plaka en ve boy uzunluklarının, cıvatalar arası mesafelerin, cıvataların kenarlara olan uzaklıklarının en az ve en çok olarak değerlerini vermekte ve bir tasarım aralığı oluşturmaktadır. Hesaplanan tasarım parametreleri, tasarımcıya bir görsel ile birlikte yansıtılmaktadır. Geliştirilen yazılım ile cıvatalı bağlantıların tasarımı çok az sayıda kullanıcı girdisi için gerçekleştirilmektedir. Sonuç olarak tasarım süreçlerinde kullanıcı iş yükü en aza indirilmiştir ve zamanda kazanç sağlanmıştır. Yazılım ile elde edilen sonuçlar ve teorik çözümler karşılaştırılarak geliştirilen yazılım %100 güvenilir bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Cıvatalı bağlantı, Tasarım, Optimizasyon, Yerleşim, Yazılım

1. Introduction

There are various joining methods in today's engineering and industrial applications. One of these methods, bolted joints, is one of the basic methods used in industry. These mechanical joints, which offer a simple but effective structure, have superior functionality in joining elements. Bolted joints, which have been preferred in many areas for centuries, are of great importance in today's world. In many industries and fields, strong and reliable systems and structures are created using bolted joints. Therefore, the design, analysis, optimization, element selection, correct sizing and assembly processes of bolted joints are critical to the success of systems and structures.

Bolted joints are one of the basic mechanical jointing methods designed and used to hold parts together and connect them securely. These joints consist of machine elements such as bolts, nuts and washers, providing strong and reliable systems.

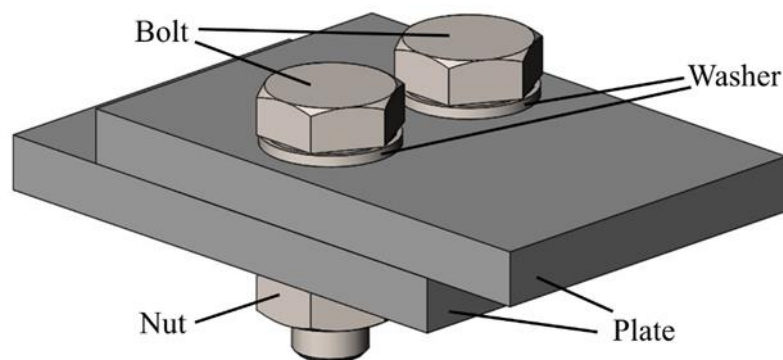


Figure 1. Bolted joint example

Bolts are produced in different sizes and materials. In this way, they can be used for various applications and areas. Bolted joints are widely preferred in industry and application areas such as machinery, automotive, aviation. Correct assembly process and regular control of joints are important to ensure safe and robust connections. Bolted joints, which are a basic joint method for the engineering field, are effective and efficient when they are applied correctly.

The design process of bolted joints is of vital importance for application areas such as structures, machines, etc. systems. Due to their simple structure and easy handling, they save material and labor. Optimization of the joint is achieved by determining the most appropriate dimensioning, material selection and assembly process for a particular application, and this process ensures efficient performance. It can fulfil various application requirements. They ensure compliance with safety, durability and quality standards. Assembly and disassembly processes are easy and thus the probability of error is low. Enables fast production. It facilitates regular control and maintenance of the joint. For these reasons, the design process of bolted joints should be carried out carefully and according to the principles.

There are many studies on bolted joints in the literature. The effects of step spacing, row spacing, end spacing and bolt diameter on multiple composite joints were investigated (Chutima and Blackie, 1996). MSC. Patran finite element software was used and a plug-in called BOLJAT was developed to facilitate the modelling process of composite bolted joints (Padhi et al, 2002). A design software with a graphical interface for riveted and bolted joints subjected to compound loads was presented (Bogis et al, 2004). The use of optimization technology in the improvement of bolted joint design was presented. Finite element analysis and design of a bolted joint using ANSYS Workbench was studied. The aim of the study is to minimize the bolted joint deformation to optimize the joint (Piscan et al, 2012). In order to prevent failures in bolted joints and to ensure fire resistance at high

temperature, the effect of end spacing and number of bolts on the bearing strength of the bolted joint was investigated using experimental results (Yang et al, 2013). In order to ensure uniform distribution of the loads on bolted joints, a multi-objective optimization model for the position of the bolts used in the joint is presented in Nastran finite element software (SAE, 2013). The behavior of elongated end plate joints with circular bolt pattern was investigated under static and cyclic loads. They were compared with joints with square bolt pattern. The effects of various bolt diameters and end plate thicknesses on the bolt force distribution of each bolt pattern were investigated (Kiamanesh et al, 2013). The reliability of bolt spacing in bolted steel structural joints was investigated by monte carlo simulation method (Öztekin, 2015). The effect of the pitch difference in bolt-nut joints on anti-loosening performance and fatigue life was investigated (Noda et al, 2016). The effects of end spacing on thin sheet steel (TSS) bolted joints were investigated experimentally. The joint specimens were of two types: single shear and double shear. Different bolt diameters and plate thicknesses were used in the joint types (Cai and Young, 2019). A methodology for optimizing the design of bolted joints in horizontal plates and pressure vessels under tensile and shear loading is presented (Palacios et al, 2020). The focus was on the influence of geometrical parameters such as bolt positioning, joint length on the static behavior of the joint and mechanical properties such as stiffness and strength (Romanov et al, 2021). An approach to optimize the number and location of fasteners in bolted joints and to optimize the shape and topology of these bolted joints is presented (Rakotondrainibe et al, 2022). The effect of hole tolerance and bolt tightening torque on the joint strength of bolted single lap joints was investigated theoretically and by finite element analysis (Saraç, 2022). It is aimed to improve the EF7 engine flywheel bolted joint design with theoretical and experimental investigations (Asadi Taheri, 2022).

Studies in the literature have addressed the effect of geometrical properties and different parameters, bolt spacing, modelling processes, lateral, compound, etc. loads on the strength of joints of different types and materials. Theoretical, experimental and numerical studies were carried out and design and analysis software were developed. In addition, finite element analysis and optimization techniques were used to improve the performance of bolted joints. Previous research contributes to the development of different methods to optimize bolted joints, increase their durability and ensure their reliability.

In this study, bolted joints under lateral loads were studied. For this purpose, a software called "BJD SOFT" was developed to calculate bolt placements and plate dimensions including width and length parameters for joint designs with different bolt diameters and bolt numbers. For each joint type, minimum and maximum results are produced according to the user inputs and thus the design of bolted joints can be optimized. A graphical user interface was designed for the developed software and a clear and easy to use interface was presented to the user.

With this study, more flexible designs for bolted joints are realized compared to the limited systems and designs in the literature. For minimum user input, possible design options are automatically reflected to the user instantly and optimization is performed. A visual and interactive structure is obtained with the use of a graphical user interface, which is rare in the literature.

2. Placement of Bolts

For bolted joints, the placement of the bolts and the distances between the bolts are calculated using the formulations given for the spacings transferred in the standards. One of these standards is TS648 standard. Using this standard, the distances between the bolts, the distances of the bolts to the edges and the width and length of the plate can be determined by means of these parameters. A joint visualization offering a sample layout for the placement of bolt holes is given in Figure 2 below. The

TS648 standard in question is taken as basis and formulations (Eqs. 1 – 11) are given for each parameter on the given figure (TSE, 1980).

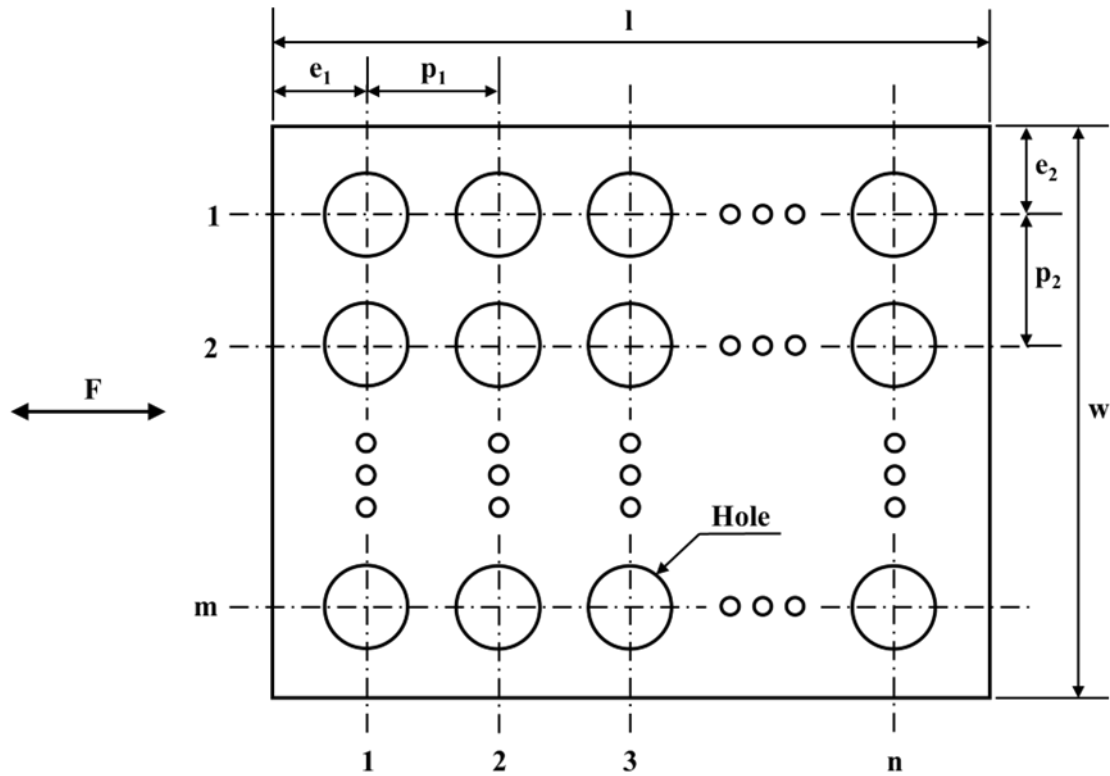


Figure 2. Placement layout for bolt holes

$$d_h = d * 0,85 \quad (1)$$

$$p_{1min} = p_{2min} = 3 * d_h \quad (2)$$

$$p_{1max} = p_{2max} = 8 * d_h \quad (3)$$

$$e_{1min} = 2 * d_h \quad (4)$$

$$e_{1max} = 3 * d_h \quad (5)$$

$$e_{2min} = 1,5 * d_h \quad (6)$$

$$e_{2max} = 3 * d_h \quad (7)$$

$$w_{min} = 2 * e_{2min} + (m - 1) * p_{2min} \quad (8)$$

$$w_{max} = 2 * e_{2max} + (m - 1) * p_{2max} \quad (9)$$

$$l_{min} = 2 * e_{1min} + (n - 1) * p_{1min} \quad (10)$$

$$l_{max} = 2 * e_{1max} + (n - 1) * p_{1max} \quad (11)$$

d : Bolt nominal diameter (mm)

d_h : Hole diameter (mm)

p_1, p_2 : Distance between bolt holes (mm)

e_1 : Distance of the bolts to the edges in the direction of impact (mm)

e_2 : Distance of the bolts to the edges in the direction perpendicular to the impact (mm)

l : Plate length (mm)

w : Plate width (mm)

3. Developed Software

In this study, a design software called "BJD SOFT" was developed for bolted joints. A graphical user interface was designed for the software developed in Visual Studio environment. The software is used to design bolted joints based on the principle of bolt placement.

The software consists of input, design area and result sections. In the input section, the diameter of the bolt to be used in the joint and the number of bolts tours in each row and column are taken from the user. Design area is the area where the bolted joint layout is given visually. In the result section, the placement positions of the bolts and plate dimensions are given as output. The results are run by clicking the Calculate button.

According to the user inputs, the width and length of the plates, the distances between the bolts and the distances of the bolts to the edges are automatically calculated in the software background. These design parameters are reflected to the user in detail in the result section in relation to the visual in the design area. These parameters include minimum and maximum values that can be used for the joint and these values form a range. The user can realize the design by staying within this range.

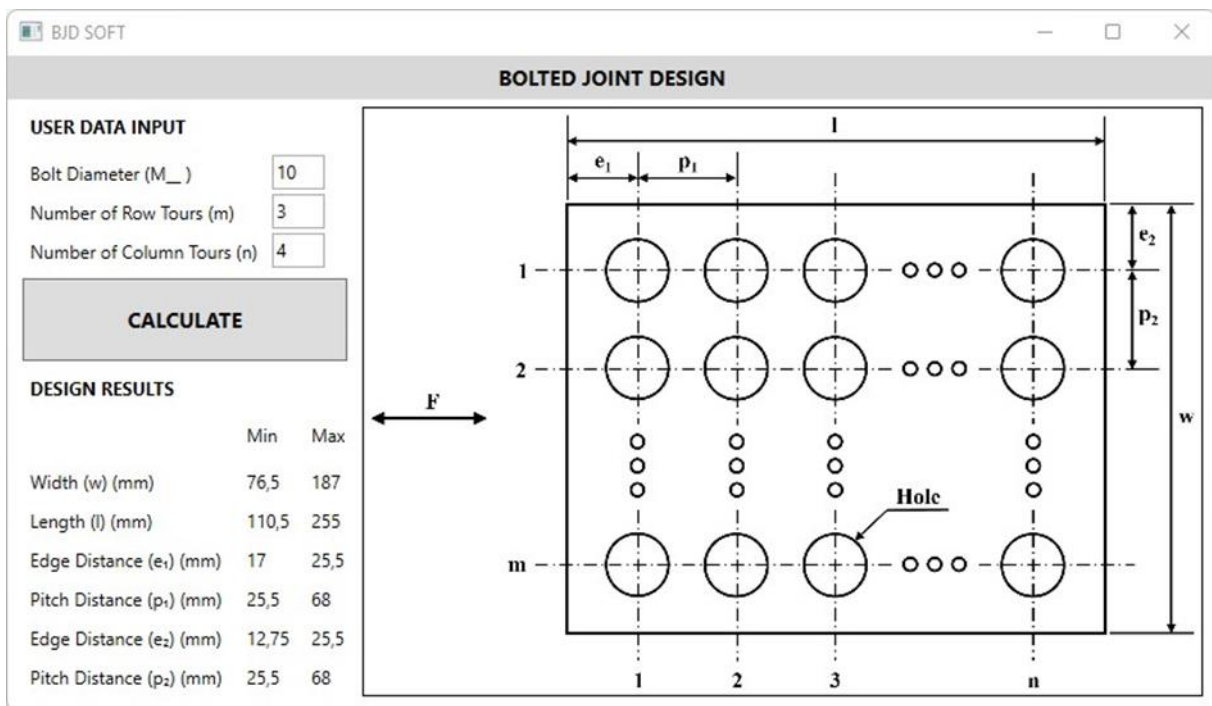


Figure 3. Software interface

3.1. Example Applications

In this section, sample studies were carried out on the developed software. Comparisons were made with the theoretical solutions for the software outputs and the accuracy of the developed software was ensured.

In the verification process, two bolted joint problems were used as examples.

3.1.1. Example Application - 1

In the first example problem, the number of bolts used in the bolted joint under lateral load is 12. The number of bolts tours in the row is given as 3 and the number of bolts tours in the column is given as 4. The plates were joined using M10 bolts. In this direction, it was requested to calculate the placement of the bolts and to determine the width and length values of the plates.

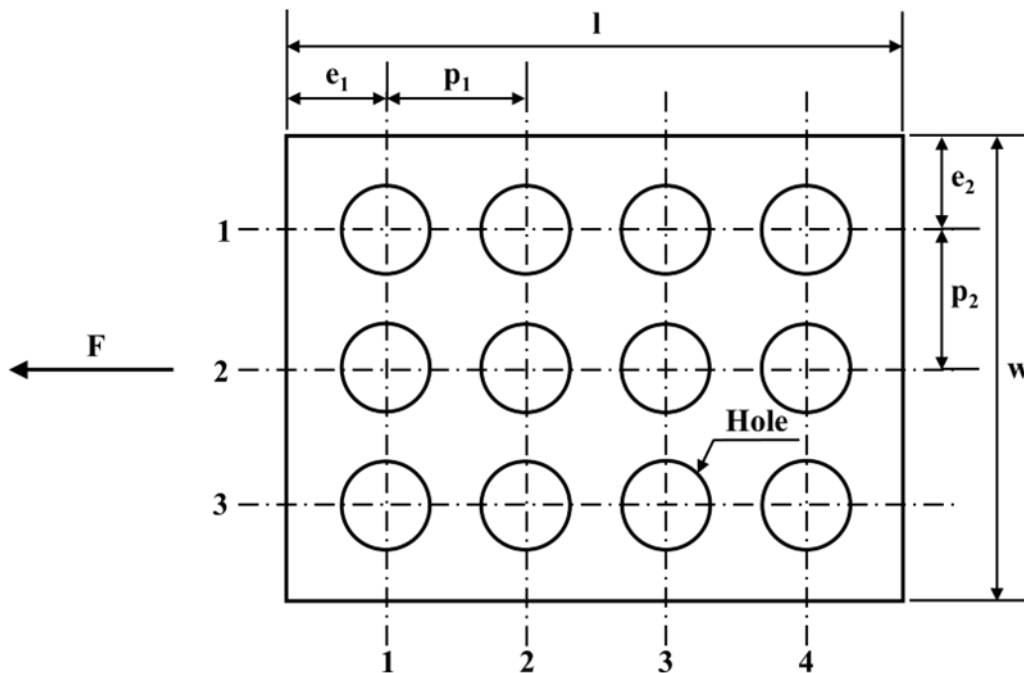


Figure 4. Example problem for bolted joint under lateral load – 1

According to these data, with the help of the bolt placement formulation, the placement of the bolts and the plate dimensions are found. The distances between the bolts (p_1 and p_2), the distances of the bolts to the edges (e_1 and e_2) were calculated. According to these calculated values, plate width (w) and length (l) values were found. The minimum and maximum values of all these design parameters are given below.

Firstly, the unknown hole diameter (d_h) in the formula was found using the bolt diameter.

$$d_h = d * 0,85 = 10 * 0,85 = 8,5 \text{ mm} \quad (8)$$

This value was then substituted in the formulae below and the design parameters were calculated.

$$p_{1_{min}} = p_{2_{min}} = 3 * d_h = 3 * 8,5 = 25,5 \text{ mm} \quad (9)$$

$$p_{1_{max}} = p_{2_{max}} = 8 * d_h = 8 * 8,5 = 68 \text{ mm} \quad (10)$$

$$e_{1_{min}} = 2 * d_h = 2 * 8,5 = 17 \text{ mm} \quad (11)$$

$$e_{1_{max}} = 3 * d_h = 3 * 8,5 = 25,5 \text{ mm} \quad (12)$$

$$e_{2_{min}} = 1,5 * d_h = 1,5 * 8,5 = 12,75 \text{ mm} \quad (13)$$

$$e_{2_{max}} = 3 * d_h = 3 * 8,5 = 25,5 \text{ mm} \quad (14)$$

Using these values, the minimum and maximum values of the plate width (w) and length (l) were calculated.

$$w_{min} = 2 * e_{2_{min}} + 2 * p_{2_{min}} = 2 * 12,75 + 2 * 25,5 = 76,5 \text{ mm} \quad (15)$$

$$w_{max} = 2 * e_{2_{max}} + 2 * p_{2_{max}} = 2 * 25,5 + 2 * 68 = 187 \text{ mm} \quad (16)$$

$$l_{min} = 2 * e_{1_{min}} + 3 * p_{1_{min}} = 2 * 17 + 3 * 25,5 = 110,5 \text{ mm} \quad (17)$$

$$l_{max} = 2 * e_{1_{max}} + 3 * p_{1_{max}} = 2 * 25,5 + 3 * 68 = 255 \text{ mm} \quad (18)$$

After the procedures, this sample problem was applied to the developed software and the software was verified by making comparisons. In the user input field on the software interface, the bolt diameter was entered as 10, the number of rows tours as 3 and the number of columns tours as 4. The calculation process for the example problem was carried out automatically by clicking the Calculate button. In the design results section, the plate width (w) and length (l), the distances of the bolts to the edges (e_1 and e_2) and the distances between the bolts (p_1 and p_2) were given as minimum and maximum.

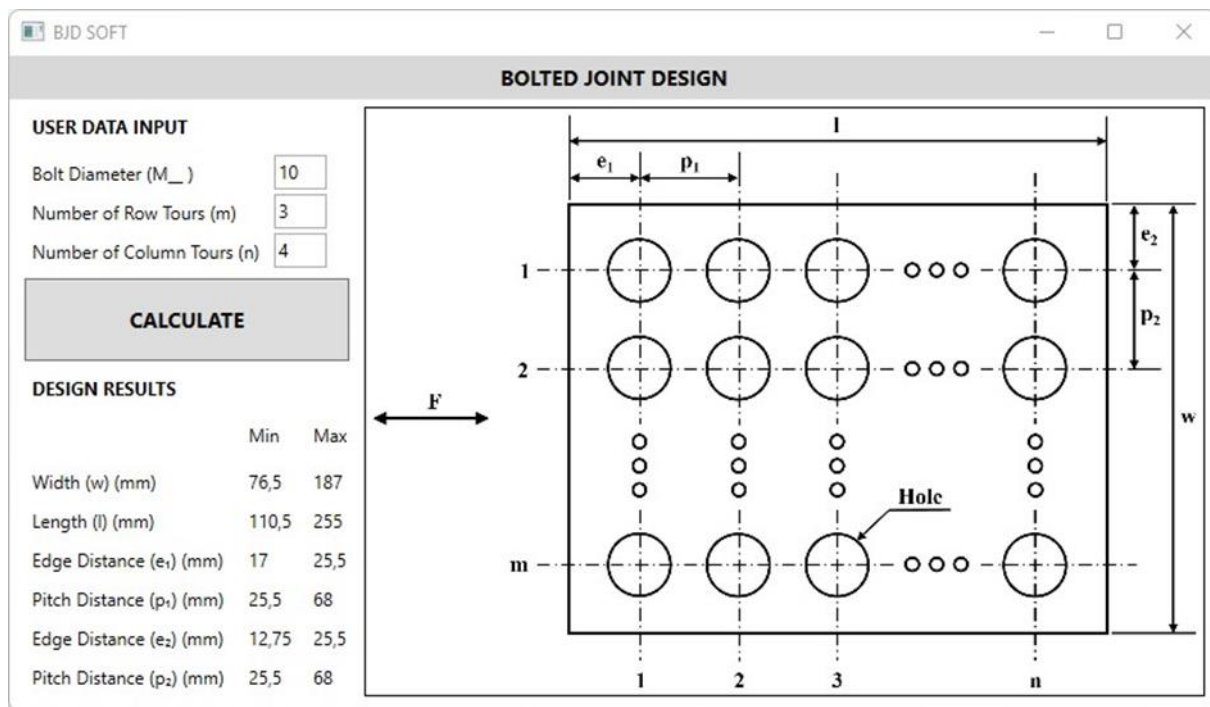


Figure 5. Example application - 1

In the developed software, the values calculated in the design results section were compared with the values found in the theoretical solutions. As a result of this comparison, it was seen that the outputs were compatible with each other.

3.1.2. Example Application - 2

In the bolted joint subjected to lateral load in the second example problem, 6 bolts are used. In the layout, the number of bolt tours in the row was arranged as 2 and the number of bolt tours in the column was arranged as 3. The plates were joined with M12 bolts. According to these data, it was requested to determine the bolt layout for the joint and to calculate the width and length values of the plates.

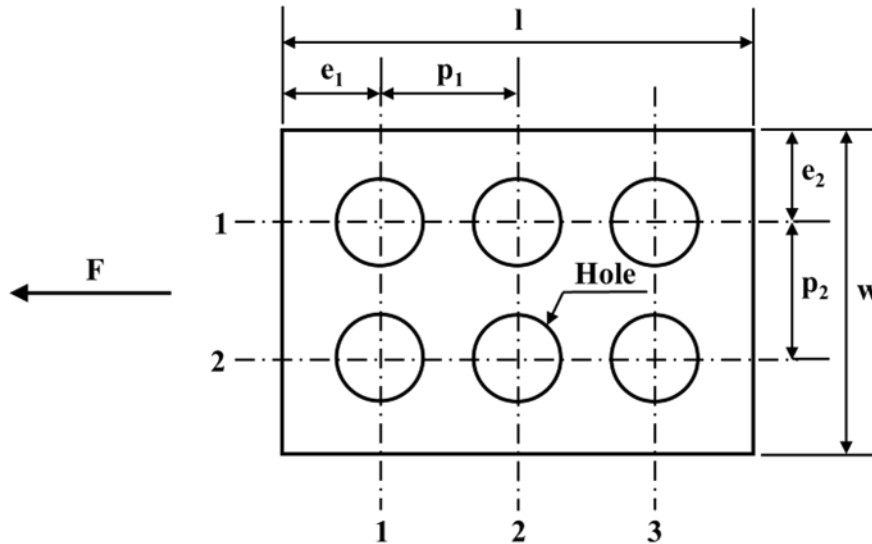


Figure 6. Example problem for bolted joint under lateral load - 2

For this data, the principle of bolt placement is used to calculate the placement of the bolts and the dimensioning calculations for the plates. The distances between the bolts (p_1 and p_2) and the distances of the bolts to the edges (e_1 and e_2) were calculated. For these values, plate width (w) and length (l) values were calculated. The process of calculating the minimum and maximum values for these design parameters is explained below.

Firstly, the unknown hole diameter (d_h) parameter was calculated with the help of the bolt diameter given in the example.

$$d_h = d * 0,85 = 12 * 0,85 = 10,2 \text{ mm} \quad (19)$$

This value was substituted in the following formulae and the design parameters for the placement of the bolts were calculated.

$$p_{1_{min}} = p_{2_{min}} = 3 * d_h = 3 * 10,2 = 30,6 \text{ mm} \quad (20)$$

$$p_{1_{max}} = p_{2_{max}} = 8 * d_h = 8 * 10,2 = 81,6 \text{ mm} \quad (21)$$

$$e_{1_{min}} = 2 * d_h = 2 * 10,2 = 20,4 \text{ mm} \quad (22)$$

$$e_{1_{max}} = 3 * d_h = 3 * 10,2 = 30,6 \text{ mm} \quad (23)$$

$$e_{2_{min}} = 1,5 * d_h = 1,5 * 10,2 = 15,3 \text{ mm} \quad (24)$$

$$e_{2_{max}} = 3 * d_h = 3 * 10,2 = 30,6 \text{ mm} \quad (25)$$

Using these design parameters, the minimum and maximum values of plate width (w) and length (l) were found.

$$w_{min} = 2 * e_{2_{min}} + 1 * p_{2_{min}} = 2 * 15,3 + 1 * 30,6 = 61,2 \text{ mm} \quad (26)$$

$$w_{max} = 2 * e_{2_{max}} + 1 * p_{2_{max}} = 2 * 30,6 + 1 * 81,6 = 142,8 \text{ mm} \quad (27)$$

$$l_{min} = 2 * e_{1_{min}} + 2 * p_{1_{min}} = 2 * 20,4 + 2 * 30,6 = 102 \text{ mm} \quad (28)$$

$$l_{max} = 2 * e_{1_{max}} + 2 * p_{1_{max}} = 2 * 30,6 + 2 * 81,6 = 224,4 \text{ mm} \quad (29)$$

After these procedures, the example problem in question was also implemented in the developed software. Verification was provided by comparing the outputs. In the user input field on the interface, the bolt diameter was entered as 12, the number of row tours was entered as 2 and the number of column tours was entered as 3. The Calculate button was clicked. Accordingly, the calculation process was performed automatically. In the design results section of the interface, the minimum and maximum values for the plate width (w) and length (l), the distances of the bolts to the edges (e_1 and e_2) and the distances between the bolts (p_1 and p_2) were reflected to the user.

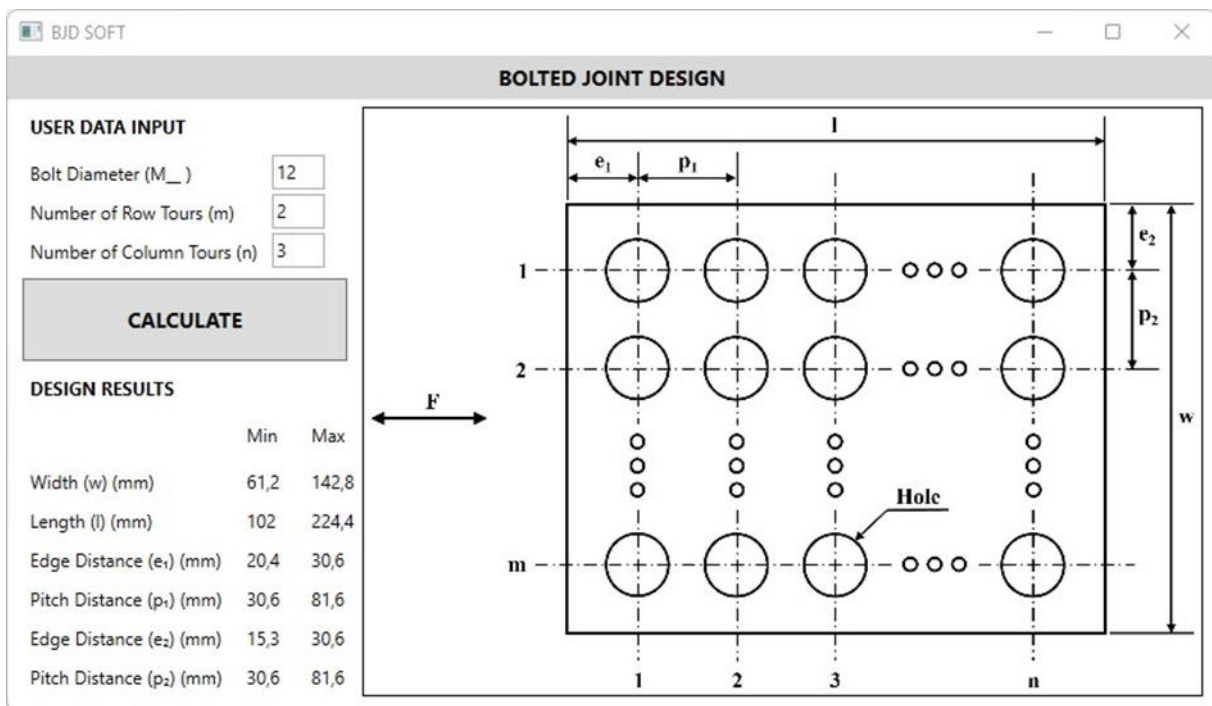


Figure 7. Example application - 2

The values calculated in the developed software and the values obtained from the theoretical solutions were compared. At the end of the comparison process, the outputs were found to be compatible.

4. Conclusions and Suggestions

In this study, a software was developed to automate and facilitate the design and optimization of bolted joints. A minimum number of inputs are received from the user and as a result, design options for the bolted joint are given as output. In this context, the principle of the placement of the bolts was taken as a basis. The results output by the software were compared with the results obtained with the theoretical solutions and it was concluded that they were compatible with each other.

In today's industry, labor and time losses occur in the design process, which is undesirable. In the present study, the user provides a small number of inputs for the design conditions and obtains design ranges for the optimum bolted joint by means of the software. Design calculations were performed instantaneously and results were generated. Different design options can be easily and quickly given as input to the software. Within the scope of the software, the principle of placement of fasteners for bolted joints was taken as a subject and a result-oriented structure was obtained with the software. The designed graphical user interface was easy to use with its clear and visual structure. According to these results, losses in the design process were prevented. By reaching the result with an easy and fast process, a significant amount of total time and labor saving was achieved. The design software developed effectively and efficiently performs the design and optimization of bolted joints for different placement layouts.

In line with this study, various studies can be carried out in the future. Studies can be carried out for different joint types such as riveted joints. The scope can be expanded with the applied forces and material properties of the elements used. Other loading conditions can be added. Joints with different geometries can be included. Artificial intelligence techniques such as machine learning can be applied.

Conflict of Interest

There is no conflict of interest between the authors.

References

- Asadi Taheri, M., Hajiali Mohammadi, A. & Alizadehnia, S. (2022). EF7 Engine Flywheel Bolted Joint Design Improvement By Theoretical and Experimental Investigations. *Engine Research.*, 48(48), 27-40.
- Bogis, H. A., Abou Ezz, A., Aljinaidi, A. A. & Akyurt, M. (2004). Computer-Aided Design of Riveted and Bolted Joints Under Compound Loading. Mechanical Engineering Department of King Abdulaziz University notes, Jeddah, Saudi Arabia, https://www.kau.edu.sa/files/320/researches/35125_20.pdf
- Cai, Y. & Young, B. (2019). Effects of End Distance on Thin Sheet Steel Bolted Connections. *Engineering Structures*, 196, 109331. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109331>
- Chutima, S. & Blackie, A. P. (1996). Effect of Pitch Distance, Row Spacing, End Distance and Bolt Diameter on Multi-Fastened Composite Joints. *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 27(2), 105-110. [https://doi.org/10.1016/1359-835X\(95\)00020-3](https://doi.org/10.1016/1359-835X(95)00020-3)
- Kiamanesh, R., Abolmaali, A. & Razavi, M. (2013). Effect of Circular Bolt Pattern on Behavior of Extended End-Plate Connection. *Journal of Structural Engineering*, 139(11), 1833-1841. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000765](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000765)
- Noda, N. A., Chen, X., Sano, Y., Wahab, M. A., Maruyama, H., Fujisawa, R. & Takase, Y. (2016). Effect of Pitch Difference Between The Bolt–Nut Connections Upon The Anti-Loosening Performance And Fatigue Life. *Materials & Design*, 96, 476-489. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.128>
- Öztekin, E. Ö. (2015). Investigation of Reliabilities of Bolt Distances For Bolted Structural Steel Connections By Monte Carlo Simulation Method. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(6), 213-223.
- Padhi, G. S., McCarthy, M. A. & McCarthy, C. T. (2002). BOLJAT: A Tool For Designing Composite Bolted Joints Using Three-Dimensional Finite Element Analysis. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(11), 1573-1584. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(02\)00113-6](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(02)00113-6)

- Palacios, C. G., Mansilla, D. T. & Arteaga, A. M. (2020). A Methodology For Optimizing Bolted Joint Design. *Investigación Tecnológica IST Central Técnico*, 2(1), 13-13.
- Piscan, I., Predinca, N. & Pop, N. (2012). Finite Element Analysis and Design Exploration of a Bolted Joint. *Advanced Materials Research*, 463, 1601-1604. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.463-464.1601>
- Rakotondrainibe, L., Desai, J., Orval, P. & Allaire, G. (2022). Coupled Topology Optimization of Structure and Connections For Bolted Mechanical Systems. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 93, 104499. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2021.104499>
- Romanov, V. S., Heidari-Rarani, M. & Lessard, L. (2021). A Parametric Study on Static Behavior and Load Sharing Of Multi-Bolt Hybrid Bonded/Bolted Composite Joints. *Composites Part B: Engineering*, 217, 108897. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108897>
- Yang, K. C., Hsu, R. J. & Hsu, C. F. (2013). Effect of end distance and bolt number on bearing strength of bolted connections at elevated temperature. *International Journal of Steel Structures*, 13, 635-644. <https://doi.org/10.1007/s13296-013-4005-y>
- SAE Technical Paper. (2013). Multi-Objectives Optimization of Fastener Location in a Bolted Joint (No. 2013-01-0966). <https://doi.org/10.4271/2013-01-0966>
- Saraç, İ. (2022). Cıvatalı Bağlantılarda Delik Toleransı ve Cıvata Sıkma Torku Değişiminin Bağlantı Dayanımına Etkilerinin Sayısal Olarak İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 37(2), 685-696. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.761996>
- TSE. (1980). Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları. Ankara, Türkiye, 648.

Araştırma Makalesi / Research Article

Askeri Araçlar için Fren Balatası Üretimi ve Frenleme Karakteristiğinin İncelenmesi

Cansu ENDES YILMAZ¹, İrem Yaren ÇAPKIN¹, Osman DALAR¹, Buse DEMİREL¹, Turgay YILDIRAN¹, İlker SUGÖZÜ^{2*}

¹ Beşer Balata, İzmir, TÜRKİYE

² Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mersin, TÜRKİYE
cansu.yilmaz@beser.com.tr, yaren.capkin@beser.com.tr, osman.dalar@beser.com.tr, buse.demirel@beser.com.tr,
turgay.yildiran@beser.com.tr, ilkersugozu@mersin.edu.tr

Received/Geliş Tarihi: 03.11.2023

Accepted/Kabul Tarihi: 12.12.2023

Özet: Bu çalışmada, askeri araçlar için özel koşullara uygun fren balatası üretimi ve bu balataların frenleme karakteristiklerinin incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Ek olarak, özel çalışma koşullarına sahip askeri tanklar için ideal bir frenleme sistemi oluşturmak amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, askeri tanklarda kullanılmak üzere balata formülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiş ve sıcak basım yöntemiyle üretilen fren balatalarının performansı Chase ve Dinamometre testleriyle değerlendirilmiştir. Ayrıca, fırınlama işlemi öncesi ve sonrasında kimyasal testlerle balata özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Askeri araçların güvenliği ve etkinliği için kritik bir bileşen olan fren balatasının yapılan testler sonucu F grubu balata standardında yer aldığı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, balata malzemesinin özelliklerindeki değişimleri ve balatanın frenleme performansının belirlenmesini sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Dinamometre testi, Fren balata üretimi, Tank balataları

Brake Pad Production and Braking Characteristics Analysis for Military Vehicles

Abstract: In this study, the production of brake pads suitable for special conditions for military vehicles and the examination of the braking characteristics of these pads were carried out. In addition, it is intended to create an ideal braking system for military tanks with special operating conditions. In this direction, pad formulation studies were carried out for use in military tanks and the performance of brake pads produced by hot pressing method was evaluated with Chase and Dynamometer tests. Additionally, the pad properties were examined in detail with chemical tests before and after the baking process. As a result of the tests, it has been determined that the brake pad, which is a critical component for the safety and effectiveness of military vehicles, is included in the F group pad standard. The results obtained enabled the changes in the properties of the pad material and the braking performance of the pad to be determined.

Keywords: Dynamometer test, Production of brake pad, Tank brake pads

1. Giriş

Uçak, araba, motosiklet, tır ve çeşitli makineler dahil olmak üzere hareketli tüm ekipmanların yavaşlatılması veya durdurulması için frenleme sistemleri kullanılmaktadır. Fren sistemlerinin en önemli parçaları disk ve balata çiftidir. Fren balataları kaliper içerisine yerleştirilir, tekerleklerin dönmesi ile birlikte dönen disk üzerinde yer alan kaliper frenleme esnasında içerisinde yer alan piston ile fren balatalarını disk yüzeyine iterek sürtünme ile frenlemeyi sağlar. Frenleme sırasında kinetik enerji, sürtünme ile termal enerjiye dönüştürülerek aracın durması sağlanır (Yılmaz, 2022).

Gelişen teknolojiye bağlı olarak araç fren sistemleri günden güne değişmektedir. Fren balatalarının performansı ve ömrü kullanıldıkları araç türüne, yol güzergâhına, iklim şartları ve taşınan yüke bağlı

olarak çalışma koşullarına göre değişkenlik göstermektedir. Fren balatalarının istenilen özellikleri sağlamalarında malzeme seçimi oldukça önemli bir kriterdir. Temel fren balata bileşenleri bir aracın hızını azaltmak veya durdurmak için kullanılan malzemelerden oluşmaktadır. Birden fazla malzemenin bir araya gelmesi ile oluşan fren balataları kompozit bir yapıya sahiptir. Fren balata malzemeleri; tribolojik, mekanik, fiziksel ve termal özelliklere sahip olması ve çevreye zarar vermeyen malzemelerden oluşması gerekmektedir (Ünaldı ve Kuş, 2018). Fren balatalarında kullanılan malzemeler genel kapsamda 4 gruptan oluşmaktadır; sürtünme düzenleyiciler, dolgu, bağlayıcı ve takviye edici malzemelerdir. Sürtünme düzenleyici malzemelerinin yapısında aşındırıcı ve yağlayıcı özelliklere sahip malzemeler bulunur. Aşındırıcı malzemeler, fren balatasının sürtünme katsayısını arttırmak ve yüzeyin aşınmasını sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Genellikle aşındırıcı malzeme olarak oksit grupları (alüminyum oksit, magnezyum oksit), sarı talaş, zirkonyum silikat, bor karbür ve çelik yünü kullanılmaktadır (Yavuz ve Bayrakçeken, 2022; Yavuz, 2023). Yağlayıcı malzemeler, fren balatalarında sürtünme katsayısını yüksek sıcaklıklarda stabil tutma, titreşim sönümlenme, aşınma miktarının kontrolünü sağlama ve ses problemini önleme amacıyla kullanılmaktadır. Dolgu malzemelerinin ise en önemli kullanım amacı maliyet düşürmedir. Buna ek olarak, fren balatalarında boşluk doldurucu olarak kullanılırlar. Çoğunlukla dolgu malzemesi olarak barit kullanılmaktadır. Barite ek olarak vermikülit, mika ve talk kullanılmaktadır. Bağlayıcı malzeme olarak genellikle fenolik reçine kullanılmaktadır. 1980'li yıllara kadar istenilen mekanik özellikleri karşıladığından dolayı asbest türü lifli malzemeler kullanılmıştır. Ancak asbest türü lifli malzemelerin çevreye ve insan sağlığına zararlı olduğunun belirlenmesiyle bu malzemelerin kullanımı yasaklanmıştır. Bu nedenle asbest türü lifli malzemeler yerine pamuk, metal, mineral veya organik malzemeler tercih edilmiştir. Bu bağlayıcı malzemelerin kullanım amacı balatayı bir arada tutmak ve kararlı bir matris yapısını oluşturmaktır (Sugözü, 2018). Takviye edici malzemeler, fren balatalarına iyi aşınma direnci, mekanik dayanım ve termal kararlılık sağlamak amacı ile kullanılmaktadır. Genellikle cam elyaf, aramid, çelik yünü, taş yünü ve seramik malzemeler takviye edici malzemeler olarak tek başına ya da farklı bileşimlerle birlikte bir arada kullanılmaktadır. Fren balatalarında kullanılan malzemelerin, düşük aşınma oranlarına, yeterli mekanik dayanıklılığına ve düşük nem hassasiyetine sahip olmaları önem taşımaktadır. Buna ek olarak, bu malzemelerinin, taşıtlar için performans artırıcı bileşenleri içermesi ve formülasyonunun optimize edilmesi önem taşımaktadır. Fren balata malzemesi farklı özellikleri içeren 5 ila 20 farklı malzemenin karışımı ile farklı teknikler kullanılarak üretilmektedir. Fren balata oluşumunda kullanılacak malzemeler farklı devir ve zaman aralıklarını içeren ve farklı ağırlık oranlarındaki bir karıştırıcı ile karıştırılır. Hazırlanan karışım, farklı basınç, sıcaklık ve zaman aralıklarında sadece sıcak veya soğuk/sıcak kalıplama yöntemleri kullanılarak fren balata üretimi gerçekleştirilir. Farklı çalışmalarda, üretim yöntemlerine ek olarak kütleme ve sinterleme işlemleri de gerçekleştirilmiştir. Fren balataları üretimi ile ilgili yapılan çalışmalarda birçok seçenek bulunmasına rağmen araç üreticileri için güvenlik ve optimum çalışmayı sağlamak amacı ile uygun balata malzemesinin seçiminin dikkatli yapılması gerekmektedir. Bu seçim sırasında sürtünme katsayısına ve daha az aşınmaya sahip olan malzemelerin seçimi önem taşımaktadır (Yavuz, 2023; Sugözü, 2018; Lawal vd., 2019).

Fren balatalarında aranan en önemli özellik sürtünme katsayısı ve aşınma direncidir. Sürtünme katsayısı, fren balatalarının frenleme işlemi sırasında aracı yavaşlatmak veya durdurmak amacıyla fren diskine veya fren tamburuna baskı yapmasıyla meydana gelen sürtünme kuvvetinin büyüklüğünü ifade eder (Sugözü ve Sugözü, 2020). Fren balatalarında sürtünme katsayısı değerinin yüksek, ancak aşınma değerinin düşük olması gerekmektedir. Ayrıca fren balatasını oluşturan malzemelerin diski kısa süre içerisinde aşındırmaması da önemli olan diğer bir faktördür. Sürtünme katsayısı bazı faktörlere (fren balatasının malzemesi, yüzey özellikleri vb.) bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Frenlemeden dolayı sıcaklığın artmasıyla sürtünme katsayısında azalma meydana gelir (Abutu vd., 2018). Bu azalmanın minimum seviyede olması beklenir (Sugözü ve Sugözü, 2018; Egeonu vd., 2015). Bu nedenle, fren balatalarının sürtünme katsayısının yüksek sıcaklıklarda stabil olması gerekmektedir (Abutu vd., 2018). Literatüre bakıldığında; birçok araştırmacı tarafından istenilen

özelliklere sahip fren balatalarının yenilikçi malzemelerin araştırılması, farklı içeriklere sahip formülasyon denemeleri ile kararlı yapıya sahip fren balatası üretimi üzerine birçok araştırma yapıldığı görülmektedir (Chauhan vd., 2021; Jeganmohan ve Sugözü, 2020; Krishnan vd., 2021). Engebeli arazi, uygun olmayan yol güzergahları gibi gerek araç tipi gerekse taşınan yük açısından yüksek ağırlıklara dayanıklı ve dolayısı ile binek araçlar ile karşılaştırıldığında özel çalışma koşullarına sahip askeri tank vb. araçlar için fren balatası üretilmesi konusunda bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmada, özel çalışma koşullarına sahip askeri tanklarda kullanılmak üzere geliştirilen balata formülasyonu sıcak basım yöntemi ile üretilmiştir. Özel şartlara sahip olan askeri araç tank balatalarının yüksek sürtünme katsayısı, zor çalışma koşulları altında stabil ve kararlı bir yapıda kalma gibi gereksinimleri karşılama performansları Chase sürtünme ve Dinamometre aşınma testleri ile belirlenmiştir. Ayrıca, fırınlama işlemi öncesi ve fırınlama işlemi sonrasında kimyasal ve fiziksel testler ile balatanın özellikleri incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada savunma sanayiinde kullanılan tank tipi araçlara uygun fren balatalarının üretimi için yeni formülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Balata içeriğini oluşturan malzemeler ve görevleri

Malzeme adı	Görevi
Fenolik reçine	Bağlayıcı
Aramid	Dayanım
Grafit	Yağlayıcı
Sürtünme tozu	Dolgu malzemesi
Oksit grupları	Aşındırıcı
Çelik tozu	Aşındırıcı
Petrol koku	Yağlayıcı
Kireç	Dolgu malzemesi
Çinko tozu	Aşındırıcı
Sarı talaş	Aşındırıcı
Metal sülfid karışımı	Aşındırıcı

Oluşturulan formülasyonda; yüksek sıcaklıklarda oksidasyon direnci sağlayan, termal kararlılığı yüksek olan bağlayıcı malzeme fenolik reçine, mekanik dayanımı artırması amacı ile aramid, sertlik, termal kararlılık ve kararlı sürtünme katsayısı özellikleri sağlaması nedeniyle ise takviye edici malzemeler kullanılmıştır. Hacmi arttırmak ve maliyeti azaltmak için dolgu malzemeleri, sürtünmeyi stabilize etmek için sürtünme ayarlayıcı malzemeler istenilen kriterleri elde etmek amacı ile seçilmiştir. Balata içeriği Tablo 1’de verilmiştir.

Balata üretim prosesinin ilk aşaması olan malzeme karışımının hazırlanmasında kullanılan hammaddeler sıra ile tartılmış, ilk olarak aramid karıştırıcıya aktarılıp 4 dk karıştırılmış ve sonrasında bütün hammaddeler karıştırıcıya eklenerek 6 dk boyunca karıştırılmıştır. Elde edilen karışımın; bulk yoğunluğu, nem, aseton ve kül testleri gerçekleştirilerek formülasyona ait toz malzemelerin karışımdaki etkisini belirlemek için kimyasal özellikleri incelenmiştir. Balata üretim işlemi toz metalürji yöntemi olan sıcak pres ile Tablo 2’de verilen üretim koşullarında gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. Balata üretim parametreleri

Gösterge Basıncı (bar)	60
Deney Basıncı (bar)	490
Sıcaklık (°C)	150

Balata üretimi sonrasında fırınlama işlemi; 125°C’de 30 dk., 150°C’de 120 dk. ve 200°C’de 120 dk. olmak üzere üç farklı kademede 2.2°C/dk artış ile toplamda 6 saatte gerçekleştirilmiştir. Fırınlama öncesi ve sonrası yoğunluk, aseton ekstraksiyon, kül miktarı ve kalınlaşma ölçümleri yapılarak balatanın fiziksel/kimyasal özellikleri belirlenmiştir. Fırınlama işlemi sonrası balataların Şekil 1’de gösterilen Chase sürtünme cihazı ile sürtünme katsayıları ve Şekil 2’de verilen aşınma test cihazı ile aşınma oranları SAE J661 ve TS 555 standartlarında belirlenen kriterlere uygun olarak belirlenmiştir (TS 555, 2019; SAE J661, 2021).



Şekil 1. Sürtünme test cihazı ve numune balata görseli



Şekil 2. Aşınma test cihazı ve numune balata görseli

Sürtünme testi için çalışma kapsamında üretilen balata kare blok halinde kesilerek balatanın üç farklı noktadan kalınlığı ve ağırlığı ölçülmüş sonra zımpara ile yüzey alıştırma işlemi uygulanmıştır (SAE

J661, 2021). Sonrasında balata, aşınma test cihazına takılarak bilgisayarda SAE J661 standardının tanımlı olduğu program üzerinden testler yapılmıştır. Test tamamlandıktan sonra kalınlık ve ağırlık ölçümü yapılmış ve aşınma miktarı belirlenmiştir.

Fren balatasının kalınlaşma deneyi TS 555'e göre yapılmıştır (TS 555, 2019). Balata temas yüzeyleri zımparalanmış ve balata taşıyıcısının kaplaması çıkartılmıştır. Balata üzerindeki iki farklı noktadan ortam sıcaklığında kalınlık ölçülmüş ve işaretlenmiştir. 300°C sıcaklıkta balata yüzeyi fırın cidarına değecek şekilde balata yerleştirilmiş ve 10 dakika fırında bekletilmiştir. İşlem sonrası balata fırından çıkarılmış 30 saniye içerisinde daha önce işaretlenmiş iki noktadan ölçüm yapılarak kalınlık farkı elde edilmiş ve balata kalınlaşma değeri belirlenmiştir.

3. Bulgular

Savunma sanayiinde kullanılan tank tipi araçlar; binek, hafif ticari ve ağır vasıta araç türlerine kıyasla daha özel şartlarda çalışmaktadır. Kullanım amacı gereği, yük açısından oldukça ağır ve zorlu arazi şartlarında kullanılmaktadır. Kompozit fren balatalarının sürtünme katsayıları, dayanım güçleri ve ömürleri, yol, arazi, iklim koşulları ve taşınan yük vb. parametrelere göre değişkenlik göstermektedir. Çalışma kapsamında, özel çalışma koşullarına sahip askeri tanklarda kullanılmak üzere üretilen sıcak basım fren balatalarının frenleme performansları gerçekleştirilen kimyasal ve fiziksel testler ile belirlenmiştir.

Fren balatasının kimyasal özellikleri, içerdikleri hammaddelere ve üretim koşullarına göre değişkenlik göstermektedir. Balatanın tribolojik ve morfolojik özelliklerini etkilemesi nedeni ile kimyasal analizler önem taşımaktadır. Tablo 3'te çalışma kapsamında üretilen balatalara ait fırınlama işlemi öncesi ve sonrası olmak üzere gerçekleştirilen analiz sonuçları verilmiştir.

Tablo 3. Balata analiz sonuçları

ANALİZ	Fırın öncesi	Fırın sonrası
Yoğunluk (g/cm ³)	2,82	2,74
Aseton Ext. (%)	1,16	2,20
Kül Miktarı (%)	91,03	89,58
Kalınlaşma (%)	-	0,37

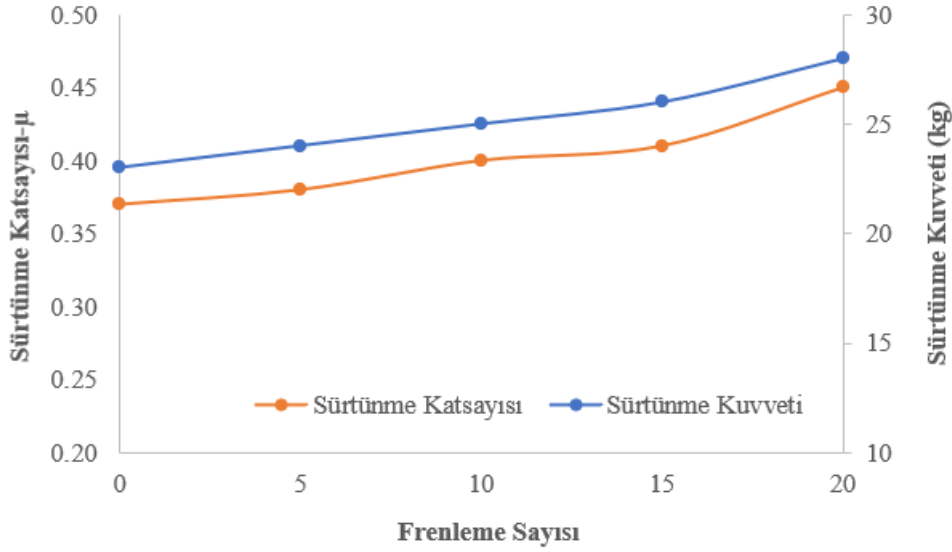
Fırınlama sonrası balata yoğunluğunun ve kül miktarının azaldığı görülmüştür. Bu durumun fırınlama sonrası balata kombinasyonundaki malzeme içeriğine bağlı olarak balata içerisindeki boşlukların (porozite) azalmasından kaynaklanabileceği literatürde belirtilmiştir (Yavuz ve Bayrakçeken, 2022; Yavuz, 2023; Sugözü, 2018).

Balata kalınlaşma deneyi sonucunda üretilen balatanın kalınlaşma test sonucu %0.37 bulunmuştur. Standartta balata kalınlaşmasının balata kalınlığının %1'inden fazla olmaması gerekmektedir (TS 555, 2019). Test sonucu balata kalınlaşma değerinin standart değerinde olduğu belirlenmiştir.

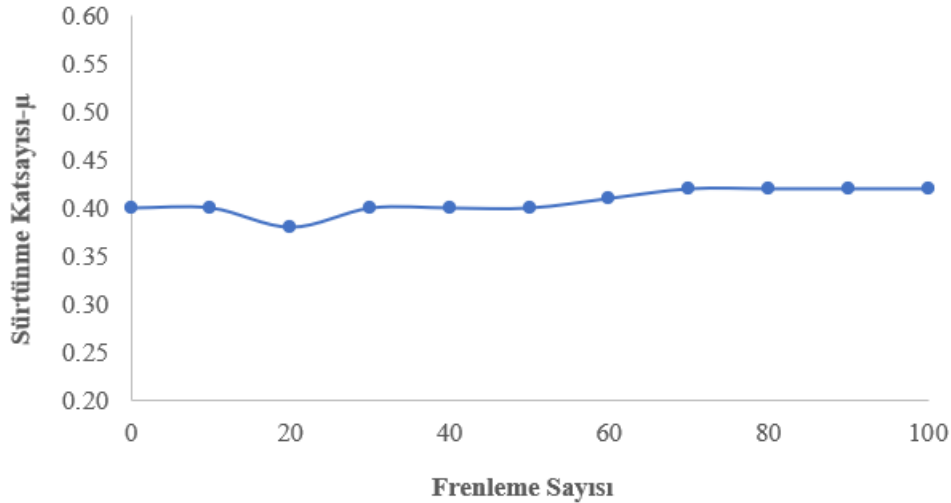
Sürtünme katsayısı ve aşınma değerleri balatanın performansını belirlemektedir. Otomotiv endüstrisinde sürtünme katsayısının yüksek, aşınma oranının ise düşük olması ve farklı sıcaklıklarda sürtünme katsayısının sabit olması istenir (Yavuz, 2023; Sugözü, 2018; Lawal vd., 2019). Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'te çalışma kapsamında üretilen balatanın sürtünme test sonuçları yer almaktadır.

50 km/h hızda, 25 kg sürtünme kuvvetinde ve 100 frenleme yapılarak elde edilen sürtünme katsayısı değişimi Şekil 3'te verilmiştir. Şekil incelendiğinde frenleme sayısına bağlı olarak sürtünme katsayısı sürtünme kuvveti ile orantılı olarak düzenli bir şekilde artmıştır. Sürtünme katsayısının sürtünme kuvvetine bağlı olarak artması; balata sürtünme yüzeyinin tamamının disk yüzeyine temas etmesi,

sürtünme tabakası oluşumu ve balatanın disk yüzeyinde oluşturduğu baskı kuvvetinin etkisi olarak söylenebilir (Sugözü ve Sugözü, 2020).



Şekil 3. Frenleme sayısına bağlı olarak Sürtünme Katsayısı ve Sürtünme Kuvveti değişimi

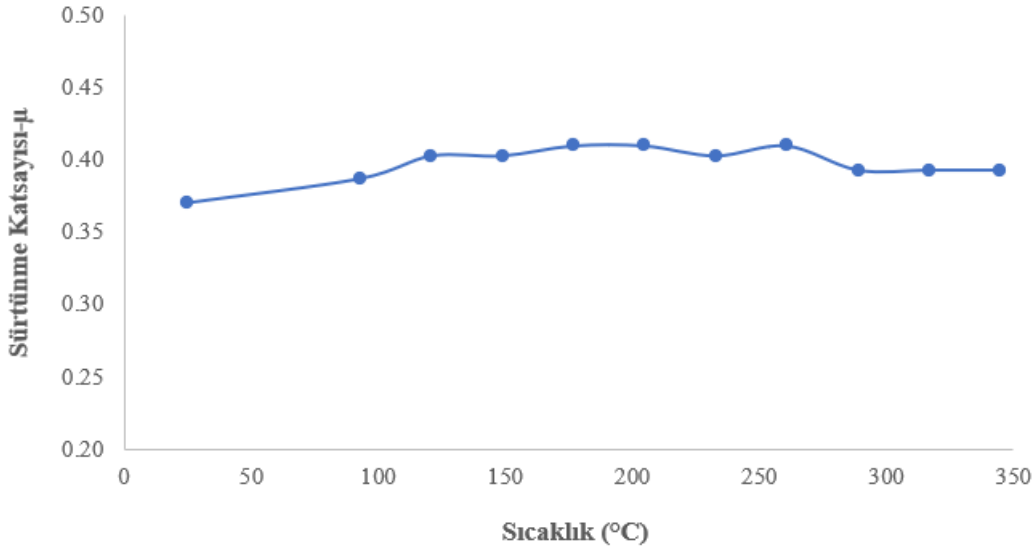


Şekil 4. Frenleme sayısına bağlı olarak Sürtünme Katsayısı değişimi

Şekil 4, 50 km/h hız, 30 kg sürtünme kuvveti altında 100 frenleme yapılarak elde edilen sürtünme katsayısı değişimini göstermektedir. Şekil incelendiğinde 20 frenlemeden sonra sürtünme katsayısında artış görülmüştür. 20 frenleme sonrası balata yüzeyinin disk yüzeyine tamamen temas etmesine bağlı olarak sürtünme tabakası oluşmuş ve sürtünme katsayısını arttırmıştır (Sugözü ve Sugözü, 2020; Sugözü ve Sugözü, 2020; Egeonu vd., 2015). Sürtünme kuvveti arttıkça balatanın disk yüzeyine baskı kuvveti artmakta bu durum sürtünme katsayısının artmasına neden olmaktadır (Sugözü ve Sugözü, 2020; Egeonu vd., 2015). 20 frenlemeye kadar balata ile disk yüzey örtüşmesine bağlı olarak sürtünme katsayısı alışma süreci sergilemiş, 20 frenlemeden sonra balatanın disk yüzeyi ile örtüşmesine bağlı olarak sürtünme katsayısı şekillenmiştir (Sugözü ve Sugözü, 2020). 70 frenlemeden sonra balata ile disk yüzeyinin tamamen örtüşmesine bağlı olarak sürtünme katsayısı stabil bir hal almıştır.

Şekil 5, 50 km/h hız, 25 kg sürtünme kuvveti ve 100 frenleme yapılarak elde edilen sürtünme katsayısı-sıcaklık değişimini göstermektedir. Balata yüzeyinin disk yüzeyine tamamen örtüşmesine

bağlı olarak sürtünme katsayısı sıcaklık şekillenmiştir (Sugözü, 2018; Lawal vd., 2019; Sugözü ve Sugözü, 2020; Sugözü ve Sugözü, 2020). Fren balatalarında sürtünme katsayısı sıcaklık ile orantılı bir şekilde değişim göstermektedir (Sugözü, 2018; Lawal vd., 2019; Sugözü ve Sugözü, 2020; Sugözü ve Sugözü, 2020; Egeonu vd., 2015). Sürtünme katsayısı arttıkça disk yüzeyindeki sürtünme kuvvetine bağlı olarak sıcaklıkta artmaktadır. Oluşan sıcaklık artışına bağlı olarak sürtünme katsayısının yükselmesi daha sonra stabil bir şekil alması istenen durumdur. Sürtünme katsayısı eğrilerindeki dalgalanmalar, temas sırasında disk yüzeyindeki temas alanlarının iç kısmına doğru sıcaklığın sürekli değişmesinden kaynaklanmaktadır. Bu etki sürtünme katsayısının sürekli olarak azalmasına ve artmasına neden olmaktadır (Yavuz, 2023; Sugözü, 2018; Lawal vd., 2019; Sugözü ve Sugözü, 2020; Sugözü ve Sugözü, 2020; Egeonu vd., 2015). Çalışma kapsamında üretilen fren balatasının ortalama sürtünme katsayısı 0.40 olarak bulunmuş ve F sürtünme sınıfına dahil olduğu saptanmıştır (SAE J866, 2019).



Şekil 5. Sürtünme Katsayısı sıcaklık değişimi

Tablo 4. Balatanın deney öncesi ve sonrası fiziksel özellikleri

	Ağırlık (g)	Kalınlık (mm)
Deney öncesi	17,07	7,65
Deney sonrası	17,00	7,58
Fark	0,07	0,07

Aşınma testi sonrası balata kalınlığı ve ağırlığı ölçülmüş, aşınma miktarı belirlenmiştir. Test sonuçları Tablo 4'te verilmiştir. Sürtünme testi sonrası balata ağırlığında %0.40, balata kalınlığında ise %0.90 azalma meydana gelmiştir. Kalınlaşma değeri her durumda balata kalınlığının %1'inden fazla olmamalıdır (TSE 555, 2019). Deney sonrası balata kalınlaşma değeri %1 standart değer aralığındadır.

Güvenlik ve frenleme performansı, malzeme aşınma oranından doğrudan etkilenebilir. Dolayısıyla, aşınma testleri fren balatası performansını belirlemek için kullanılan en önemli testler arasındadır. Tribolojik sistemler aşınma ve sürtünme ile oluşan teknik sistemlerdir. Frenleme tribolojik bir olaydır, dolayısıyla fren balatası performansının değerlendirilmesinde aşınma-sürtünme testi oldukça önemlidir (Akıncıoğlu vd., 2021).

Dinamometre testi temelde simülasyon testi olarak tanımlanabilir. SAE J661 ve TSE 555 standartları göz önüne alınarak gerçekleşen testte fren balatasının farklı sıcaklık ve frenleme sayıları karşısında sürtünme katsayısındaki değişim incelenmektedir. Şekillerden de görüldüğü üzere; değişken parametreler karşısında sürtünme katsayısı kararlı bir yapı sergilemiştir. Artan sıcaklık ile malzeme

matrisine bağlı olarak sürtünme katsayısı değişkenlik göstermektedir (Sugözü, 2018; Lawal vd., 2019; Sugözü ve Sugözü, 2020; Sugözü ve Sugözü, 2020). Grafikler incelendiğinde artan sıcaklık ile sürtünme katsayısında kabul edilebilir düzeyde azalma meydana gelmekte sonrasında ise stabil bir şekilde devam etmektedir. Bu durum, fren balatasının sahip olduğu kompozit matris yapısının kararlılığını göstermektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, özel çalışma koşullarına sahip askeri tanklarda kullanılmak üzere oluşturulan balata formülasyonu sıcak basım yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen fren balatasının frenleme karakteristiği ve performansı kimyasal ve fiziksel testler ile belirlenmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda listelenmiştir:

- Üretilen fren balatalarının yoğunluk değerleri standart aralıkta bulunmuştur.
- Fren balatalarında kalınlaşma balata kalınlığının %1'inden fazla olmamalıdır, çalışma kapsamında üretilen balatanın kalınlaşma test sonucu 0.07 mm bulunmuştur. Standart değerde olduğu belirlenmiştir.
- Dinamometre testleri sonucu farklı frenleme sayısı ve sıcaklık değerlerinde sürtünme katsayısının sabit kaldığı belirlenmiştir.
- Artan sıcaklık karşısında balatanın kompozit matrisinin kararlı bir yapı sergilediği belirlenmiştir.
- Sürtünme testi sonrası balata ağırlığında %0.40 balata kalınlığında ise %0.90 azalma meydana geldiği ve standart aralıkta olduğu belirlenmiştir.
- Çalışma kapsamında üretilen fren balatasının ortalama sürtünme katsayısının 0.40, sürtünme sınıfının ise F olduğu belirlenmiştir.

Üretilen fren balata formülasyonunun farklı arazi ve uygun olmayan yol şartlarında askeri araç olarak kullanılan yüksek ağırlıklı tanklar için uygun olduğu belirlenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Kaynaklar

Abutu, J., Lawal, S.A., Ndaliman, M.B., Lafia-Araga, R.A., Adedipe, O. & Choudhury, I.A. (2018). Production and Characterization of Brake Pad Developed From Coconut Shell Reinforcement Material Using Central Composite Design. *SN Applied Sciences*, 1(82). Doi: 10.1007/s42452-018-0084-x.

Akincioğlu, G., Akincioğlu, S., Öktem, H. & Uygur, İ. (2021). Brake Pad Performance Characteristic Assessment Methods. *International Journal of Automotive Science and Technology*, 5(1), 67-78. Doi: 10.30939/ijastech..848266.

Chauhan, V., Bijwe, J. & Darpe, A. (2021). Functionalization of Alumina Particles to Improve the Performance of Eco-Friendly Brake-Pads, *Friction*, 9, 1213–1226.

Egeonu, D., Oluah, C. & Okolo, P. (2015). Production of Eco-Friendly Brake Pad Using Raw Materials Sourced Locally In Nsukka. *Journal of Energy Technologies and Policy*, 5(11), 47-54.

Jeganmohan, S., & Sugoza, B. (2020). Usage of Powder Pinusbrutia Cone and Colemanite Combination in Brake Friction Composites as Friction Modifier. *Materials Today: Proceedings*, 27(3), 2072-2075.

- Krishnan, G. S., Kumar, S., Suresh, G., Akash, N., Kumar, V. S. & David, J.P. (2021). Role of Metal Composite Alloys in Non-Asbestos Brake Friction Materials-A Solution for Copper Replacement. *Materials Today: Proceedings*, 45, 926-929.
- Lawal, S.S., Ademoh, N.A., Bala, K.C. & Abdulrahman, A.S. (2019). A Review of the Compositions, Processing, Materials and Properties of Brake Pad Production. *Journal of Physics:Conference Series*, 1378. Doi: 10.1088/1742-6596/1378/3/032103.
- SAE J661, (2021). Brake Lining Quality Test Procedure, SAE International, Warrendale, USA.
- SAE J866, (2019). Friction Coefficient Identification and Environmental Marking System for Brake Linings, SAE International, Warrendale, USA.
- Sugözü, B. (2018). Investigation of Ulexite Usage in Automotive Brake Friction Materials. *Turkish Journal of Engineering*, 2 (3), 125-129. Doi: 10.31127/tuje.403215.
- Sugözü, B. & Sugözü, İ. (2020). Investigation of the Use of a New Binder Material in Automotive Brake Pad. *International Journal of Automotive Science and Technology*, 4(4), 258-263.
- Sugözü, B. & Sugözü, İ. (2020). Investigation of Usage of Milled Pine Cone in Brake Pads. *International Journal of Automotive Science and Technology*, 4(4), 253-257.
- TSE 555, (2019). Karayolu Taşıtları-Fren Sistemleri-Balatalar- Sürtünmeli Frenler için Balatalar, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Ünaldı, M. & Kuş, R. (2018). The Determination of The Effect of Mixture Proportions and Production Parameters on Density and Porosity Features of Miscanthus Reinforced Brake Pads by Taguchi Method. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 7(1), 48-57.
- Yavuz, H. (2023). An Experimental Case Study on The Comparison of The Use of Micronized Quartz and Alumina in Brake Pads. *Turkish Journal of Nature and Science*, 12 (3) ,9-14. Doi: 10.46810/tdfd.1291333.
- Yavuz, H. & Bayrakçeken, H. (2022). Investigation of Friction and Wear Behavior of Composite Brake Pads Produced with Huntite Mineral. *International Journal of Automotive Science and Technology*, 6 (1) ,9-16. Doi: 10.30939/ijastech..1022247.
- Yılmaz, A.C. (2022). Effects of Fly Ash Introduction on Friction and Wear Characteristics of Brake Pads. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 11(3), 96-103. Doi: 10.18245/ijaet.1108124.

Araştırma Makalesi / Research Article

Şekil Hafızalı Alaşımlar ile Titreşim Sönümleyici Plak Tasarımı

Oğuzhan NAZLIM^{1*}, Ahmet TAŞKESEN¹

¹ Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Ankara, TÜRKİYE
oguzhan.nazlim@gazi.edu.tr, taskesen@gazi.edu.tr

Received/Geliş Tarihi: 26.11.2023

Accepted/Kabul Tarihi: 27.12.2023

Özet: Kendilerine özgü karakteristik özelliklere sahip olan Şekil Hafızalı Alaşımlar (ŞHA), son yıllarda üzerinde en çok çalışma gerçekleştirilen malzemeler olarak dikkati çekmektedir. Bu alaşımların Aktif Titreşim Sönümleyici (ATS) olarak tasarlanması, üretilmesi ve kullanımı ile ilgili bilgi vermek amacı ile hazırlanan bu makalede şekil hafızası mekanizması, titreşim sönümleme yeteneği ve ŞHA'ların kullanım alanlarından bahsedilmiştir. Materyal Metot kısmında NiTi ve cam fiber katkı, epoksi matris malzemeli ince dikdörtgen bir ATS plağın üretim aşamalarına ışık tutulmuştur ve üretim değişkenleri tablo halinde sunulmuştur. ŞHA katkılı ATS plağın üretim öncesi test faaliyetlerinden bahsedilmiş ve üretim sürecinin her adımını kapsayan detaylı bir akış şeması (metodolojisi) geliştirilmiştir. Bulgular ve Tartışma kısmında, ŞHA takviyeli ATS üretiminde önerilen metodolojinin kritik bir rehber olarak işlev göreceği belirtilmiştir. Deney ve sonuç eleman titreşim verileri grafikler ile sunulmuş ve yorumlanmıştır. Çalışmanın sonuç bölümünde, akış şemasının oluşturulmasının önemi vurgulanmış ve bu metodoloji sayesinde ATS üretimi kolay ve anlaşılır hale getirilmiştir. Önerilen metodoloji ile üretilmiş olan plak gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aktif titreşim sönümleyici, Kompozitler, Nitinol, Titreşim deneyi

Design of Vibration Damping Plates with Shape Memory Alloys

Abstract: Shape Memory Alloys (SMAs), characterized by their unique properties, have been the focus of extensive research in recent years. This article aims to provide information on the design, production, and application of these alloys as Active Vibration Dampers (AVDs). It mentions the mechanism of shape memory, the vibration damping capabilities, and the various applications of SMAs. The Material and Methods section sheds light on the production stages of a thin rectangular AVD plate made of NiTi and glass fiber-reinforced, epoxy matrix material, with the production variables presented in a table format. The pre-production testing activities of the SMA-reinforced AVD plate are described, and a detailed flowchart (methodology) covering each step of the production process has been developed. In the Findings and Discussion section, it is stated that the proposed methodology in the production of SMA-reinforced AVD will serve as a critical guide. Experimental and finite element vibration data are presented and interpreted through graphs. In the conclusion part of the study, the importance of creating a flow chart is emphasized and thanks to this methodology, ATS production is made easy and understandable. The plate produced with the proposed methodology is shown.

Keywords: Active vibration damping, Composites, Nitinol, Vibration experiment

1. Giriş

Şekil Hafızalı Malzemeler, fiziksel deformasyonlara maruz kaldıktan sonra dışarıdan ısı alımı ile ilk fiziksel hallerine geri dönebilen malzemelerdir. Bu malzemeler polimer ya da alaşım formundadır. Şekil Hafızalı Alaşımlar (ŞHA) ise özel termomekanik yöntemlerle işlenerek belirli sıcaklık değişikliklerine fiziksel tepki verecek şekilde tasarlanmış metal alaşımlardır.

ŞHA malzemelerin kendilerine özgü karakteristik özellikleri, bu malzemelerin içinde bulunduğu fazlara göre değişmektedir. Bu malzemelerin martenzit ve östenit fazları arasındaki temel fark değişen mekanik özelliklerdir. Günümüzde en bilinen ŞHA malzeme, 1960larda keşfedilen NiTi olsa da şekil hafıza mekanizmasının ilk keşfi, Au-Cd alaşımı sayesinde 1932 yılına kadar dayanmaktadır.

Zamanla bakır alaşımlarının da gösterdiği şekil hafızası ilk yıllarda kendisine çok fazla kullanım alanı bulamasa da zamanla bu şekil hafızasının sebebi olan iç kuvvetlerin etkisi, aktüatör tasarımlarını beraberinde getirmiştir.(Kaya, 2008; Ryhänen, 1999).

Maruz kalınan gerilmeler ve ortam sıcaklığı değişkenleri, ŞHA malzemelerin mekanik sistemlerde kullanımı için önemli olmuştur. Ayrıca mekanik sistemlerin ŞHA malzemelerden bekledikleri faydanın cinsine göre ŞHA kullanım alanları farklılık göstermektedir. Bu farklılıklar maddeler halinde aşağıdaki gibi belirtilmiştir. (Akdoğan ve Nurveren, 2002; Kaya vd., 2016)

- Şekil hafızası özelliği, martenzit halindeki bir malzemenin fiziksel deformasyona uğramış olduğu durumda, malzemenin östenit fazına geçirilerek orijinal fiziksel formuna dönmesi olayını ifade etmektedir. Bu özellik sayesinde ŞHA malzemeler, robotik alanında yavaş ve kademeli hareket gerektiren yerlerde ve uçak kanat kontrolleri için aktüatör olarak kullanılmıştır.
- Titreşim sönümleyiciler, farklı fazlarındaki elastisite modülü kaynaklı olarak, iki farklı fazın özelliklerini sisteme katabildiklerinden, sıcaklıkları arttırıldığında östenit faza geçip titreşimin sönümlenmesinde kullanılmıştır.
- Biyo-uyumlulukları ile stent ve ortodonti alanlarında Titanyum gibi biyo-uyumlu bileşenlerden üretilen ŞHA'lar ile sağlık alanında kullanımı yaygınlaşmıştır.
- İletkenlik gerektiren alanlarda altın veya bakır esaslı ŞHA'lar kullanılmışken, Nikel gibi korozyona dayanıklı bileşenlerle paslanmaya karşı yüksek dayanımlı sistemler oluşturulmuştur. İçerdikleri elementlerin yüzde miktarlarına göre yüksek mukavemet istenen alanlarda özelleştirilerek kullanılmıştır.

ŞHA'ların, bir mekanik sistemde kullanılabilmesi için, dikkat edilecek ilk faktör sistemin çalışma sıcaklığı olmuştur. Ortam sıcaklığı ŞHA malzemenin faz yapısını değiştirebileceği için bu malzemelerin kullanıldığı alanlarda sürekli sıcaklık kontrolü yapılması gerekmektedir. Birçok farklı ŞHA malzeme olmakla birlikte Nikel-Titanyum, Bakır-Çinko-Alüminyum ve Bakır-Alüminyum-Nikel en yaygın kullanım alanına sahip 3 alaşım olarak ön plana çıkmaktadır. Bu üç malzemenin karşılaştırmalı özellikleri Tablo 1'de görülmektedir (Huang, 2002; Vasudha ve Uma Rao, 2020).

Tablo 1. En çok kullanılan ŞHA türlerinin karşılaştırma tablosu (Huang, 2002; Vasudha ve Uma Rao, 2020)

	NiTi	CuZnAl	CuAlNi
Termal iletkenlik (20°C) (W/mK)	8.6-18	84-120	30-75
Yoğunluk (Kg/m ³)	6400-6500	7540-8000	7100-7200
Elektriksel direnç (10 ⁶ Ωm)	0.5-1.1	0.07-0.12	0.1-0.14
Young modülü (Gpa)	28-83	70-100	80-100

ŞHA'ların başlıca yetenekleri, yüksek deformasyon oranlarında bile dışarıdan etki olmadan ilk haline gelebilmesi (süperelastisite) ve şekil hafızasıdır. Bu yeteneklerinden kaynaklı olarak titreşim sönümleme yeteneği gibi özellikleri de görülmüştür. ŞHA'ların yukarıda bahsedilen iki ana fonksiyonunda da ilk forma dönmesi, malzemenin kristal yapısında meydana gelen katı faz değişimi sayesinde olmuştur. Ancak süperelastik davranış için tetikleyici, kuvvet iken, şekil hafızası için sıcaklık değişimidir (Otsuka ve Wayman, 1999).

Bu çalışma kapsamında ŞHA'lar tanıtılmış, temel özelliklerinden ve kullanım alanlarından bahsedilmiştir. Literatürde ŞHA malzemelerden üretilen Aktif Titreşim Sönümleyici (ATS) kompozitlerin üretimi ile ilgili karmaşıklık fark edilmiştir. Makalede bu konunun üzerine gidilerek,

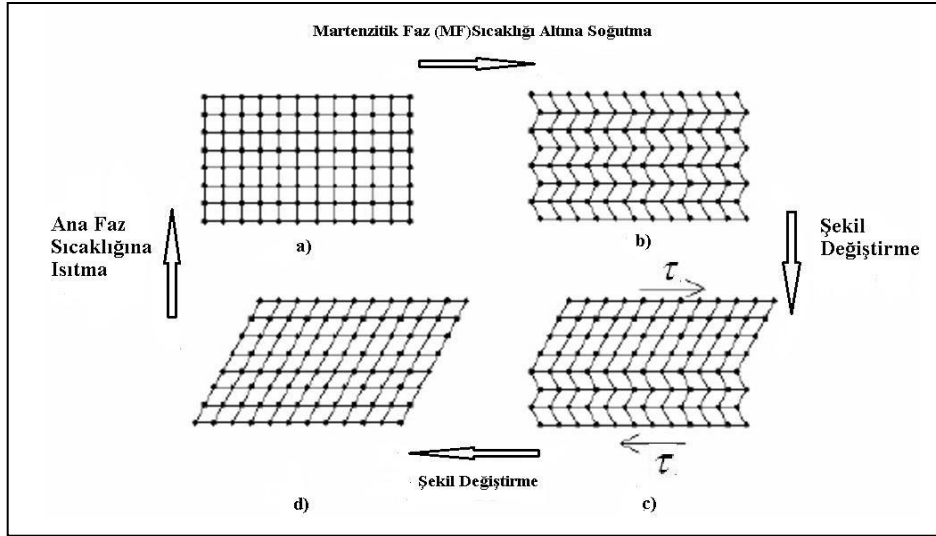
ATS üretiminin bir metodoloji ile yürütülebilmesi amaçlanmıştır. Üretim sürecin her aşaması titizlikle incelenmiş, potansiyel iyileştirme noktaları belirlenmiş ve bu bilgiler ışığında detaylı ve yenilikçi bir akış şeması oluşturulmuştur. Çalışmanın faydası bundan sonra tasarlanacak olan ATS elemanların üretiminin kolaylaştırılması olmuştur.

2. Şekil Hafızalı Malzemelerin Karakteristik Özellikleri

Çalışma kapsamında ŞHA'ların yalnızca şekil hafızası ve titreşim sönümleme özelliği ele alınmıştır.

2.1. Şekil Hafıza Özelliği

Akıllı malzemeler olarak da bilinen Şekil hafızalı alaşımlar, deformasyona maruz kaldıklarında çevre sıcaklığına bağlı olarak orijinal şekillerine geri dönebilen metalik malzemelerdir. Temel olarak iki farklı kristal yapıya sahip olan bu alaşımların, iç yapılarındaki elementlerin oranları, alaşımların karakteristik özelliklerini belirler. Kristal yapıdaki dönüşümler, alaşımların faz dönüşüm sıcaklık aralıklarının üzerinde veya altında gerçekleşmektedir. Eğer alaşım, faz dönüşüm sıcaklık aralığının üzerinde bir sıcaklıkta ise östenitik yapıda, altında ise martenzit yapıdadır. Alaşıma martenzit fazdayken uygulanan deformasyonun eski haline döndürülebilmesi için malzemenin dönüşüm sıcaklığının üzerinde ısıtılmasını yani östenit faza geçirilmesi gerekir. Bu olaya "şekil hafıza etkisi" denir. Şekil 1'de gösterilen şekil hafızalı alaşımların iki boyutlu incelemesinde, Şekil 1a'da östenit fazdaki alaşım, iç yapısını Şekil 1b'de gösterildiği gibi martenzite dönüştürmek üzere soğutulmuştur. Aynı sıcaklıkta, Şekil 1c'de gösterildiği gibi alaşıma bir şekil değişikliği uygulanmış ve çevrimin tamamlanması için Şekil 1d'de alaşım ısıtılarak yeniden östenit fazına döndürülmüştür (Arın, 2008).



Şekil 1. Şekil hafızalı etkisi gösterimi (Arın, 2008)

Bazı ŞHA'ların tek yön yerine çift yönlü şekil hafızasına sahip olduğu görülmüştür. Bu malzemelerde hem soğutma hem de ısıtma hallerinde farklı şekil değişimleri gözlenmiştir. İki yönlü hafızaya sahip malzemelerin şekil hafızası kapasitesi, tek yönlü şekil hafıza yeteneği olan malzemelere göre daha azdır (Arın, 2008).

2.2. Titreşim Sönümleme Özelliği

ŞHA malzemelerin titreşim sönümleme alanında kullanılmasına literatürde çokça rastlanılmıştır. Bu malzemeler sayesinde titreşim üreten sistemlerin titreşimleri kontrollü şekilde azaltılmıştır. Titreşim kontrolü sıcaklık kontrolü ile yapılmıştır. Titreşim sönümleme özelliği alaşımların östenit fazındaki yüksek elastisite modülü sayesinde ortaya çıkmıştır. ATS elemanları bu sayede ortaya çıkmıştır. Bu

elemanlar dış bir enerji kaynağından güç alarak çalışan ve dinamik bir sistemin istenmeyen titreşimlerini azaltmak veya ortadan kaldırmak için tasarlanmış bir cihaz olarak tanımlanmıştır (Hashemi ve Khadem, 2006).

Titreşim, bir sistemin denge noktası etrafında mekanik salınım gerçekleştirdiği bir süreç olarak tanımlanmıştır ve bu süreç hem rastgele hem de periyodik biçimde ortaya çıkabilmektedir. Titreşim genellikle istenmeyen bir etki olarak algılansa bile, amacı titreşim üretmek olan motorlar ve ses iletimi gibi alanlarda titreşimin gerekli olduğu gözlemlenmiştir.

Mekanik sistemlerde titreşim istenmeyen bir faktör olarak ele alındığında ise titreşimin enerji israfının bir göstergesi olduğu belirtilmektedir. İstenmeyen titreşimlerin ölçümü yapılarak muayene gerçekleştirilen endüstriyel alanlar vardır. İçten yanmalı motorlar çalışırken, ısı üretiminin yanı sıra titreşimlerin de meydana geldiği, bu titreşimlerin azaltılması için balans ayarlamalarının veya titreşim sönümleyici elemanların kullanılabileceği gözlemlenmiştir.

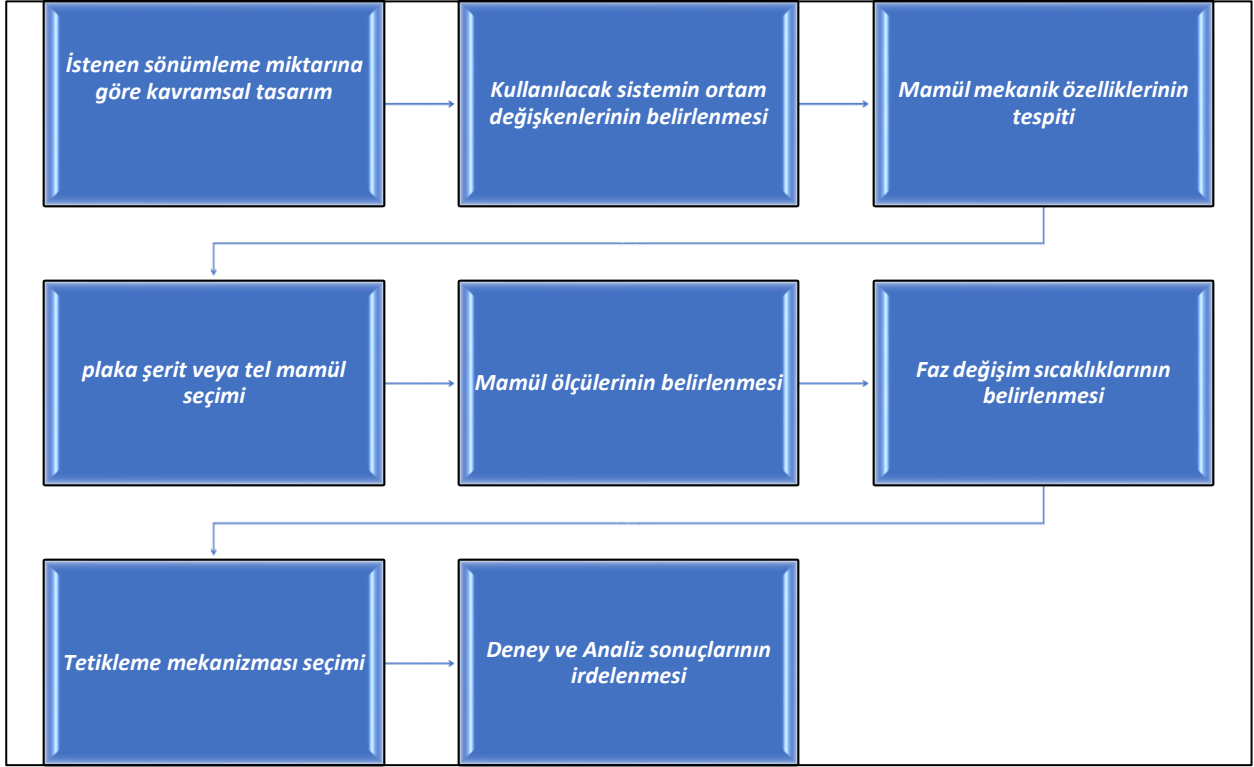
İstenmeyen titreşimlerin önüne geçilmesi konusunda farklı yöntemler vardır. Yapılacak tasarımlarda geometrilerin değiştirilmesi veya farklı mekanik özelliklere sahip malzemelerden yapıya girişler eklenmesi gibi yöntemler kullanılmıştır. Bu tarz yaklaşımlar ile yapılan iyileştirmeler, pasif titreşim sönümleme mekanizmalarına örnektir. Aktif sistemlerde ise sistemdeki artan titreşim sensörler ile algılandıktan sonra, aktüatör olarak kullanılan malzeme indüklenerek sisteme fayda sağlar (Balaji vd., 2015).

Pasif Titreşim Sönümleyici Sistemler: bir sönümleyici, bir elastik elemandan oluşur. Hareket denklemleri bu elemanların sistem tepkilerine göre şekillendirilip, Newton'un 2 yasası, D'Alembert veya Lagrange gibi yöntemlerle ortaya konulmuştur. Örnek olarak plakların yüzlerine eklenebilen profil bazlı girişler görülmüştür. Temel fonksiyon sisteme eklenen giriş veya farklı profiller ile kütle artımı vasıtası ile titreşimin sönümlenmesi olarak belirtilmiştir (Kidner ve Brennan, 1999).

Aktif Titreşim Sönümleyici Sistemler: Sistemlerinde sensörler ve güç kaynağı bulundurmaktadır. Sensörler titreşimi algılar ve istenmeyen seviyede ise güç kaynağı ile ısı vererek sistemi aktif hale getirirler. Aktif sistemler optimizasyona daha açık sistemlerdir. Otomasyon sistemleri ile uyumludur. (Herold ve Mayer, 2016).

3. Materyal ve Metot

Titreşim sönümlenmesinde kullanılan NiTi malzemelerin özellikleri ve fiziksel yapılarına bakılacak olursa faz değişim sıcaklıkları ve mamul çeşidi önem kazanmaktadır. Tüm değişkenler bir arada düşünüldüğünde üretim işleyişi Şekil 2' de görünen Akış Şemasında olduğu gibi oluşturulmuştur.



Şekil 2. Titreşim sönümleyici tasarımı genel üretim akış şeması

Şekil 2’de görünen akış şeması daha da kapsamlı hale getirilmiştir. Bunun için Tablo 2’de görülmekte olan değişkenler kullanılmıştır. Tüm bu değişkenler ve tasarım süreci boyunca ortaya çıkacak problemler akış şemasının hatlarını belirlemiştir. Ortaya çıkacak işleyiş ise genel bir metodoloji oluşturmak için yeterli olmuştur.

Tablo 2. Kapsamlı akış şemasının değişkenleri

Adım	Akış Şeması Değişkenleri
1	ATS kompozit plak tasarımına karar verme
2	Sistem çevresel faktörlerini inceleme (örn., sıcaklık, nem)
3	Sistemin nem seviyesini değerlendirme
4	Kompozitin tek takviyeli olup olmayacağına karar verme
5	Diğer kompozit bileşenlerini belirleme
7	ŞHA (Şekil Hafızalı Alaşım) ürününün formunu belirleme
8	ŞHA serilim stilini seçme
9	Kompozit üretim yöntemini seçme
10	Kompozit için aktivasyon mekanizmasını seçme
11	Aktivasyon hızının gereksinimini belirleme
12	Üretim metodolojisi için gerekli kabulleri belirleme
13	Sonlu eleman analizleri yapma
14	Titreşim testi türünü seçme (örn., lazer genlik ölçümü, çekiç testi)
15	Titreşim testi ve sonlu eleman verilerini karşılaştırarak yeterli sönümlenmeyi sağlama

Makale kapsamında kavramsal tasarımı yapılmış olan ATS’nin takviye malzemeleri NiTi, cam fiber olarak belirlenmiştir. Matris malzemesi ise epoksi reçinedir. ATS bir dikdörtgen ince plak olarak tasarlanmıştır. İlk olarak kompozitin hangi şartlarda çalışacağı kesinleştirilmiştir. Oda sıcaklığında

çalışacak bir sistem için, eğer östenit fazın sıcaklığı oda sıcaklığından daha düşük kalırsa sistem sürekli olarak aktif kalır. Bu sebeple malzeme seçiminde östenit sıcaklık her zaman çalışma sıcaklığının üstünde seçilmiştir.

ATS plağın kullanılacağı ortam ve bu ortama uygun östenit sıcaklık seçildikten sonra geometri olarak dikdörtgen plak seçildiğinden takviye malzemelerin sayısı ve kullanılacak malzemenin cinsi bu aşamada belirlenmiştir. Örneğin elektrik verilerek aktifleştirilecek bir titreşim sönümleyicide matris malzemenin ve diğer takviyenin elektrik iletkenliğine dikkat edilmiştir. Karbon fiber olarak düşünülen bir takviye elemanı bu anlamda uygun olmamıştır. Bunun sebebi karbonun iletkenliği yüzünden telden geçen akımı kendi üzerine alma (kısa devre) ihtimali olmuştur. Takviye sayısı ve cinsi belirlendikten sonra kompozit serilimi ve kullanılacak NiTi mamulün şekli belirlenmiştir.

Sıralanan ve örneklenen değişkenler dışında kompozit plağın üretim yöntemi de önemli olmuştur. Elle yatırma yönteminin takviye elemanlarının homojen dağılmasını ve üzerlerine gelen yüklerin homojen dağılmasını engelleyebileceği düşünülmüştür. Bu yöntem yerine vakum infüzyon yöntemi kullanılmıştır. Vakum infüzyonun avantajı takviye ve matris malzemelerin birbirleri içinde daha homojen dağılımının sağlanması ve hava kabarcığı gibi etkenlerden kaynaklı kayma risklerinin en aza inmesidir. Kompozitin kendi içinde mümkün olduğunca homojen hale gelmesinin aktif titreşim sönümleyiciler için pozitif yönü, östenit fazın etkisinin daha belirgin olarak ortaya çıkabilmesi olmuştur.

Bir diğer aşama olan aktifleştirme yönteminin seçiminde NiTi için elektrik verme yöntemi seçilmiştir. Alternatif olarak harici sıcaklık artırma (ısıtıcı ped) yöntemlerine de rastlanmıştır. Harici sistemde ısıtıcı pedler kullanılarak kompozitin tamamının ısıldığı görülmüştür. Bu yöntemin kullanılabilmesi için kompozit plağın ısıl geçirgenliği çok iyi olmalıdır. Aksi takdirde nötr düzlemdeki NiTi malzemede sıcaklık artışı olmayacağından titreşim sönümlenmesi beklenemez. Eğer NiTi takviye tel değil de şeritler veya plak şeklinde kompozite yerleştirilecekse yüksek watt değerlerine sahip film pedlerin kullanılabilmesi düşünülmüştür. Yalıtkan bir matris malzeme içinde tel formundaki NiTi malzemeye elektrik verilmesi durumunda, direnç kaynaklı sıcaklık artışı sağlanarak NiTi östenit faza geçirilmiştir.

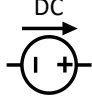


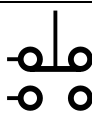

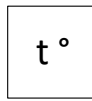
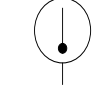

Aktif titreşim sönümleyici her sistemin kullanılacağı ortama göre aktifleşme süresi de önemlidir. Tellerin kullanımına karar verildikten sonra tellerin elektrik akımı karşısındaki ısınma karakteristiklerinin raporlanması gerekmektedir. Hangi çaptaki ve hangi uzunluktaki telin kaç saniyede östenit sıcaklığına geçtiğinin bilinmesi kullanım sırasındaki beklentilerin karşılanması noktasında fikir verir.

0,5mm çapta ve östenit sıcaklığı 45 santigrat derece olan bir NiTi telin 40cm uzunluğunun aktifleşip aktifleşmediğinin anlaşılması için sıcaklık ölçerlerin yanı sıra malzemenin üretimi sırasında kazandığı şekil hafızasını gösterip göstermediğine de bakılmıştır.

Geometri, çevre ve kullanım şartları, mamul seçimi, kompozit üretim yöntemi ve tetikleme yöntemi belirlendikten sonra kullanılan mamullerin teorik olarak sağlamlasının yapılması gerekmektedir. Örneğin alınan NiTi telin özelliklerinin doğrulanması çekme testi ile yapılmıştır. (Johe, 2009) Kullanılacak cam fiberin örgü çeşit ve metrekare ağırlığının doğrulanması elzemdir. Tüm malzemelerin bir araya gelip oluşturduğu kompozit plağın mekanik özelliklerinin daha sonra yapılacak olan analiz sonuçları ile tutarlı olarak ilerlemesi için ön kontrol şart olmuştur.

Hatasız olarak üretildiği kabul edilen, titreşim sönümlemesi amacı ile üretilen, NiTi ve cam fiber katkılı kompozit plağın deneylerinin yapılması noktasında ihtiyaç duyulan malzeme ve ekipmanlar Tablo 3'te gerekçe ve kullanım alanlarına göre belirtilmiştir. Ayrıca Şekil 3 aracılığıyla elemanların görünümüleri verilmiştir.

Tablo 3. Aktifleştirme mekanizması deneyleri için gereken teçhizatlar

	Gerekeçe	Nitelik	Şematik Gösterim	Adet	Nesne
Ayarlanabilir Güç Kaynağı	Tellere elektrik akımı verilmesi	0-15V 0-60A ayarlı		1	a
Termostat Röle devresi	Elektrik akımının sıcaklığa göre kontrolü	0-100 santigrat derece arasında alarmlı ve tepe sıcaklığı ayarlı		1	b
Yüksek akım rölesi	Anlık yüksek akım ve kısa devre koruması	Ayarlı minimum 30 amper değerinde		1	c
Devre Anahtarı Tesisatı	Devre açıp kapanması	-		1	d
Yüksek Akım Telleri	Sıcaklığa dayanıklı olup üzerine en az elektriksel direnci alacak	Bakır tek tel 100 amperlik		2	e
100K ohm Termistör	Sıcaklık ölçümü	Pin uçlu 0-200 santigrat derece aralığı ölçebilen		2	f
Termal veya kızılötesi sıcaklık ölçer	Bölgesel sıcaklık ölçümü	0-200 santigrat derece arasında 1 erece farkla ölçebilen		1	g
NiTi tel	Sönümleme elemanı	Östenit sıcaklığı belirlenmiş		1	h

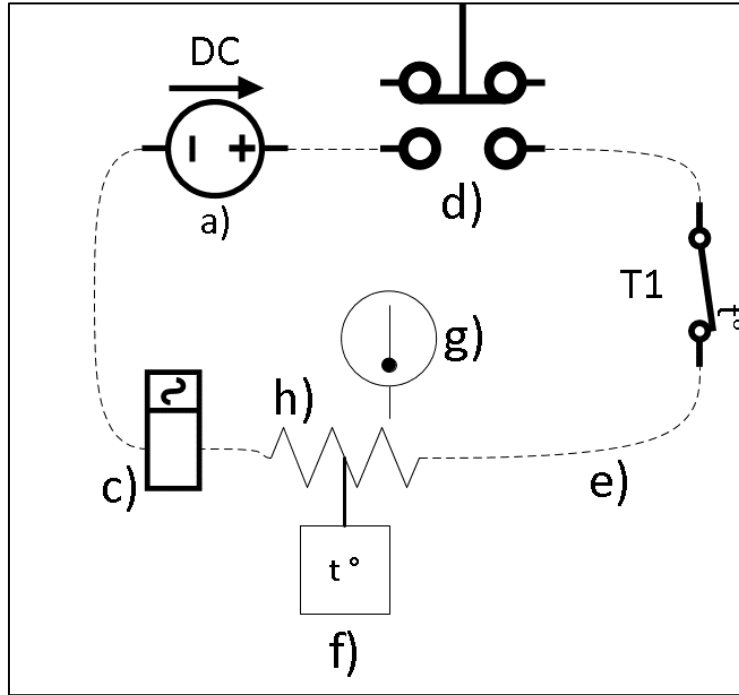


Şekil 3. Tablo 3'te gösterilen elemanların gösterimi; a) Güç kaynağı, b) Termostat röle devresi, c) Yüksek akım rölesi, d) Devre anahtarı, e) Yüksek akım kablosu, f) Termistör, g) Kızılötesi sıcaklık ölçer, h) NiTi tel

Kullanılan sistemin gereksinimlerine göre aktifleşme süresinin ölçümü noktasında, üretilecek kompozitin boyutlarına göre kullanılacak olan NiTi tele akım verilmiş ve şekil hafızası tepkisine bakılmıştır. Boy ve çapın önemli olmasının sebebi, bu değişkenlerin her birinin elektriksel direnci etkilemesidir. Tablo 4’te örnek olarak alınan 40 cm ve 1 mm çaptaki NiTi telin aktifleştirme süreleri verilen akıma göre gösterilmiştir. Ayrıca aktifleşme süresi ölçümü deney düzeneği Şekil 3’te verilen elamanların harf kodları ve Tablo 3’te verilen şematik gösterimleri ile Şekil 4’te gösterilmiştir.

Tablo 4. 1 mm çapta NiTi tel için akım ve aktifleşme süresi tablosu

Volt-Akım	Ø 1mm NiTi östenit 50°C aktifleşme süresi
1V-1A	15sn
1V-2A	9sn
1V-3A	5sn
2V-1A	8sn
2V-2A	4sn
3V-1A	5sn
3V-2A	2sn
3V-3A	1sn
5V-4A	0.3 sn



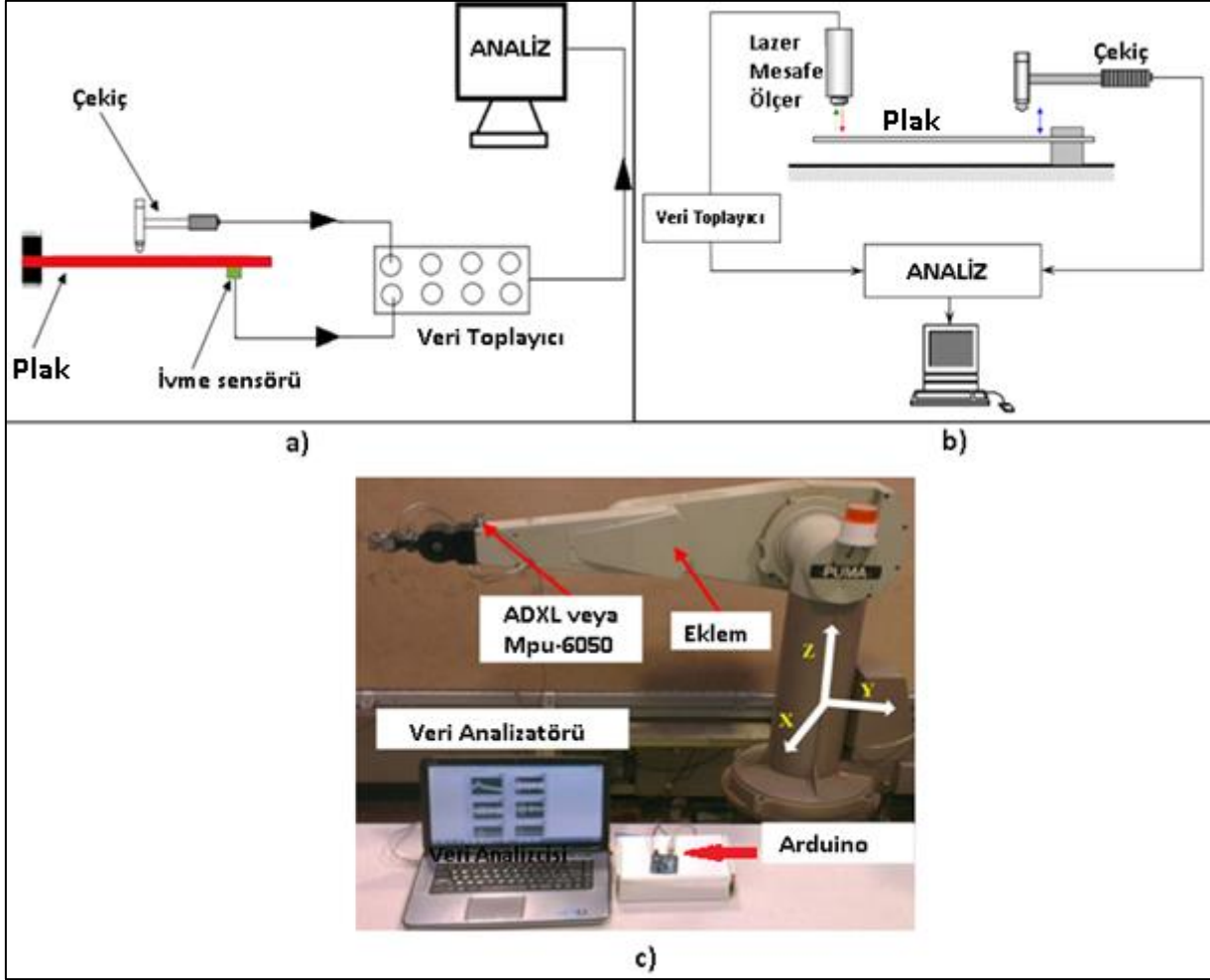
Şekil 4. Aktifleşme süresi deneyi görseli

Aktifleşme süresi tespitinden sonra üretilecek ATS eleman için kullanılacak değişkenlerin çoğu belirlenmiş olarak ortaya çıkar. Bu kabuller aşağıda sıralanmıştır.

- Üretim metodolojisi oluşturulmaya çalışılan ATS plak 100x300x2mm kalınlığındadır.
- Takviye sayısı iki ile sınırlandırılmıştır.
- Titreşim deney ve sonlu eleman analizleri kısa kenarından ankastre ve diğer kenarları serbest olacak şekilde sınır şartlarına sahiptir.
- Kompozit matris olarak epoksi reçinedir
- NiTi tel mamul kullanılır ve nötr eksendedir.
- Telin östenit sıcaklığı 45 °C -50 °C arasında seçilmiştir.

- Tel 1mm çaptadır.
- Vakum infüzyon ile üretilmiştir.
- 3v 3A lik bir elektrik kullanılacaktır.
- Tele elektrik verilerek östenit hale geçiş sağlanmıştır.

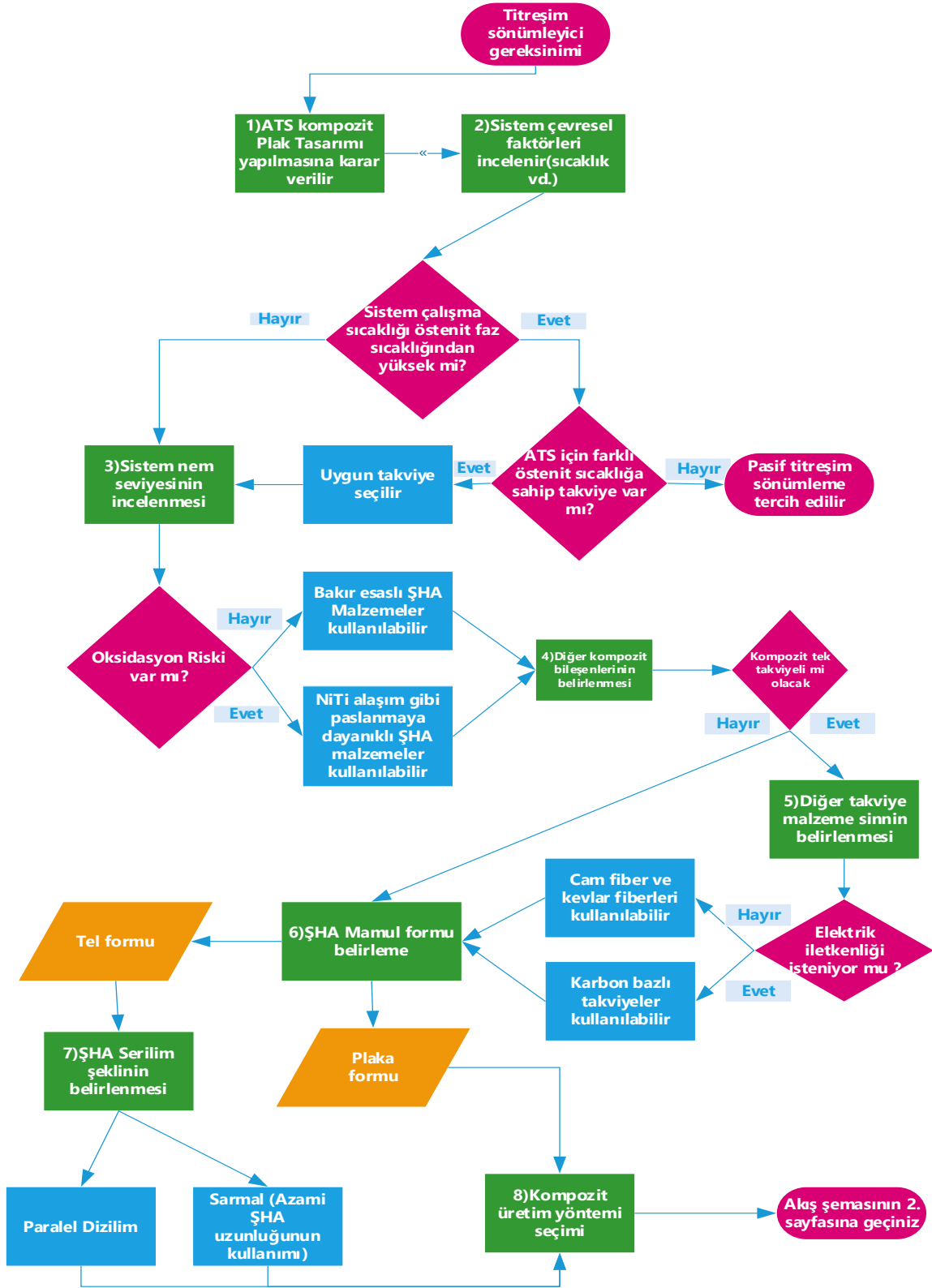
Aktifleştirme mekanizması deneylerinin yanı sıra titreşim sönümlenmesi yeteneğinin araştırılması için de bir deney düzeneği oluşturulması gerekmiştir. Titreşim deneylerinde kullanılan teçhizatlar farklılık gösterir ve en çok kullanılan üç yöntem maddeler halinde aşağıda verilmiştir.



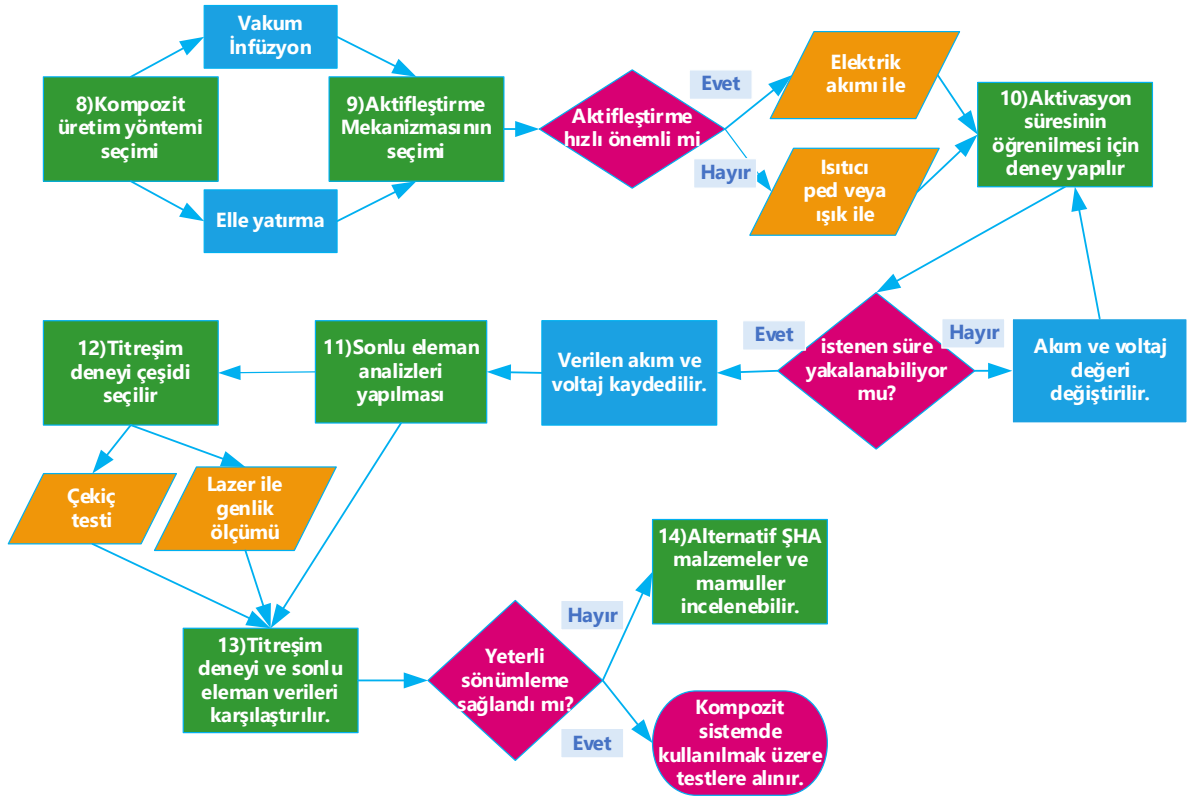
Şekil 5. a) Çekiç testi şeması (Prabhu, 2016), b) Lazerli titreşim ölçme mekanizması (Berthelot vd., 2008), c) Arduino ile titreşim ölçer şeması (Komarizadehasl vd., 2021)

- Çekiç testi ile titreşim deneyi: Bu yöntemde çekiç vasıtası ile titreşim ölçümü yapılacak eleman titreştirilmiş ve ivme ölçerler ile genlikler kaydedilmiştir. Bu işleyiş Şekil 5a'da görülmektedir.
- Lazer ölçümlü titreşim deneyi: Lazer ile genlik ölçümü yapılan yöntemdir. Sıradan çekiç testine göre daha pahalı ancak doğruluğu yüksek bir yöntem olarak öne çıkmıştır. Yüksek doğruluğun sebebi ivme sensörlerinin kullanılmaması ve uzaktan ölçüm yapılmasıdır. Şekil 5b'de temel elemanları gösterilmiştir.
- Arduino kartlar ile titreşim deneyi: Titreşim motoru ve nano titreşim sensörleri (Mpu veya adxl) kullanılarak yapılır. Bilgisayar kontrollü bir sistem oluşturulmuştur. Tüm titreşim verileri kayıt altına alınır. Hazırlanması karmaşık ancak ucuzdur. Şekil 5c'de elemanları gösterilmiştir.

Materyal metot bölümünde gerekliliğinden bahsedilen ve daha önce bir şema halinde ayrıntılı şekilde gösterilmemiş olan, Şekil 2’de genel formu gösterilen akış şeması, Şekil 6 ve devamı niteliğinde olan Şekil 7’de ayrıntılı şekilde gösterilmiştir.



Şekil 6. Epoksi malzeme kullanılan ve vakum infüzyon yöntemi ile üretilen ATS'nin temel üretim akış şeması



Şekil 7. Epoksi malzeme kullanılan ve vakum infüzyon yöntemi ile üretilen ATS'nin temel üretim akış şeması

Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterilmiş olan akış şemasında gösterilen aşamalar ve kararlar, kullanılacak yöntemle göre değişiklik göstermiştir.

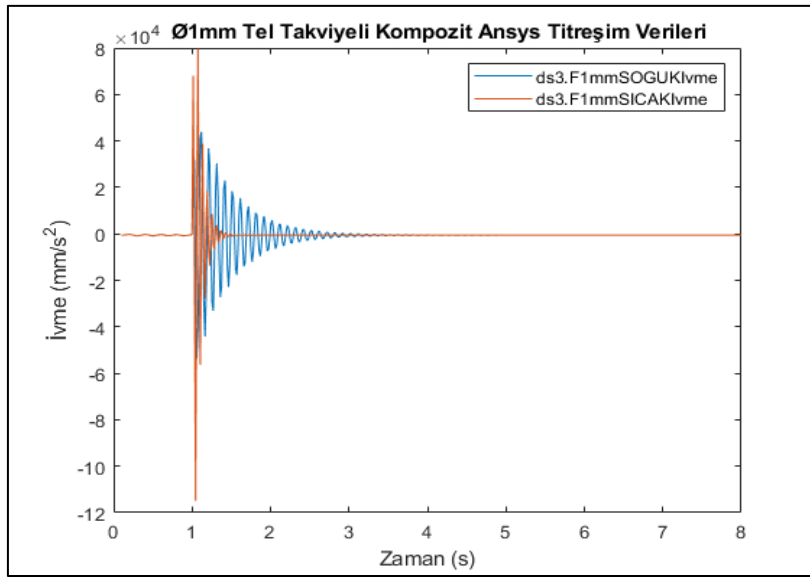
3. Bulgular ve Tartışma

Makalede ŞHA malzemeler hakkında temel bilgiler, kullanım alanları ve kullanılırken dikkat edilmesi gerekenlerden bahsedilmiştir. Bu genel anlatım daha sonra ŞHA malzemelerden NiTi üzerinde yoğunlaşmış ve takviye olarak NiTi kullanılan kompozit bir plaktan ATS sistem üretilmesi aşamalandırılmıştır. ATS sistemlerin gereksiniminden yola çıkarak üretim ve test faaliyetleri makalede belirtilmiştir. Üretilmesi hedeflenen plak için değişkenler belirtilmiş ve açıklanmıştır. Bahsedilen tüm aşamalar farklı sistem gereksinimlerine göre değiştirilebilse de oluşturulan akış şemasının hedefi daha dardır. Bu hedef dikdörtgen cam fiber katkılı kompozit plağın NiTi ile ATS sisteme dönüştürülmesidir. Hedefin dar tutulması işleyişin daha anlaşılır olmasını sağlamıştır. Pratik kullanıma yönelik bu akış şemasının bilimsel olarak da irdelenebilmesi mümkündür. Kompozitin teorik analizinin yapılabilmesi için Brinson yaklaşımı (Brinson, 1993) ve hareketlerinin irdelenmesi için de klasik kompozit plak teorisi ya da birinci dereceden kayma deformasyon teorisi kullanılabileceği görülmüştür (Akavci vd., 2007). Bu çalışmada amaç üretim metodolojisi olduğundan bu faktörler çalışma dışında tutulmuştur.

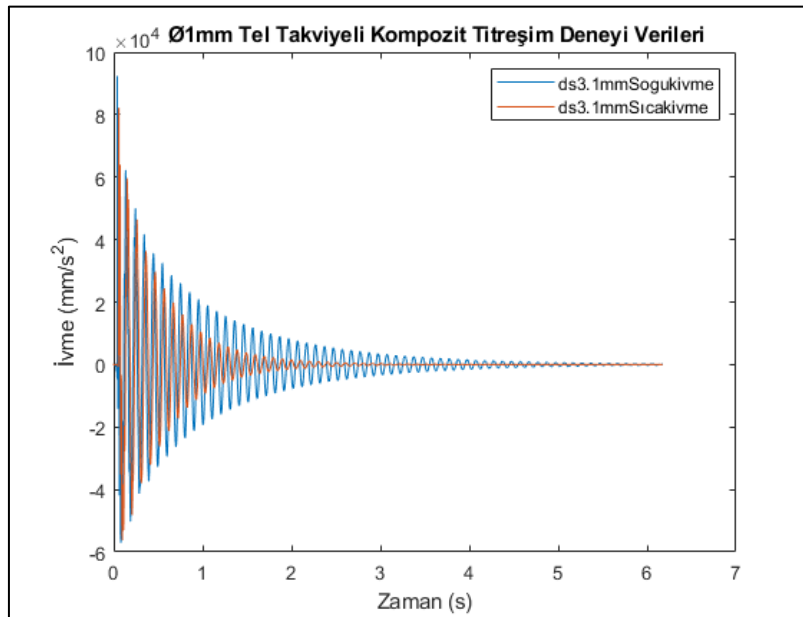
Yapılan irdellemeler ve deneyler sonucunda, plak titreşimlerinin sönümlenmesi mekanizması oluşturulması safhası incelenmiş ve alternatifler sunulmuştur. Makalede plak titreşimleri üzerinde durulsa bile ATS elemanların geometri kısıtlaması olmadan titreşim sönümlenmesinde kullanılabileceği görülmüştür.

Ancak tel veya şerit mamul için martenzit halde iken vakum infüzyon yöntemi zorlayıcı olduğu görülmüştür. Bunun sebebi ŞHA malzeme geometrisinin (martenzit halinin) kompozit geometrisine uygulanmasının zorluğu olmuştur. Tel rulo halde gelen belirli çaptaki ŞHA malzemenin plak içine gergin ve düz halde yerleştirilmesi zor olduğundan, NiTi mamul alınırken istenilen serilim formatında kalıplama yapılmalıdır. Bu üretim safhası için bahsedilebilecek en önemli öneridir.

İdeal şekilde üretildiği kabul edilen ATS plak üzerinde Ansys sonlu eleman analizi ve deneyler yapılmıştır. Grafiklerde turuncu ile gösterilen veriler 50 °C, mavi ile gösterilen veriler 20 °C ŞHA sıcaklığında ölçülmüş verilerdir. Bir başka deyişle ATS plağın aktif hali 50 °C ve aktifleştirilmemiş hali 20 °C ve mavi ile çizdirilmiştir. Yapılan analizler neticesinde, ivme genliklerinin 50 °C de hem analizde hem deneyde daha hızlı düşüş gösterdiği görülmüştür. 1mm tel ile oluşturulmuş dikdörtgen plağa ait Ansys sonlu eleman analiz sonuçları grafiği Şekil 8'de ve deney sonuçları Şekil 9'da görülmektedir.



Şekil 8. 1mm tel ile oluşturulmuş dikdörtgen plağa ait Ansys verileri (ivme zaman grafiği)

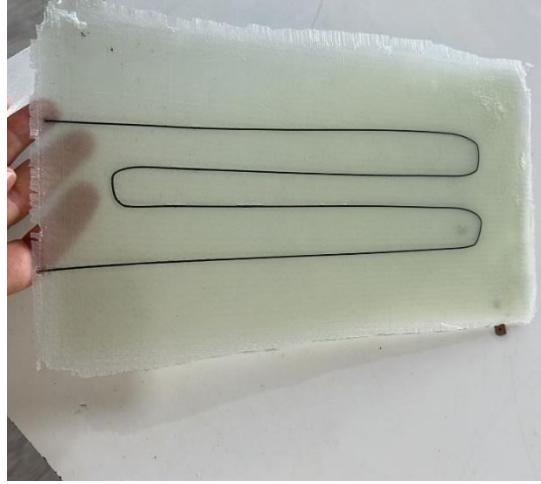


Şekil 9. 1mm tel ile oluşturulmuş dikdörtgen plağa ait deney verileri (ivme zaman grafiği)

Deney verileri ile Ansys verileri arasındaki farklar deney mamulü üretimindeki hatalardan kaynaklanmaktadır.

4. Sonuçlar

ŞHA takviyeli kompozit (ATS) bahsedilen metodolojiye göre üretilmiştir. Akış şemasının kullanılması halinde üretim hedefi belirli ve açık olduğu için üretim masrafları ve zamandan tasarruf edilmiştir. Metodolojinin genişletilebileceği veya sadeleştirilebileceği öngörülmektedir. Bu durum sonraki çalışmalar için öneri niteliğindedir. Bu çıktı sayesinde ATS üretimi kolaylaşmış ve kavram kargaşası ortadan kaldırılmıştır. Ayrıca deney ve sonlu eleman sonuçları ile de ATS sistemlerin etkinliği gösterilmiştir. Üretilen plak Şekil 10'da görüldüğü gibidir.



Şekil 10. Geliştirilen metodoloji ile üretilen plak

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Kaynaklar

Akavci, S.S., Yerli, H.R. & Dogan, A. (2007). The First Order Shear Deformation Theory for Symmetrically Laminated Composite Plates on Elastic Foundation. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 32, 341-348.

Akdoğan, A. & Nurveren, K. (2002). Akıllı Malzemeler ve Uygulamaları. *Machinery MakinaTek*, 57, 35.

Arın, T. (2008). Şekil bellekli NiTi alaşımlarında kimyasal bileşim-ısı işleme koşullarının optimizasyonu, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

Balaji, P.S., Rahman, M.E., Moussa, L. & Lau, H.H. (2015). Wire Rope Isolators for Vibration Isolation of Equipment and Structures – A review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 78. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/78/1/012001>

Berthelot, J.M., Assarar, M., Sefrani, Y. & Mahi, A.E. (2008). Damping Analysis of Composite Materials and Structures. *Composite Structures*, 85(3), 189-204.

- Brinson, L. C. (1993). One-Dimensional Constitutive Behavior of Shape Memory Alloys: Thermomechanical Derivation with Non-Constant Material Functions and Redefined Martensite Internal Variable. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 4(2), 229-242. <https://doi.org/10.1177/1045389X9300400213>
- Hashemi, S.M.T. & Khadem, S.E. (2006). Modeling and Analysis of the Vibration Behavior of a Shape Memory Alloy Beam. *International Journal of Mechanical Sciences*, 48(1), 44-52. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2005.09.011>
- Herold, S. & Mayer, D. (2016). Adaptive Piezoelectric Absorber for Active Vibration Control. *Actuators*, 5(1). <https://doi.org/10.3390/act5010007>
- Huang, W. (2002). On the Selection of Shape Memory Alloys for Actuators. *Materials & Design*, 23(1), 11-19. [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(01\)00039-5](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(01)00039-5)
- Johe, R. (2009). Tensile Testing of Nitinol Tubes and Wires with Higher Strain Rates. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 18(5), 836-842. <https://doi.org/10.1007/s11665-009-9406-x>
- Kaya, M. (2008). Toz metalürjisi ile üretilen şekil hatırlamalı alaşımların metalürjik ve mekanik karakteristiklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye.
- Kaya, M., Cakmak, Ö., Saygili, T.Y. & Atli, K.C. (2016). Şekil Hafızalı Alaşımlarda Martensitik Faz Dönüşümü ve Şekil Hafıza Mekanizması. *Selçuk-Teknik Dergisi*, 15(3), 157-172.
- Kidner, M. & Brennan, M.J. (1999). Improving the Performance of a Vibration Neutraliser by Actively Removing Damping. *Journal of Sound and Vibration*, 221(4), 587-606. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1998.2027>
- Komarizadehasl, S., Mobaraki, B., Ma, H., Lozano-Galant, J.A. & Turmo, J. (2021). Development of a Low-Cost System for the Accurate Measurement of Structural Vibrations. *Sensors*, 21(18). <https://doi.org/10.3390/s21186191>
- Prabhu, R. (2016). Processing and Testing of Hybrid Sandwich Composites for Vibration Damping and Mechanical Properties. *Journal of Mechanical Engineering and Automation*, 6, 22-27. <https://doi.org/10.5923/c.jmea.201601.05>
- Ryhänen, J. (1999). Biocompatibility Evaluation of Nickel-Titanium Shape Memory Metal Alloy, Oulu University Press, ISBN: 951-42-5206-03, Oulu, Finland.
- Vasudha, N. & Uma Rao, K. (2020). Shape Memory Alloy Properties, Modelling Aspects and Potential Applications - A Review. *Journal of Physics: Conference Series*, 1706, 012190. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1706/1/012190>
- Otsuka, K. & Wayman, C.M. (1999). Shape Memory Materials, Cambridge University Press, ISBN: 0-521-44487, Cambridge, England.