



Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi

International Journal of Technological Sciences

Sahibi / Owner

Dr. Ali Kemal YAKUT

Yayın Yönetmeni / Publishing Manager

Dr. Reşat SELBAŞ

Editör / Editor in Chief

Dr. Nihat YILMAZ

Yardımcı Editörler / Vice Editors

Dr. Önder KIZILKAN

Dr. Ergün KORKMAZ

Editör Kurulu / Editorial Board

Dr. Önder KIZILKAN

Dr. İsmail Serkan ÜNCÜ

Dr. Ergün KORKMAZ

Dr. Fatih YILMAZ

Dr. Cengiz ÖZEL

Dr. Serap ERGÜN

Dr. Okan BİNGÖL

Yayın Danışma Kurulu/Editorial Advisory Board

Dr. Hiroshi YAMAGUCHI, Doshisha University, Japan

Dr. İbrahim DİNÇER, Ontario Tech University, Canada

Dr. Mustafa Reşit USAL, Süleyman Demirel Üniversitesi, Türkiye

Dr. Deeb Alashgar, Kyoto University, Japan

Dr. Ramazan KÖSE, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Türkiye

Dr. Farrukh Khalid, Indian Institute of Technology Guwahati, India

Dr. Shoaib Khanmohammadi, Kermanshah University of Tech., Iran

Dr. Ömer Necati CORA, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Türkiye

Dr. Mehmet Akif EZAN, Dokuz Eylül Üniversitesi, Türkiye

Dr. Nabi İBADOV, Warsaw University of Technology, Poland

Dr. Murat Öztürk, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Türkiye

Dr. Mustafa AY, Marmara Üniversitesi, Türkiye

Dr. Tahir Ratlamwala, National Uni. of Sciences and Tech., Pakistan

Grafik Tasarım / Graphic Design

Sinan İLKAZ

Teknik Sorumlu / Technical Manager

Nejat TÜKENMEZ

Mizanpaj / Make-up

Dr. Serpil ÇELİK TOKER

Dergi Adresi / Journal Address

Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi Editörlüğü

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Teknoloji Fakültesi

32260, Batı Kampüsü, Isparta, Türkiye

Tel: +90 246 2111569

Fax : +90 246 2111984

E-posta/E-mail: utbd@isparta.edu.tr

Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi tarafından yılda 3 sayı elektronik olarak yayınlanmaktadır.

International Journal of Technological Sciences is published three times a year electronically by Isparta University of Applied Sciences.

Cilt / Volume: 15

Sayı/Number: 3

Aralık/December 2023

e - ISSN : 1309-1220



İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Sayfa No / Page No

Araştırma Makalesi / Research Article

- Güç sistemlerinde sürekli ve geçici durum için gerilim kararlılığının STATCOM-Yakıt hücresi ile incelenmesi**
Investigation of voltage stability for the steady and transient state in power systems with STATCOM-Fuell cell 95-102
M. Kenan Döşoğlu, Muhammet Demirbaş
- 3-Point bending behaviors of sandwich panels with hemp fibers**
Kenevir lifli sandviç panellerin 3 nokta eğilme davranışları..... 103-110
Onur Kelten, Abdulmecit Güldaş
- Farklı malzemelere sahip köpük çekirdekli sandviç plaklarda tabaka kalınlıklarının burkulma davranışına etkisi**
The effect of layer thicknesses on buckling behavior in foam core sandwich plates with various materials 111-117
Derya Çıraklı, Mustafa Halûk Saraçoğlu, Uğur Albayrak
- Cüce kuyruksüren optimizasyon algoritması: Çok seviyeli inverter çıkış geriliminin toplam harmonik distorsiyon değerinin azaltılması**
Dwarf mongoose optimization algorithm: Minimization of total harmonic distortion in multi-level inverter output voltage
..... 118-128
Yasin Bektaş



Araştırma Makalesi/Research Article

Güç sistemlerinde sürekli ve geçici durum için gerilim kararlılığının STATCOM-Yakıt hücresi ile incelenmesi

M. Kenan Döşoğlu¹, Muhammet Demirbaş²

¹Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 81620, Düzce, Türkiye

²Kastamonu Üniversitesi, Tosya Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 37300, Kastamonu, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Sürekli ve geçici durum
Gerilim kararlılığı
STATCOM
Yakıt hücresi

Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 14.07.2023
Kabul Tarihi: 07.09.2023

Öz: Güç sistemlerinde, çeşitli çalışma koşullarından dolayı, bara gerilimlerinde ve yüklenme parametresi değerlerinde azalmalar meydana gelmektedir. Buda sistemin kararsızlığa girmesine sebep olmaktadır. Kararsızlık durumlarını ortadan kaldırmak için Statik Senkron Kompanzator (STATCOM) yaygın olarak kullanılmaktadır. STATCOM'un güç sistemlerinde etkililiğini arttırmak için enerji depolama sistemlerinden yakıt hücresi kullanılabilir. Bu çalışmada 6 baralı güç sisteminde sürekli ve geçici durum gerilim kararlılığı için STATCOM ve yakıt hücresi birlikte kullanılmıştır. Güç sisteminde sürekli durum ve kesici açma-kapama durumunda oluşan geçici durum çalışmasındaki bara gerilim-maksimum yüklenme parametresi arasındaki ilişki incelenmiştir. Bunun yanısıra yakıt hücresinin farklı güç değerlerindeki etkileri de detaylı olarak incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda STATCOM ve yakıt hücresinin birlikte kullanılmasının sürekli ve geçici durumda gerilim kararlılığı açısından etkili sonuçlar verdiği görülmüştür.

Atıf için/To Cite:

Döşoğlu, M.K Demirbaş M. Güç sistemlerinde sürekli ve geçici durum için gerilim kararlılığının STATCOM-Yakıt hücresi ile incelenmesi. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 15(3), 95-102, 2023.

Investigation of voltage stability for the steady and transient state in power systems with STATCOM-Fuell cell

Keywords

Steady and transient state
Voltage stability
STATCOM
Fuel cell
PSAT

Article history:

Received: 14.07.2023
Accepted: 07.09.2023

Abstract: Due to various operating conditions of power systems, bus voltages and load parameter values decrease. This causes the system to go into instability. Static Synchronous Compensator (STATCOM) is widely used to eliminate instability situations. Fuel cells can be used from energy storage systems to increase the efficiency of STATCOM in power systems. In this study, STATCOM and fuel cell are used together for steady and transient voltage stability in a 6-bus power system. In the voltage stability system, the relationship between the bus voltage-maximum load parameter in the steady-state operation is examined, while in the transient state study, the relationship between the bus voltage-maximum load parameter for the transient stability that occurs in the case of breaker opening-closing on the line in the system. In addition, the effects of the fuel cell at different power values are examined in detail. As a result of the study, it has been seen that the use of STATCOM and fuel cell together gives effective results in terms of voltage stability in continuous and transient situations.

1. Giriş

Güç sistemlerinin sürekli ve geçici kararlılık durumlarından en az derecede etkilenmesi için çeşitli modeller kullanılmaktadır. Özellikle bara gerilim kontrolünün sağlanmasında Esnek AC İletim Sistemi (FACTS) cihazlarından birisi olan Statik

Senkron Kompanzator (STATCOM) tercih edilmektedir. Güç elektroniği tabanlı kompanzasyon sistemlerinden olan STATCOM'un literatürde kullanımı yaygındır. STATCOM'un bara gerilim kontrolünü sağlaması reaktif güç alınması yada reaktif güç verilmesi ile sağlanmaktadır. STATCOM'un gerilim kontrolü için geri besleme kontrol stratejisi kullanılmaktadır. Doğrusal

* İlgili yazar/Corresponding author: kenandosoglu@duzce.edu.tr

optimal kontrol modeli sayesinde STATCOM'un çalışma koşullarına göre zaman tepkisinin hızlı olduğu görülmektedir [1]. STATCOM gerilim kontrolü sağlamanın yanısıra açı kontrolünün sağlanmasında da etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Açı kontrolünün sağlanması STATCOM devresindeki evirici devresinde bulunan DC link modeli sayesinde gerçekleştirilmektedir [2]. Güç sistemlerinde güç elektroniği tabanlı lineer olmayan yük modelleri şebekede saf sinüsoidal dalganın bozulmasına neden olabilmektedir. Bunun yanısıra güç sistemlerinde kullanılan bu yük modelleri kırpışma ve güç kalitesi problemlerine sebep olabilmektedir. Bu problemleri ortadan kaldırmak ve etkilerini azaltmada STATCOM'un başarılı olduğu görülmektedir [3,4]. Çok makinalı güç sisteminde güç akışı analizlerinde STATCOM yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Tercih edilen STATCOM model ile yüksek frekans etkilerini, güç elektroniği kayıplarını ve sistemdeki aktif-reaktif güç kayıplarını azaltabilmektedir. Dahası bara gerilimini istenen sınırlar içerisinde ayarlayabilmektedir [5,6]. Güç sistemlerinde çeşitli kısa devreler sonucunda sistemin kararsızlık durumlarında kaldığı ve parametreler üzerinde oluşan salınımların artarak devam ettiği görülebilmektedir. Sistem kararlılığının kısa sürede sağlanması ve salınımların hızlı bir şekilde sönümlenmesi için STATCOM'un etkili ve başarılı oldukları ilgili çalışmalarda görülmektedir [7,8]. STATCOM ile kısa sürede kararlılığın sağlanması ve salınımların en hızlı şekilde sönümlenmesinde kullanılan önemli durumlardan birisi de optimum parametre belirlenmesi işlemidir. STATCOM'da kullanılan geleneksel denetleyiciler çoğu zaman geçici kararlılık durumlarında iyi sonuç vermemektedir. Bunun için farklı denetleyici modelleri yaygın olarak tercih edilebilmektedir [9,10]. Çok makinalı güç sistemlerinde gerilim kararlılığı analizlerinde STATCOM'un etkili bir şekilde kullanıldığı ilgili çalışmalarda gösterilmektedir. Çeşitli çalışma koşullarında bara gerilim sınır aralığını kontrol etmek, sistemin yüklenebilirliğini arttırmak ve sistem güvenliğini sağlamak için STATCOM'un gerilim kararlılığı çalışmalarında önemli bir rolü bulunmaktadır [11-13].

Yapılan bu çalışmada Referans [11-13]'den farklı olarak 6 baralı güç sisteminde sistemin sürekli ve geçici çalışma koşullarında STATCOM ve yakıt hücresinin gerilim kararlılığı üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bunun yanısıra STATCOM ile farklı güç değerlerinde kullanılan yakıt hücresinin sistemdeki bara gerilim profilleri ve sistemin maksimum yüklenme parametresi üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiş ve yorumlanmıştır.

2. Gerilim Kararlılığı

Güç sistemlerinde sürekli durum ve geçici durumda gerilim kararlılığı hesaplaması genel olarak reaktif güç kullanılarak yapılmaktadır. Reaktif güç değeri yük barasına bağlı olarak gerçekleştirilmektedir. Güç sisteminde reaktif gücün değeri belli bir sınırın altına düştüğünde gerilim çökmesi meydana gelebilmektedir. Gerilim çökmesi problemini azaltmak için güç sistemine reaktif güç desteği verilmesi gerekmektedir. Güç sistemindeki gerilim kararlılığı ilişkisi gerilim-maksimum yüklenme parametresine bağlı olarak yapılmaktadır. Güç sisteminde gerilim kararlılığını analizinde aktif-reaktif güç ilişkisine bakılması gerekmektedir. Aktif-reaktif güç ilişkisi Denklem 1 ve Denklem 2'de gösterilmiştir [13].

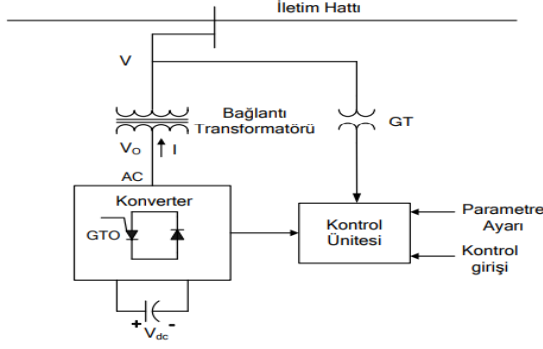
$$P_L = P_{L0}(1 + \lambda) \quad (1)$$

$$Q_L = Q_{L0}(1 + \lambda) \quad (2)$$

Denklem 1 ve Denklem 2'de, PL ve QL yükün aktif güç ve reaktif güç değeri, PL0 ve QL0 yükün başlangıç aktif güç ve reaktif güç değerleri, λ maksimum yüklenme parametre değeri olarak tanımlanmaktadır. Gerilim kararlılığı analizinde sürekli yük akışı metodu uygulanmaktadır. Sürekli yük akışı yöntemi belirli bir sistem modeline bağlı olmadığı istenilen duruma göre güç akışındaki belirli zorlukların üstesinden gelmektedir. Bunun yanısıra sistemdeki denklemlerinin tekillikleri hakkında yüklenme parametre değerini otomatik olarak değiştirerek tüm gerilim profilini takip etmektedir.

3. Statik Senkron Kompanzatör (STATCOM)

STATCOM paralel bağlantılı olan FACTS cihazlarından birisidir. Gerilim kaynaklı evirici olarak çalışmaktadır. Aktif veya reaktif güç sağlamak için giriş DC link gerilimini çıkışında alternatif gerilime dönüştürmektedir. Yük barasına bağlandığında bara gerilimini ayarlamak için reaktif güç verebilir veya reaktif güç çekebilir. STATCOM bağlantı transformatörü, konverter, kontrol ünitesi ve kondansatörden oluşmaktadır. STATCOM modeli Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. STATCOM modeli

STATCOM'un çıkış gerilimi büyüklüğü AC sistemden büyük ise akım STATCOM'dan sisteme transformator aracılığıyla akmaktadır. Böylece STATCOM şebeke için reaktif güç üretir. İkinci durumda ise STATCOM'un çıkış gerilimi büyüklüğü AC sistemden daha düşük ise AC sistemden STATCOM'a akım akmaktadır. Böylece STATCOM reaktif güç tüketmektedir. STATCOM'un matematiksel eşitlikleri Denklem 3 ile Denklem 5 arasında gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \alpha \\ m \end{bmatrix} = f(x_c, \alpha, m, V, V_{dc}, v_{ref}, V_{dc-ref}) \quad (3)$$

$$V_{dc} = \frac{VI}{CV_{dc}} \cos(\delta - \theta) - \frac{1}{R_c C} V_{dc} - \frac{R}{C} I^2 \quad (4)$$

$$0 = \begin{bmatrix} P - VI \cos(\delta - \theta) \\ Q - VI \sin(\delta - \theta) \\ P - V^2 G + kV_{dc} VG \cos(\delta - \theta) + kV_{dc} VB \sin(\delta - \theta) \\ Q - V^2 B - kV_{dc} VG \cos(\delta - \theta) + kV_{dc} VB \sin(\delta - \theta) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Burada, puls genişlik modülasyonuna bağlı olarak k ifadesinin değeri olarak belirlenmiştir. Sürekli durumda gerilim kararlılık analizi için tercih edilen model Denklem 6'da gösterilmiştir [14].

$$0 = \begin{bmatrix} V - V_{ref} - X_{SL} I \\ V_{dc} - V_{dc-ref} \\ P - V_{dc}^2 / R_c - R I^2 \\ g(\alpha, k, V, V_{dc}, \delta, I, \theta, P, Q) \end{bmatrix} \quad (6)$$

4. Yakıt Hücresi

Enerji depolama sistemi elemanlarından birisi olan yakıt hücresi bu çalışma için tercih edilmiştir. Yakıt hücresi analizi gerçekleştirilen program içerisinde mevcuttur. Bu analiz programında kullanılan yakıt hücresi üç bölümden meydana gelmektedir. Üç bölümden oluşan yakıt hücresinde her bölümün ayrı

ayrı özellikleri bulunmaktadır. Kullanılan yakıtın elektrik enerjisi üretimine hazır hale getirildiği kısım ilk bölüm olan yakıt işlemcisidir. Yakıt hücresi kısmı Elektrokimyasalların kullanılması ile elektrik enerjisinin üretildiği kısım ikinci bölüm olan yakıt hücresi bölümüdür. Sistemde AC güç akım, gerilim ve frekansı bir arada bulunduran üçüncü bölüm ise güç bağlantı birimidir. Güç bağlantı birimi çalışma koşullarına göre şebeke güç dönüşümünü ayarlayabilmektedir. Güç dönüşümü AC veya DC olabilmektedir. AC veya DC güç dönüşüm işlemleri eş zamanlı olarak yapılmaktadır.

Yakıt hücresinde sabit güç kontrolü kullanılmaktadır. Yakıt hücre akımının sabit güç kontrolüne ve farklı sınır değerlerine bağlı olarak hesaplanması durumları Denklem 7 ve Denklem 8 arasında gösterilmiştir.

$$I_k = \frac{(P_{ref} / V_{k0} - i_k)}{T_e} \quad (7)$$

$$I_k = \left(\frac{U_{limir} q H_2}{2K_r} - i_k \right) \frac{1}{T_e} \quad (8)$$

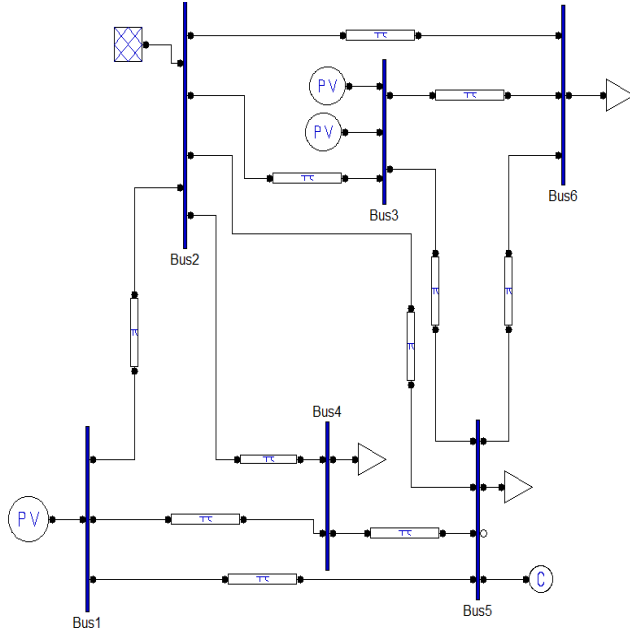
Burada, Ik yakıt hücresi akımı, Vk0 başlangıç DC gerilimi, ik başlangıç yakıt hücresi akımı, Te küçük zaman sabiti, Ulimir minimum-maksimum yakıt sarfiyatı, H2 hidrojen oranı, q soğutma katsayısı, Kr DC katsayısıdır. Yakıt hücresinin kullanımında bağlı olduğu şebeke ile aynı gerilim seviyesinde çalışması gerekmektedir. Bunun için gerekli olan genlik ve açı değerleri modülasyon indeksi tarafından ayarlanabilmektedir. Yakıt hücresinin modülasyon indeksi hesaplaması Denklem 9'da gösterilmiştir.

$$m = \frac{-(K_m (V_{ref} - V_s) - m)}{T_m} \quad (9)$$

Burada, m modülasyon genliği, Km modülasyon katsayısı, Vref referans gerilim, Vs ölçülen şebeke gerilimi, Tm modülasyon zaman sabitidir [15].

5. Benzetim Çalışması

Analizi yapılan bu çalışmada gerilim kararlılığı hem sürekli durum hem de geçici durum çalışmaları olarak ele alınmıştır. 6 baralı sistem detaylı olarak incelenmiştir. Bu çalışma Güç Sistemleri Analizi Programı (PSAT) ortamında gerçekleştirilmiştir [16]. Analizi yapılan sistem Şekil 2'de gösterilmiştir.



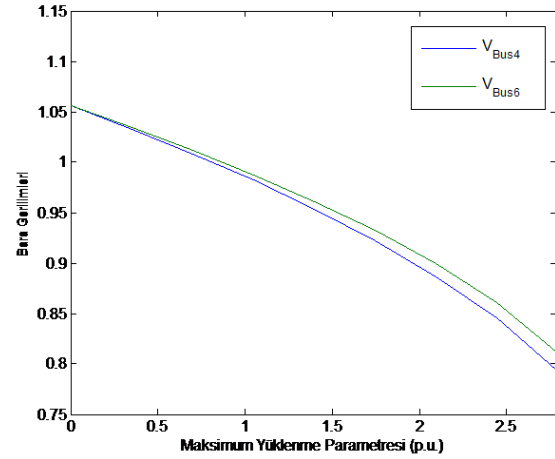
Şekil 2. Analiz yapılan sistemi.

Bu sistemde 2 numaralı bara salınım barası olarak kullanılırken, 1 ve 3 numaralı baralar generatör barası ve 4, 5, 6 numaralı baralar ise yük barası olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada sürekli durum analizinde STATCOM 5 numaralı yük barasına bağlanmıştır. Geçici durum analizinde ise hatta kesicinin açması durumu incelenmiştir. Kesici açması durumu 2 ile 5 numaralı hatlar arasında meydana gelmiştir. Geçici durumda sürekli durumda olduğu gibi STATCOM ve yakıt hücresi aynı baralara bağlıdır. STATCOM'un gücü 100 MVA olarak belirlenirken, yakıt hücresinin gücü hem sürekli durum hem de geçici durum için farklı güç değerlerinde kullanılmıştır. Yakıt hücresinin gücü ilk etapta 100 MVA olarak belirlenmiştir.

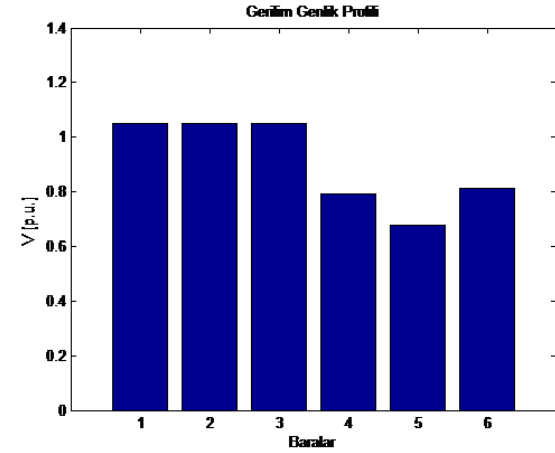
5.1. Benzetim çalışması sonuçları

Yapılan bu çalışmada 3 ayrı analiz gerçekleştirilmiştir. İlk analizde STATCOM ve yakıt hücresinin bağlanmadığı durum, ikinci analizde STATCOM'un 5 numaralı baraya bağlanma durumu ve son analizde ise STATCOM'un 5 numaralı baraya bağlandığı durum ve 3 numaralı baraya yakıt hücresinin farklı güç değerlerinde sisteme bağlanması durumları hem sürekli durum hem de geçici durum açısından incelenmiştir. 100 MVA gücündeki STATCOM'un 5 numaralı baraya bağlandığı gerilim değeri yük akışı analizine göre 0.675 p.u olarak belirlenmiştir. Sürekli durum çalışmada STATCOM ve yakıt hücresinin bağlanmadığı durum, STATCOM'un 5 numaralı baraya bağlandığı durum ve STATCOM'un 5 numaralı baraya bağlandığı durum ile birlikte yakıt hücresinin yüzde 10 güç değerinde bağlı olduğu durumdaki elde edilen maksimum yüklenme

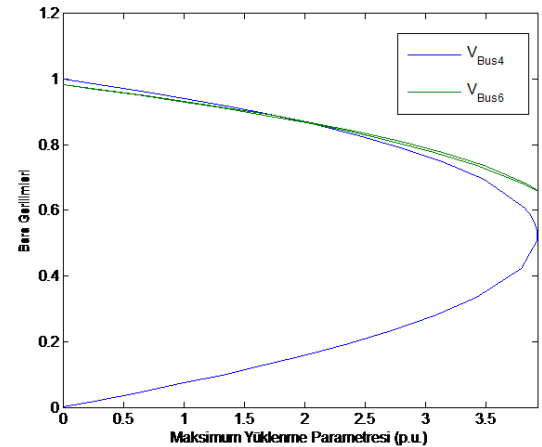
parametresi ve bara gerilim profilleri sonuçları Şekil 3 ile Şekil 8 arasında gösterilmiştir.



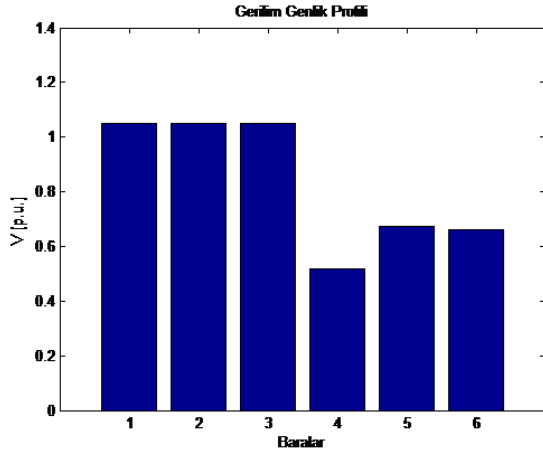
Şekil 3. Sürekli çalışmada STATCOM ve yakıt hücresinin bağlanmadığı durumdaki bara gerilimi-maksimum yüklenme parametresi ilişkisi



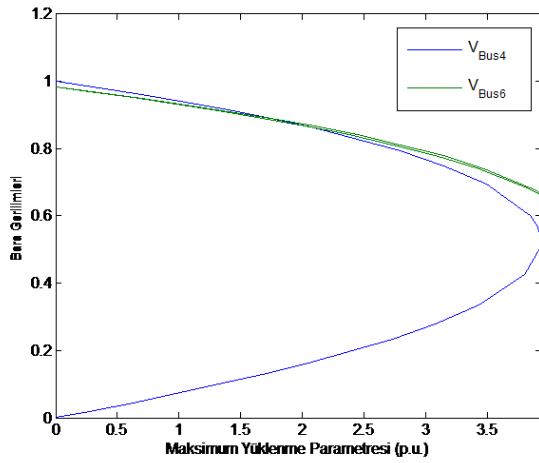
Şekil 4. Sürekli çalışmada STATCOM ve yakıt hücresinin bağlanmadığı durumdaki bara gerilim profilleri



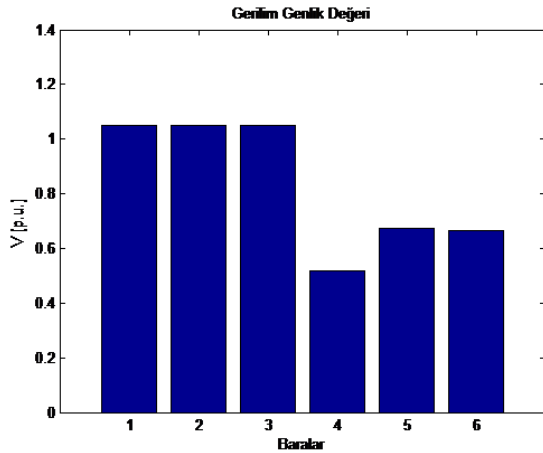
Şekil 5. Sürekli çalışmada STATCOM'un bağlı olduğu durumdaki bara gerilimi-maksimum yüklenme parametresi ilişkisi



Şekil 6. Sürekli çalışmada STATCOM'un bağlı olduğu durumdaki bara gerilim profilleri



Şekil 7. Sürekli çalışmada STATCOM ve yakıt hücresinin bağlı olduğu durumdaki bara gerilimi-maksimum yüklenme parametresi ilişkisi



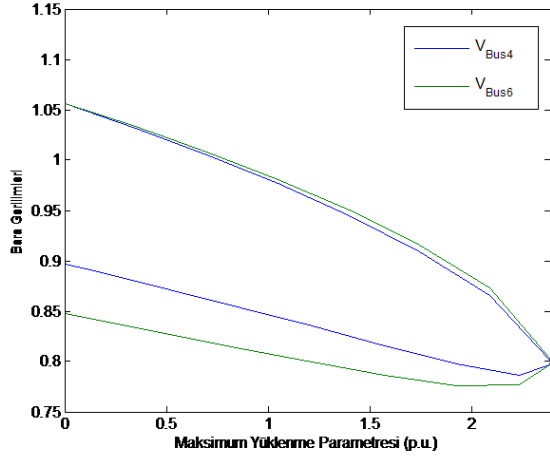
Şekil 8. Sürekli çalışmada STATCOM ve yakıt hücresinin bağlı olduğu durumdaki bara gerilim profilleri

Sürekli çalışma durumunda STATCOM ve yakıt hücresinin bağlanmadığı durumdaki maksimum yüklenme parametre değeri 2.7836, sürekli çalışmada STATCOM'un bağlı olduğu durumdaki maksimum yüklenme parametresi 3.9305 ve sürekli çalışmada STATCOM ve yakıt hücresinin yüzde 10 güç değerinde bağlı olduğu durumdaki maksimum yüklenme parametresi 3.9366 olarak elde edildiği görülmüştür. İkinci ve üçüncü analizlerde kullanılan STATCOM ve yakıt hücresi sayesinde bara gerilim profillerinde ilk analize göre sürekli durum çalışmasında iyileştiği görülmektedir. Sürekli çalışmadaki 3. analizde kullanılan yakıt hücresinin farklı güç değerlerinde kullanılması ile elde edilen değerleri sonuçları Tablo 1'de gösterilmiştir.

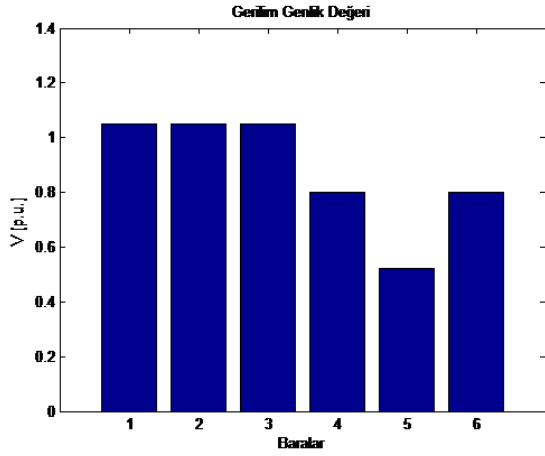
Tablo 1. Sürekli durumda farklı yakıt hücresi güç değerlerinde elde edilen maksimum yüklenme parametresi sonuçları

Yakıt hücresi güç oranları	Maksimum yüklenme parametresi sonuçları
%30	3.9476
%50	3.9573
%70	3.9663
%90	3.9743

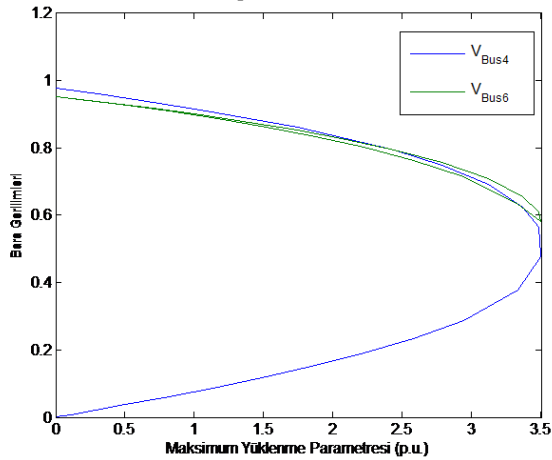
Benzer senaryolar geçici durum içinde detaylı olarak incelenmiştir. 2 ile 5 numaralı baralar arasındaki kesicinin belli bir zaman sistemi açıp kapaması esnasında gerilim kararlılığı analizi yorumlanmıştır. Geçici durum için ilk analizde STATCOM ve yakıt hücresinin bağlanmadığı durum, ikinci analizde STATCOM'un 5 numaralı baraya bağlanma durumu ve son analizde ise STATCOM'un 5 numaralı baraya bağlandığı durum ve 3 numaralı baraya yakıt hücresinin farklı güç değerlerinde sisteme bağlanması durumları hem sürekli durum hem de geçici durum açısından incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 9 ile Şekil 14 arasında gösterilmiştir.



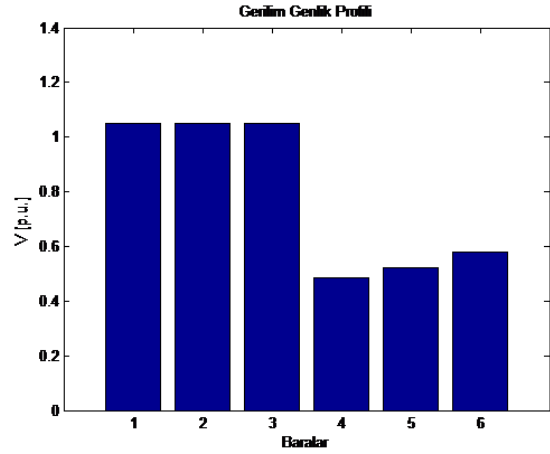
Şekil 9. Geçici çalışmada STATCOM ve yakıt hücresinin bağlanmadığı durumdaki bara gerilimi-maksimum yüklenme parametresi ilişkisi



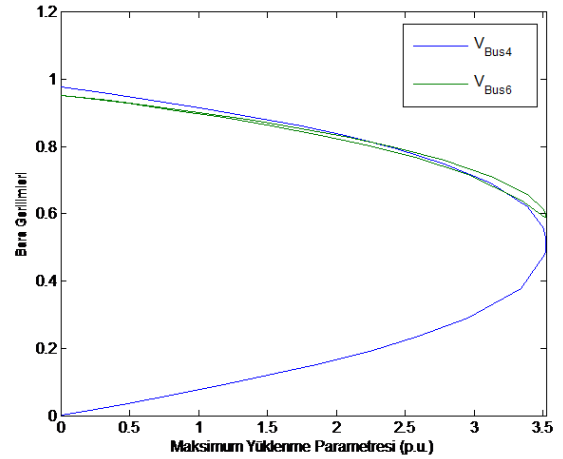
Şekil 10. Geçici çalışmada STATCOM ve yakıt hücresinin bağlanmadığı durumdaki bara gerilim profilleri



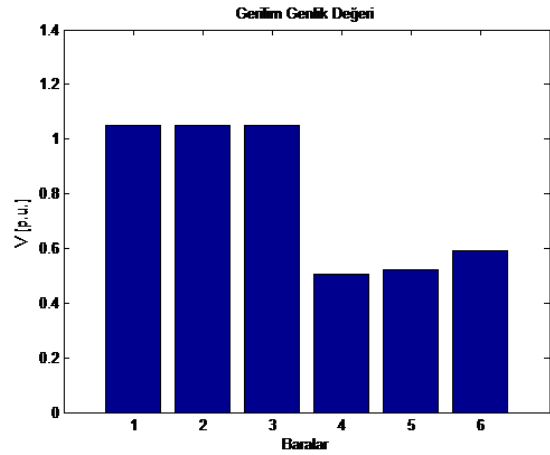
Şekil 11. Geçici çalışmada STATCOM'un bağlı olduğu durumdaki bara gerilimi-maksimum yüklenme parametresi ilişkisi



Şekil 12. Geçici çalışmada STATCOM'un bağlı olduğu durumdaki bara gerilim profilleri



Şekil 13. Geçici çalışmada STATCOM ve yakıt hücresinin bağlı olduğu durumdaki bara gerilimi-maksimum yüklenme parametresi ilişkisi



Şekil 14. Geçici çalışmada STATCOM ve yakıt hücresinin bağlı olduğu durumdaki bara gerilim profilleri

Geçici durumda STATCOM ve yakıt hücresinin bağlanmadığı durumdaki maksimum yüklenme parametre değeri 2.3824, geçici çalışma durumunda STATCOM'un kullanılması ile maksimum yüklenme parametre değeri 3.5007, geçici durumda STATCOM ve yakıt hücresinin yüzde 10 güç değerinde bağlı olduğu durumdaki maksimum yüklenme parametresi 3.5237 olarak elde edildiği görülmüştür. İkinci ve üçüncü analizlerde kullanılan STATCOM ve yakıt hücresi sayesinde bara gerilim profillerinde ilk analize göre geçici durum çalışmasında iyileştiği görülmektedir. Geçici durum çalışmadaki 3. analizde kullanılan yakıt hücresinin farklı güç değerlerinde kullanılması ile elde edilen sonuçlar Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Geçici durumda farklı yakıt hücresi güç değerlerinde elde edilen maksimum yüklenme parametresi sonuçları

Yakıt hücresi güç oranları	Maksimum yüklenme parametresi sonuçları
%30	3.5506
%50	3.5730
%70	3.5923
%90	3.6090

6. Sonuçlar

Yapılan bu çalışmada, gerilim kararlılığı analizlerinde yaygın olarak kullanılan FACTS cihazlarından birisi olan STATCOM'un güç sistemindeki etkinliği arttırmak için farklı güç değerlerinde yakıt hücresinin kullanım durumu detaylı olarak incelenmiştir. Hem sürekli çalışma hem geçici çalışma durumlarındaki maksimum yüklenme parametre değeri ve bara gerilim profilleri üzerindeki etkiler analiz edilmiştir. Yakıt hücresinin sistemin yüklenebilirliği arttırması ve bara gerilim profillerinin daha iyi hale getirilmesi bu çalışmada sağlanmıştır. Bara gerilim çalışma sınırlarının kararlı bölgede olmasında ve sistemin güvenilirliğinin sağlanmasında STATCOM ve yakıt hücresinin birlikte kullanılmasının başarılı olduğu bu çalışmada görülmüştür. Bara gerilim profilleri açısından STATCOM ve yakıt hücresinin kullanılmadığı durumda en çok etkilenen bara 5 numaralı bara olurken, STATCOM ve STATCOM ile yakıt hücresinin kullanılmasında en çok etkilenen bara 6 numaralı bara olmuştur. Bu çalışma, yakıt hücresinin hem baraya bağlanan hem de iletim hattına bağlanan farklı FACTS cihazları ile birlikte farklı test sisteminde kullanılması ve gerilim kararlılığı açısından değişik yaklaşımları ortaya koyması açısından bundan sonraki yapılması düşünülen çalışmalara yol gösterecektir.

Kaynaklar

- [1] Rao P, Crow ML, Yang Z. STATCOM control for power system voltage control applications. *IEEE Transactions on power delivery*, 15(4), 1311-1317, 2000.
- [2] Canizares CA, Pozzi M, Corsi S, Uzunovic E. STATCOM modeling for voltage and angle stability studies. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 25(6), 431-441, 2003.
- [3] Chen BS, Hsu YY. A minimal harmonic controller for a STATCOM. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(2), 655-664, 2008.
- [4] Mienski R, Pawelek R, Wasiak I. Shunt compensation for power quality improvement using a STATCOM controller: modelling and simulation. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 151(2), 274-280, 2004.
- [5] Acha E, Kazemtabrizi B. A new STATCOM model for power flows using the Newton-Raphson method. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(3), 2455-2465, 2013.
- [6] Bhargava A, Pant V, Das B. An improved power flow analysis technique with STATCOM. *International Conference on Power Electronic, Drives and Energy Systems*, New Delhi, India, 12-15 December, 2006.
- [7] Puleston PF, Gonzalez SA, Valenciaga F. A STATCOM based variable structure control for power system oscillations damping. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 29(3), 241-250, 2007.
- [8] Padiyar KR, Prakash VS. Tuning and performance evaluation of damping controller for a STATCOM. *International journal of electrical power & energy systems*, 25(2), 155-166, 2003.
- [9] Luo A, Tang C, Shuai Z, Tang J, Xu XY, Chen D. Fuzzy-PI-based direct-output-voltage control strategy for the STATCOM used in utility distribution systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(7), 2401-2411, 2009.
- [10] Stella M, Dash PK, Rout PK. Function based hybrid-fuzzy genetic controller for VSI based STATCOM. *International Journal of Knowledge-based and Intelligent Engineering Systems*, 11(3), 139-156, 2007.
- [11] Sode-Yome A, Mithulananthan N. Comparison of shunt capacitor, SVC and STATCOM in static voltage stability margin enhancement. *International Journal of Electrical Engineering Education*, 41(2), 158-171, 2004.
- [12] Bhole SS, Nigam P. Improvement of voltage stability in power system by using SVC and STATCOM. *International Journal of Advanced*

Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, 4(2), 76-81, 2015.

- [13] Kamarposhti MA, Alinezhad M. Comparison of SVC and STATCOM in static voltage stability margin enhancement. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 3(2), 297-302, 2009.
- [14] Canizares CA. Power flow and transient stability models of FACTS controllers for voltage and angle stability studies. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37077)*, Singapore, 23-27 January, 2000.
- [15] Yildirim B, Gencoglu MT. Oscillatory stability and eigenvalue analysis of power system with microgrid. *Electrical Engineering*, 100(4), 2351-2360, 2018.
- [16] Milano, F. An open source power system analysis toolbox. *IEEE Transactions on Power systems*, 20 (3), 1199-1206, 2005.



Araştırma Makalesi/Research Article

3-Point bending behaviors of sandwich panels with hemp fibers

Onur KELTEN ¹, Abdulmecit GÜLDAŞ ²,

¹ Gazi University, Faculty of Technology, Department of Manufacturing, Ankara, Türkiye

¹ Turkish Aerospace Industries, Inc., Ankara, Türkiye

² Gazi University, Faculty of Technology, Department of Manufacturing, Ankara, Türkiye

Keywords

Hemp fiber
3 Point bending test
Sandwich model
Statical analysis

Article history:

Received: 04.07.2023

Accepted: 27.12.2023

Abstract: The article discusses the increasing interest in natural fibers as a substitute for synthetic fibers in the development of composites due to the depletion of crude oil reserves, environmental concerns and regulations targeting the reduction of carbon emissions. The mechanical properties of natural fibers are closely linked to their chemical composition and structure, which can be influenced by various factors such as harvesting time, growth conditions, storage practices, extraction techniques and pre fabrication chemical treatments. The article also explains the finite element analysis steps for a sandwich structure created using hemp fibers with a 3 mm diameter and 20 mm spacing between two carbon prepreg layers for a 3-point bending test. Finally, numerical analysis outputs of sandwich structures created with hemp fibers at intervals of 10 mm, 20 mm, and 30 mm, and diameters of 2 mm, 3 mm, and 4 mm, are presented graphically to demonstrate the effects of changes in hemp fiber spacing and diameter on stress.

Atf için/To Cite:

Kelten O. Gültaş A. 3-Point bending behaviors of sandwich panels with hemp fibers. International Journal of Technological Sciences, 15(3), 103-110, 2023.

Kenevir lifli sandviç panellerin 3 nokta eğilme davranışları

Anahtar Kelimeler

Kenevir elyaf
3 Nokta eğilme testi
Sandviç model
Statik analiz

Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 04.07.2023

Kabul Tarihi: 27.12.2023

Öz: Bu makale, ham petrol rezervlerinin azalması, çevresel endişeler ve karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik düzenlemeler gibi nedenlerle, kompozitlerin geliştirilmesinde sentetik liflerin yerine doğal liflerin artan ilgisini tartışmaktadır. Doğal liflerin mekanik özellikleri, kimyasal bileşimleri ve yapısı ile yakından ilişkilidir ve hasat zamanı, büyüme koşulları, depolama uygulamaları, çıkarma teknikleri ve ön üretim kimyasal işlemler gibi çeşitli faktörler tarafından etkilenebilir. Makalede ayrıca iki karbon prepreg tabakası arasında 3 mm çapında 20 mm aralıklarla kenevir lifleri kullanılarak oluşturulan bir sandviç yapının 3 nokta eğilme testi için sonlu elemanlar analiz adımları anlatılmıştır. Son olarak da kenevir lifi aralıklarındaki değişimin ve kenevir lifi çapındaki değişimin gerilime etkilerini göstermek için 10 mm, 20 mm ve 30 mm aralıklarla; 2 mm, 3 mm ve 4 mm çaplarındaki kenevir lifleri kullanılarak oluşturulan sandviç yapılara ait nümerik analiz çıktıları grafik olarak verilmiştir.

1. Introduction

Over the last century, the invention and development of artificial polymers have significantly propelled the advancement of society and technology, while providing immense convenience in people's daily routines and occupations [1]. In addition to this plastics are considered the main cause of pollution of river, sea and ocean ecosystems [2]. The perception of the

depletion of crude oil reserves, combine with fresh regulations targeting the reduction of carbon emissions and amplified demands from consumers for sustainable products, has intensified the pursuit of natural materials as a feasible substitute [3]. Because of increasing environmental concern and preservation, an expanding body of research is exploring the potential applications of natural fibers in the development of thermoset and thermoplastic composites. Furthermore,

* İlgili yazar/Corresponding author: onur.kelten@hotmail.com

the investigation of physical and chemical surface treatments to enhance the mechanical properties of these composites is gaining momentum [4]. Natural fibers are currently considered to be conventional fibers with some advantages including but not limited to renewability, widespread availability and cost effectiveness [5].

Natural fibers have the potential to be derived from a variety of sources, including plants, animals and minerals. In most cases, plant or vegetable fibers are used to reinforce polymer matrices [6]. Flax, hemp, sisal, jute and coconut are frequently utilized as natural fiber reinforcement materials in the development of thermosetting and thermoplastic polymer matrix composites [7]. The hemp plant is native to India and Persia. However, it can be grown in almost all temperate climatic conditions. Russia holds the distinction of being the most significant global producer of hemp fiber, contributing approximately one-third of the annual yield. Thanks to its exceptional strength and rigidity, hemp fiber holds significant promise as a highly effective reinforcement material in composite applications. The physical and mechanical properties of natural fibers and the primary type of glass fiber (E-Glass) are presented in Table 1 [4].

Table 1. List of plant fibers, physical and mechanical properties and glass fiber [4]

Fiber	Length (mm)	Density (g/cm ³)	Failure Strain (%)	Tensile Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Moisture Content (%)	Specific Stiffness (E/ρ) (GPa)
Hemp	5-55	1.4	1.6	550-1110	30-70	8	21-50
Jute	2-120	1.3-1.5	1.5-1.8	393-800	10-55	12	6-34
Sisal	900	1.3-1.5	2.0-2.5	507-855	9.4-28	11	6-18
Flax	5-900	1.5	1.2-3.2	345-1830	27-80	7	18-53
Ramie	900-1200	1.5	2.0-3.8	400-938	44-128	12-17	29-85
E-glass	Continuous	2.5	2.5	2000-3000	70	<0.1	28

Bast fibers, which include flax, hemp and ramie fibers, are emerging as a promising substitute for synthetic fibers across a range of automotive, household and industrial applications. These fibers offer several benefits, including low cost, reduced density, low energy consumption, superior specific strength and specific modulus. Additionally, they are biodegradable of natural fiber reinforced composites is influenced by various factors such as moisture, temperature, UV exposure and the activities of microorganisms in outdoor environments. The life-cycle assessment and environmental impact assessment studies on plant fibers and bio-composites can serve as a valuable guide for researchers in the quest to develop new materials that minimize their impact on the environment [8].

The mechanical characteristics of natural fibers are closely linked to their chemical composition and structure, which can be influenced by various factors such as harvesting time, growth conditions, storage practices, extraction techniques and pre-fabrication chemical treatments. Optimum harvesting time is

crucial, as delaying by just five days beyond the recommended window may lead to a reduction in mechanical strength by as much as 15% [9].

The impact of different fiber volume ratios on the dynamic, mechanical, structural, and free vibration characteristics of hemp fiber composite has been investigated. Results show that a composite with 30% volume fraction exhibits the highest damping factor. Further, the research examines the influence of weaving patterns of fibers in natural fiber composite on the free vibration behavior of woven banana and jute fiber composite using experimental analysis [10].

The use of natural and synthetic fibers in combination can help to overcome any weaknesses or deficiencies in either type of fiber, resulting in a stronger and more versatile material. The properties of a hybrid composite can be adjusted by varying the fiber structure, orientation, content, length, fabric-matrix bonding, and arrangement. Hybridizing composites can be achieved in two ways: interlaminar and intralaminar. Interlaminar involves depositing layers of lamina on top of each other to create a simple laminate. On the other hand, intralaminar involves reinforcing different fibers in a single matrix or layer [11]. Hybrid composites incorporate glass fibers instead of carbon fibers due to the former's comparatively lower cost and higher stiffness, strength, toughness, and impact resistance [12].

Effective fiber-matrix adhesion is a crucial factor that contributes to the superior mechanical properties of composite materials. Weak interfacial bonding is commonly attributed to insufficient surface adhesion between fibers and the matrix. Several studies have been conducted to investigate the efficacy of various chemical treatments in reducing the hydrophilicity of natural fibers (e.g. hemp, flax, sisal, kenaf, coir, and jute) to enhance their surface adhesion to the matrix and minimize moisture absorption [13]. The presence of hydrophilic surfaces in natural fiber composites can lead to weak bonding with hydrophobic polymer matrices. This, in turn, can lead to dimensional changes such as swelling due to moisture absorption, resulting in decreased mechanical performance. The alkali treatment is a widely used, cost-effective technique that effectively modifies the surface of natural lignocellulosic fibers (NLFs) to enhance their mechanical properties. An emerging approach to surface modification of NLFs is the application of graphene-oxide coating. Graphene, a one-atom-thick material, displays exceptional properties like high mechanical strength, specific surface area, and electrical conductivity [14].

Figure 1 highlights the demand for natural fiber-based materials in the automotive industry. However, it has been noted that automobile manufacturers worldwide have increasingly prioritized cost-effectiveness without compromising quality. The growing interest in

replacing petroleum-based synthetic materials with renewable resources like natural fibers in automotive applications stems from the benefits of recyclability and biodegradability. Additionally, natural fiber-reinforced composites can significantly reduce costs by approximately 20% and weight by 30% for automotive components [15].

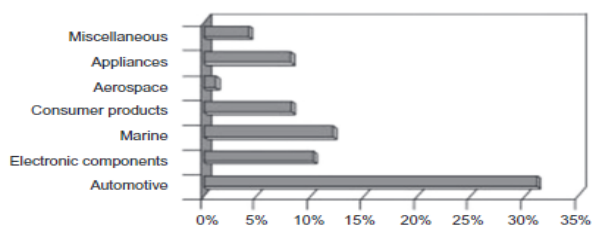


Figure 1. The use of natural fibers in automotive and other sectors [15]

Despite their potential benefits, the use of natural composites in the aircraft industry is still limited due to various challenges that need to be addressed. This is especially true for critical structural components, where safety standards for fire retardancy and crash safety pose significant barriers to the wider adoption of natural composites in this industry. However, certain interior components of commercial aircraft, such as in-cabin parts, have successfully incorporated natural fibers due to their advantageous properties of strength and lightness [16].

In light of the above information, it can be said that natural fibers are open to development, and therefore, their use is expected to increase.

2. Materials and Methods

This study focuses on investigating whether hemp fiber can serve as a viable alternative to inorganic and synthetic reinforcement materials. Specifically, the study examines the impact of incorporating hemp fiber, arranged in a grid-spine configuration, on the mechanical properties of a composite structural element. The composite structure consists of an epoxy matrix reinforced with woven carbon fiber. To create a mesh structure, hemp fibers of varying diameters were strategically positioned at different intervals. Epoxy resin, widely employed in the aerospace industry due to its resistance to environmental conditions, exceptional electrical and thermal properties, and high modulus, was chosen as the matrix material. The resulting composite material forms the core of a sandwich structure, with carbon prepreps positioned above and below. A CAD environment was utilized to model the constructed sandwich structure, followed by conducting comprehensive structural analyses.

The hemp fiber, chosen as the reinforcement element, was studied in three different diameters: 2 mm, 3 mm, and 4 mm. The objective was to analyze the impact of

diameter variation on the strength characteristics of the samples. Furthermore, the investigation also examined the effect of grid spacing on sample strength by introducing gaps of 10 mm, 20 mm, and 30 mm between fiber weaves.

A sandwich structure was created for finite element analysis by incorporating hemp fibers with diameters of 2 mm, 3 mm, and 4 mm at intervals of 10 mm, 20 mm, and 30 mm between two layers of carbon prepreg. The sample preparation strictly adhered to the guidelines specified in ASTM D 7264 standard. Three-dimensional models of the designated dimensions were meticulously designed using CATIA V5 software to facilitate accurate modeling.

2.1. Creation of finite element models

The construction of the finite element model for the samples and subsequent analysis were conducted utilizing the ABAQUS software. Following the transfer of models acquired from the CAD environment to the ABAQUS platform, a series of essential steps were taken. Initially, material properties were defined for each model, and subsequently, contact definitions were established to account for the interfaces formed between the models (Figure 2).

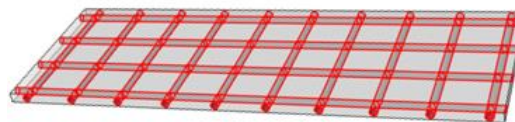


Figure 2. Representation of the interface between epoxy matrix and hemp fibers

The material properties assumptions for the sample are as follows:

- The range of elastic modulus values for hemp fibers, obtained from the literature, is 30-70 GPa. Therefore, separate analyses were conducted for elastic moduli of 30 GPa, 50 GPa, and 70 GPa. Additionally, a Poisson's ratio of 0.40 was assumed, in accordance with the literature.
- The elastic modulus for epoxy, taken from the literature, is 3 GPa, and the Poisson's ratio was assumed to be 0.37, also in line with the literature.
- The engineering constants for the prepreg material, obtained from the literature, are as Table 2:

Table 2. Mechanical properties of the carbon prepreg

E1	E2	E3	Nu12	Nu13	Nu23	G12	G13	G23
133500	8000	8000	0.3	0.3	0.3	3750	3750	3750

Hemp fibers and epoxy matrix are considered isotropic and homogeneous materials, so when defining the materials in ABAQUS, the elastic modulus and Poisson's ratio were deemed sufficient.

For carbon prepregs, characterized by their anisotropic nature, the material was defined using the aforementioned engineering constants. During the model construction process, a "Tie" contact definition was established between the components to ensure proper interfacial connectivity.

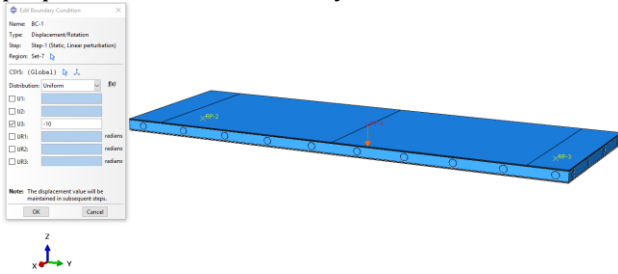


Figure 3. Load representation

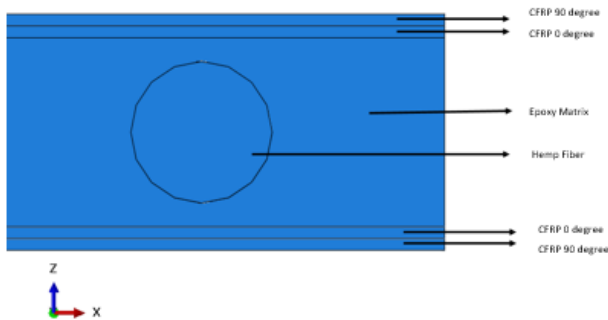


Figure 4. Sandwich model representation

The analysis of the specimen is conducted with fixed supports at two points. Additionally, to induce bending, a displacement of "-10mm" along the Z-axis at the center of the specimen was prescribed (Figure 3). During the meshing process, each subcomponent was individually organized. Accordingly, starting with the simplest geometry, the meshing of carbon prepregs was performed. The hexahedral element ("Hex") was chosen, which is commonly preferred for prismatic geometries. A unit mesh size of 4 was selected (Figure 5)

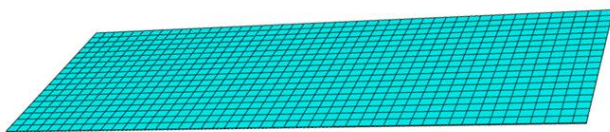


Figure 5. Meshing for carbon prepreg

Next, the meshing of the hemp fiber model with a more complex geometry was performed. The tetrahedral element ("Tet") was selected as the mesh shape, which is commonly preferred for intricate geometries. A unit mesh size of 2 was chosen (Figure 6).

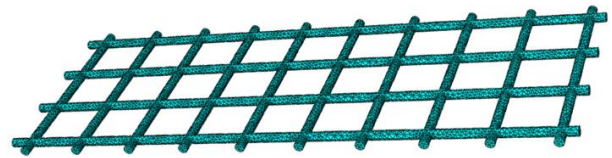


Figure 6. Meshing for hemp fibers

Finally, the meshing of the epoxy resin was performed. The tetrahedral element ("Tet") was selected as the mesh shape, which is commonly preferred for complex geometries. In order to enable the analysis, two different unit mesh sizes were utilized in this model. The unit mesh size of 0.8 was employed for the interface between the hemp fiber and epoxy matrix, while a unit mesh size of 2 was used for the remaining parts of the model. The tetrahedral element was chosen for both mesh patterns (Figure 7).



Figure 7. Meshing for epoxy matrix

All analysis studies were conducted under the same conditions. The difference in the number of unit meshes between the samples arises from variations in sample dimensions. Separate analyses were performed for each hemp fiber diameter, with hemp elastic modulus values of 70 GPa, 50 GPa, and 30 GPa, respectively.

3. Results

Stress values were obtained after conducting the analysis of the 3-point bending test. Based on these findings, it was observed that the maximum tensile stress occurred in the sandwich model comprised of hemp fibers, epoxy resin, and carbon prepregs, specifically in the structure with a 90-degree fiber alignment, woven at a diameter of 3 mm and spaced at 20 mm intervals. However, this study primarily focused on analyzing the stresses applied to the hemp fibers and their resistance to these stresses. Due to the isotropic and ductile nature of hemp, the evaluation was performed according to the Von Mises stress theory. Figures 8 and 9 present an examination of the maximum stresses experienced by the sandwich model. The results revealed that the highest stress concentrations were observed in the outermost layer of the sandwich model, particularly in the carbon prepregs with a 90-degree fiber orientation.

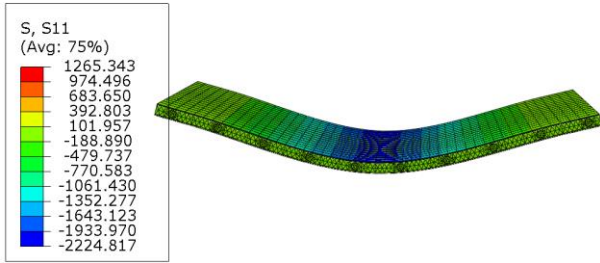


Figure 8. Maximum compression stress on the sandwich model

In Figure 8, when examining the stresses in the X-direction on the sandwich model, it is observed that the highest compressive stress occurs at the center of the specimen, with a value of 2224.8 MPa.

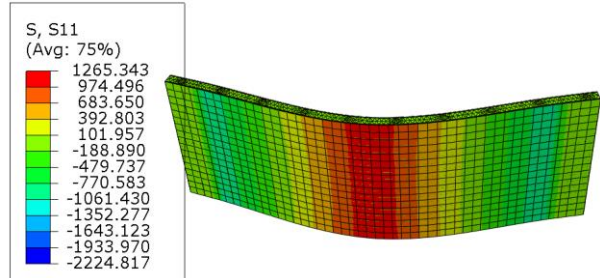


Figure 9. Maximum tensile stress on the sandwich model

In Figure 9, it is determined that the maximum tensile stress value on the sandwich model is located beneath the specimen, with a value of 1265.3 MPa.

Table 3. Tensile properties of hemp fibers as reported by different authors [4]

Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Elongation at break (%)
690		1.6
1235		4.2
310-750	30-60	2-4
550-900	70	1.6
690		1.6
895	25	
500-1040	32-70	1.6
920	70	
690-1000	50	1.0-1.6
920	70	1.7
270-900	20-70	1.6

Different tensile strength values have been given with Table 3. In this study, the tensile strength value has been within the range of 310-1040 (MPa) for the 30-70 GPa tensile modulus

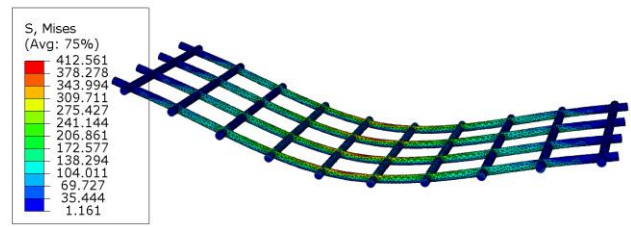


Figure 10. Von mises stresses on hemp fibers

Figure 10 examines the Von Mises stresses applied to the hemp fibers. The stress applied to the hemp fibers with an elastic modulus of 30 GPa is 412.6 MPa. This value is above the tensile strength of hemp fiber, which is 310 MPa.

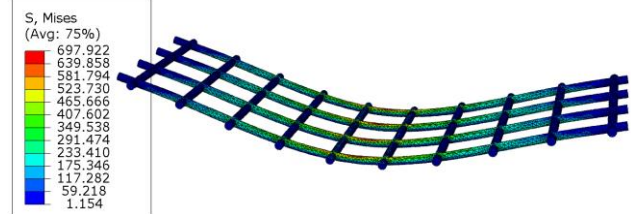


Figure 11. Von mises stresses on hemp fibers

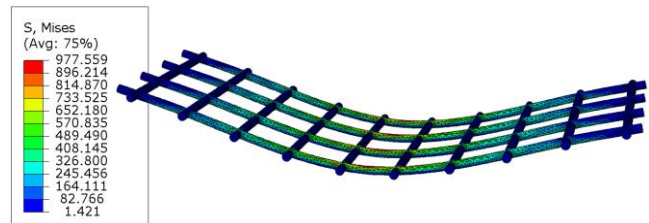


Figure 12. Von mises stresses on hemp fibers

Figure 11 and Figure 12 present the analysis results based on elastic modulus values of 50 GPa and 70 GPa for the hemp fibers. When examining the Von Mises stress applied to the hemp fibers, it is observed that the stress remains below the tensile strength of 675 MPa (for 50 GPa tensile modulus). However, observed stress on hemp fibers for 70 GPa is lower than tensile strength (1040 MPa).

Figure 13 demonstrates the effect of fiber spacing on stress for a fiber diameter of 2 mm.

Figure 14 illustrates the impact of fiber spacing on stress for a fiber diameter of 3 mm.

Figure 15 displays the influence of fiber spacing on stress for a fiber diameter of 4 mm.

According to numerical analysis results of all specimens are given as MPa unit below Table 4 And Table 5

Table 4. Specimen numbers

No	Specimen
1	Dia.=2 mm; Fiber Interval=10 mm
2	Dia.=2 mm; Fiber Interval=20 mm
3	Dia.=2 mm; Fiber Interval=30 mm
4	Dia.=3 mm; Fiber Interval=10 mm
5	Dia.=3 mm; Fiber Interval=20 mm
6	Dia.=3 mm; Fiber Interval=30 mm
7	Dia.=4 mm; Fiber Interval=10 mm
8	Dia.=4 mm; Fiber Interval=20 mm
9	Dia.=4 mm; Fiber Interval=30 mm

Table 5. Von mises stress presentation

No	E=70 GPa; Tensile Strength=1040 MPa		E=50 GPa; Tensile Strength=675 MPa		E=30 GPa; Tensile Strength=310 MPa	
	Von Mises	Status (%)	Von Mises	Status (%)	Von Mises	Status (%)
1	1089,38	4,75	781,15	15,73	465,70	50,22
2	1125,27	8,20	804,23	19,15	476,05	53,57
3	1169,08	12,41	836,31	23,90	495,51	59,84
4	931,08	-10,47	668,97	-0,89	402,61	29,87
5	977,56	-6,00	697,92	3,40	412,56	33,08
6	957,44	-7,94	683,15	1,21	404,97	30,64
7	852,62	-18,02	608,04	-9,92	360,17	16,18
8	859,86	-17,32	614,40	-8,98	363,41	17,23
9	873,99	-15,96	624,01	-7,55	369,99	19,35

In the course of our analysis according to Table 5, wherein an elastic modulus of E=30 GPa was presumed for hemp fibers, it was observed that damage manifested universally across all tested specimens. Upon revising our considerations to E=50 GPa, it was observed that all specimens featuring 2 mm diameter fibers exhibited damage, whereas specimens composed of 3 mm diameter fibers displayed damage solely at intervals of 10 mm. Notably, in specimens with a 4 mm diameter, damage remained entirely absent. When extending our assessment to E=70 GPa, a consistent pattern emerged: damage was evident across all specimens employing 2 mm diameter fibers, while specimens employing 3 mm and 4 mm diameter fibers remained entirely free from damage.

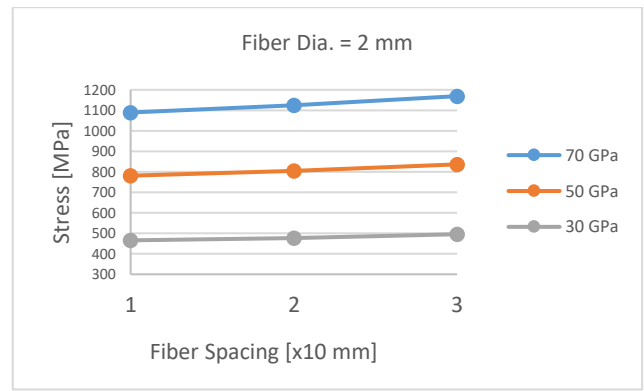


Figure 13. Effect of fiber spacing on stress distribution

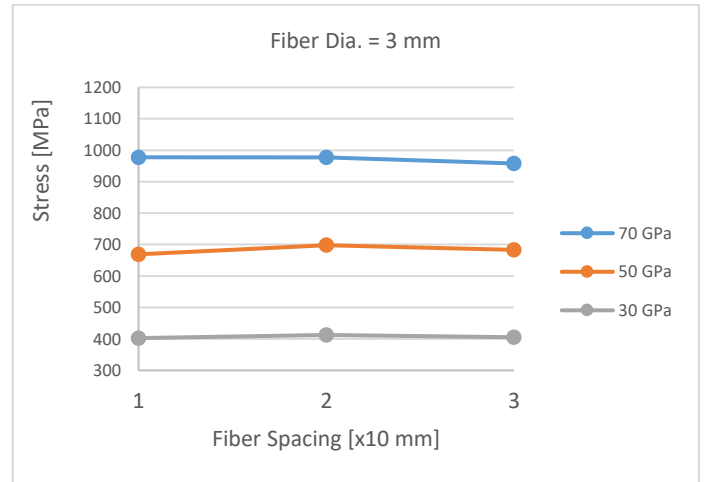


Figure 14. Effect of fiber spacing on stress distribution

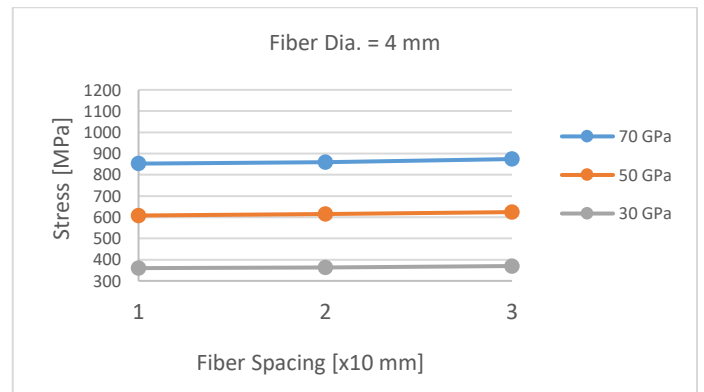


Figure 15. Effect of fiber spacing on stress distribution.

On the other hand, there is another study in the literature on composite materials reinforced with another natural fiber, flax. In this study, the bending strength of the material has been increased by using flax fiber [17].

4. Conclusions

Upon reviewing the relevant studies, it is evident that the concept of sustainability has emerged prominently, particularly considering the high production costs and environmental impact associated with synthetic fibers. As a result, the utilization of natural fibers in various industries is expected to witness a gradual increase.

This study focuses on the implementation of three different hemp fibers with diameters of 2 mm, 3 mm, and 4 mm. These fibers were woven at intervals of 10 mm, 20 mm, and 30 mm to construct a composite structure forming the core of a sandwich model. Subsequently, the sandwich composite materials underwent a three-point bending simulation to examine the influence of hemp fiber reinforcement. Based on the analyses conducted on the designed sandwich structures, it was observed that altering the fiber spacing for fibers of the same diameter did not result in significant variations in fiber stresses. The tensile strength of hemp fiber is considered to be within the range of 310-1040 MPa. When the analysis results of a specimen with a diameter of 3 mm and a spacing of 20 mm are compared to these strength values, it is observed that stress falls below the strength values for 30 GPa, 50 GPa, and 70 GPa. Consequently, no fracture is anticipated in the core of the sandwich model during the three-point bending test. However, when comparisons are made for other diameter and spacing values, it is observed that as the diameter increases, the specimen's strength also increases, and as the fiber spacing increases, the strength of the specimen decreases.

In the context of aviation applications, the weight aspect of hemp fiber implementation necessitates the optimization of mesh structures. Consequently, an optimization study is recommended to establish an optimal balance between fiber spacing, diameter, and the overall weight of the sandwich model.

Expanding the scope of this research entails potential modifications in the applied methodologies. For instance, hybrid composite materials comprising both synthetic and natural fibers can be investigated through similar analyses. Additionally, exploring the impact of epoxy quantity on specimen strength and conducting surface treatment studies to enhance the interfacial bonding between natural fibers and polymer epoxy materials are avenues worth exploring, with a focus on assessing their effects on material strength.

Acknowledgment

When preparing this article, I could not have achieved this success without the valuable support of a reputable institution like TUSAŞ. It was possible to complete this work thanks to the resources, guidance, and motivation

provided by you. I sincerely thank all the employees and managers of TUSAŞ who contributed to this work.

References

- [1] D. Zeng *et al.*, "Mechanical Properties and Tensile Model of Hemp-Fiber-Reinforced Poly(butylene adipate-co-terephthalate) Composite," *Materials*, vol. 15, no. 7, Apr. 2022, doi: 10.3390/ma15072445.
- [2] C. Dolza, E. Gonga, E. Fages, R. Tejada-Oliveros, R. Balart, and L. Quiles-Carrillo, "Green Composites from Partially Bio-Based Poly(butylene succinate-co-adipate)-PBSA and Short Hemp Fibers with Itaconic Acid-Derived Compatibilizers and Plasticizers," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 10, May 2022, doi: 10.3390/polym14101968.
- [3] C. I. Madueke, O. M. Mbah, and R. Umunakwe, "A review on the limitations of natural fibres and natural fibre composites with emphasis on tensile strength using coir as a case study," *Polymer Bulletin*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, Apr. 01, 2022. doi: 10.1007/s00289-022-04241-y.
- [4] J. P. Manaia, A. T. Manaia, and L. Rodrigues, "Industrial Hemp Fibers: An Overview," *Fibers*, vol. 7, no. 12, p. 106, Dec. 2019, doi: 10.3390/fib7120106.
- [5] B. Murali, P. Yogesh, N. K. Karthickeyan, and D. Chandramohan, "Multi-potency of bast fibers (flax, hemp and jute) as composite materials and their mechanical properties: A review," *Mater Today Proc*, vol. 62, pp. 1839–1843, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.01.001.
- [6] R. Sepe, F. Bollino, L. Boccarusso, and F. Caputo, "Influence of chemical treatments on mechanical properties of hemp fiber reinforced composites," *Compos B Eng*, vol. 133, pp. 210–217, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2017.09.030.
- [7] M. Suriyaprakash, M. Nallusamy, K. Shri Ram Shanjai, N. Akash, and V. Rohith, "Experimental investigation on mechanical properties of Ramie, Hemp fiber and coconut shell particle hybrid composites with reinforced epoxy resin," *Mater Today Proc*, vol. 72, pp. 2952–2956, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2022.08.091.
- [8] C. Lu *et al.*, "Towards high-performance textile-structure composite: Unidirectional hemp fiber tape and their composite," *Ind Crops Prod*, vol. 189, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.indcrop.2022.115821.
- [9] Md. M. Billah, Md. S. Rabbi, and A. Hasan, "A Review on Developments in Manufacturing Process and Mechanical Properties of Natural Fiber Composites," *Journal of Engineering Advancements*, vol. 2, no. 01, pp. 13–23, Feb. 2021, doi: 10.38032/jea.2021.01.003.

- [10] S. P. Singh, A. Dutt, and C. K. Hirwani, "Mechanical, Modal and Harmonic Behavior Analysis of Jute and Hemp Fiber Reinforced Polymer Composite," *Journal of Natural Fibers*, vol. 20, no. 1, 2023, doi: 10.1080/15440478.2022.2140328.
- [11] J. Edwin Raja Dhas and M. Arun, "A review on development of hybrid composites for aerospace applications," *Mater Today Proc*, vol. 64, pp. 267–273, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.04.511.
- [12] N. Murugu Nachippan, M. Alphonse, V. K. Bupesh Raja, S. Shasidhar, G. Varun Teja, and R. Harinath Reddy, "Experimental investigation of hemp fiber hybrid composite material for automotive application," *Mater Today Proc*, vol. 44, pp. 3666–3672, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.798.
- [13] F. Bollino, V. Giannella, E. Armentani, and R. Sepe, "Mechanical behavior of chemically-treated hemp fibers reinforced composites subjected to moisture absorption," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 22, pp. 762–775, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.11.152.
- [14] P. H. P. M. da Silveira *et al.*, "Effect of Alkaline Treatment and Graphene Oxide Coating on Thermal and Chemical Properties of Hemp (*Cannabis Sativa* L.) Fibers," *Journal of Natural Fibers*, vol. 19, no. 15, pp. 12168–12181, 2022, doi: 10.1080/15440478.2022.2053265.
- [15] D. Verma and I. Senal, "Natural fiber-reinforced polymer composites," in *Biomass, Biopolymer-Based Materials, and Bioenergy: Construction, Biomedical, and other Industrial Applications*, Elsevier, 2019, pp. 103–122. doi: 10.1016/B978-0-08-102426-3.00006-0.
- [16] L. Samant, F. A. O. Fernandes, S. Jose, and R. J. Alves de Sousa, "Natural Composites in Aircraft Structures," 2022, pp. 113–126. doi: 10.1007/978-3-030-91873-6_5.
- [17] Yeraltı C. *Polimer Esaslı Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemenin Keten İpliği İle Güçlendirilmesi*. Msc. Thesis, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2021

Araştırma Makalesi/Research Article

Farklı malzemelere sahip köpük çekirdekli sandviç plaklarda tabaka kalınlıklarının burkulma davranışına etkisi

Derya Çıraklı ¹, Mustafa Halûk Saraçoğlu ², Uğur Albayrak ³

¹Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 43100, Kütahya, Türkiye

²Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 43100, Kütahya, Türkiye

³Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 26480, Eskişehir, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Burkulma analizi
İnce plak
Köpük çekirdek
Sandviç plak
Kritik burkulma yükü

Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 10.10.2023
Kabul Tarihi: 29.12.2023

Öz: Sandviç plaklar, iki ince cidar tabakası arasında kalın bir çekirdek tabakası olmak üzere toplam üç tabakadan oluşur. Cidar tabakaları eğilmeye karşı direnç sağlarken, çekirdek tabakası kaymaya karşı direnç sağlar. Genel amaçlı sonlu elemanlar yazılımları, yapıların davranışını araştırmak için en uygun ve yaygın olarak kullanılan analiz yöntemlerinden birisidir. Bu analiz programları sayesinde birçok tasarım parametresi kolaylıkla incelenebilmektedir. Bu çalışmada, çekirdek tabakası kalınlığının cidar tabakası kalınlığına oranı 7 ile 9 arasında olan dört kenarından basit mesnetli sandviç kare plakaların burkulma davranışı genel amaçlı sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak incelenmiştir. Sabit bir toplam kalınlığa sahip sandviç plakaların cidar ve çekirdek tabaka kalınlıkları değiştirilerek kalınlık değişiminin etkisi araştırılmıştır. Aynı zamanda cidar ve çekirdek tabakalarının malzemeleri de değiştirilerek burkulma davranışına en uygun tasarım ortaya konmuştur. Bu amaçla 2 farklı cidar malzemesi, 5 farklı çekirdek malzemesi, 11 farklı kalınlık oranı ile 110 analiz yapılmıştır. Yapılan analizlerden elde edilen sonuçlara göre en büyük burkulma yükü çelik cidarlı ve PVC H200 çekirdekli sandviç plakta 282.108 N/mm² olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar grafiklerle sunularak sandviç plakların burkulmaya karşı en uygun tasarımı belirlenmiştir.

Atıf için/To Cite:

Çıraklı D. Saraçoğlu M.H. Albayrak U. Farklı Malzemelere Sahip Köpük Çekirdekli Sandviç Plaklarda Tabaka Kalınlıklarının Burkulma Davranışına Etkisi. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 15(3), 111-117, 2023.

The effect of layer thicknesses on buckling behavior in foam core sandwich plates with various materials

Keywords

Buckling analysis
Thin plate
Foam core
Sandwich plate
Critical buckling load

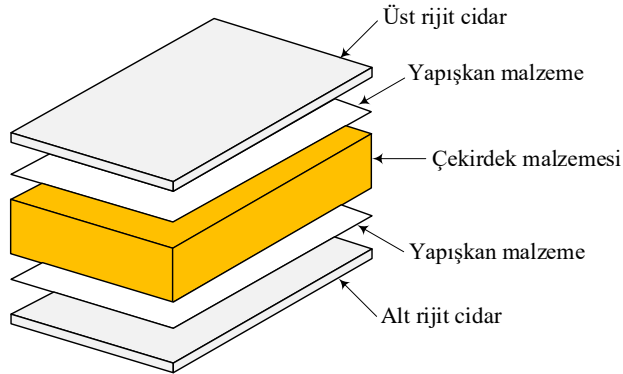
Article history:

Received: 10.10.2023
Accepted: 29.12.2023

Abstract: Sandwich plates consist of a total of three layers, with a thick core layer between two thin face layers. The face layers provide resistance to bending, while the core layer provides resistance to shear. General purpose finite element softwares are one of the most suitable and widely used analysis methods to investigate the behavior of structures. Many design parameters can be easily examined by using these analysis programs. In this study, the buckling behavior of sandwich square plates simply supported on four sides, whose ratio of core layer thickness to face layer thickness is between 7 and 9, was investigated using a general purpose finite element software. The effect of thickness variation was investigated by varying the face and core layer thicknesses of sandwich plates with a constant total thickness. At the same time, the materials of the face and core layers were changed and the most suitable design for the buckling behavior was revealed. For this purpose, 110 analyzes were made with 2 different face materials, 5 different core materials, 11 different thickness ratios. According to the results obtained from the analysis, the maximum critical buckling load was calculated as 282.108 N/mm² in the sandwich plate with steel face and PVC H200 core. The most suitable design of sandwich plates against buckling was determined by presenting the results with graphics.

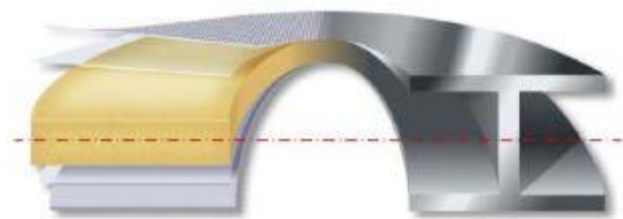
1. Giriş

Sandviç yapılar ortada kalın ve hafif çekirdek tabakası, alt ve üstte ince ve rijit cidar tabakası ve bu tabakaların birleştirilmesini ve birlikte hareket etmesini sağlayan yapışkan malzemeden oluşur [1]. Sandviç plaklar inşaat, uzay, otomobil, havacılık, deniz vb. alanlarda çeşitli yapıların inşasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca filtre, spor araba, rüzgâr türbini kanatları, uçak, tekne, savunma araçları vb. yapımı için de tercih edilirler. Dayanıklılık, darbe direnci, hasar ve yorulma direnci sandviç plakların üstünlüklerindedir [2].



Şekil 1. Sandviç plak ve tabakaları

Çekirdek malzemesi olarak bal peteği, balsa ağacı, EPS (expanded polystyrene), köpük gibi hafif malzemeler, dış cidar malzemesi olarak da karbon kumaşlar, cam elyafı, GRP (glass reinforced polyester), FRP (fiber reinforced polymer), FRC (fiber reinforced composite) gibi kompozit malzemeler veya çelik levha, alüminyum levha gibi izotrop malzemeler kullanılmaktadır. Örnek bir sandviç plak kesiti Şekil 1'de gösterilmiştir. Sandviç plaklar Şekil 2 de gösterildiği gibi işlevsel olarak I-Kiriş profillerine benzemektedir. I Kiriş profillerde başlıklar eğilme gerilmelerini taşıırken, başlıklar arasındaki gövde kısmı da kesme kuvvetlerini taşımaktadır [3], [4].



Şekil 2. Sandviç plak ve I-Kiriş profili arasındaki benzeşim [4]

Literatürde sandviç plakların davranışlarını gözlemlemek ve istenilen mekanik özelliklere ulaşmak için birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda sandviç yapıların statik ve dinamik hareketlerinin teorik olarak

araştırılması yapılmış ve analitik olarak modellemesi çıkartılmıştır.

Sandviç plaklar hakkında yazılan derleme türü yazılar konu hakkında detaylı bilgiler vermektedir. Garg vd., fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeden yapılmış sandviç plaklar hakkında bir derleme yazısı yayınlamışlardır. Derleme yazısında sandviç yapılarının çeşitli yükleme koşulları altında analizine ilişkin detaylı literatür taraması sonrasında önemli noktaları da sunmuşlardır [5]. Xiong vd., prizmatik ve köpük çekirdekli sandviç yapılar hakkında yazdıkları derleme makalesi oluklu, balpeteği ve köpük çekirdekli sandviç yapıların özellikleri ve geliştirilmesi hakkındadır. Çalışmada değişken kesitli kanat tasarımı, darbe dayanımı ve çok hafif ağırlık uygulamaları hakkında gelecekte oluşması mümkün olan gelişmeler de tartışılmaktadır.

Araştırmacılar plakların burkulması ile ilgili çalışmalarında farklı özelliklerdeki plaklar da kullanmışlardır. Uslu vd., çalışmalarında tek eksenli yükleme altındaki kare ve dairesel delikli kare plakların burkulmasını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda aynı boşluk alanına sahip kare delikli plakaların burkulma yüklerinin dairesel delikli plakalara göre daha yüksek olduğunu göstermişlerdir. [6].

Balaraman ve Sreehari, sandviç plakaların burkulması üzerine kapsamlı bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında, birinci derece ve yüksek dereceli kayma deformasyon teorilerini kullanarak sandviç plakaların burkulma davranışının çeşitli yönlerini dikkate almışlar ve ayrıntılı bir çalışma yürütmüşlerdir. Başlangıçta sayısal formülasyon yapılmış ve Matlab ortamında programlama yapmışlardır. Sandviç yapıların burkulma davranışının net bir şekilde anlaşılmasını sağlamak için ayrıntılı parametrik çalışmalar da yapmışlardır [7]. Adhikari vd., yüksek mertebeden kayma deformasyon teorisine dayanan, çeşitli türlerdeki düzgün olmayan kenar sıkıştırması altında gözenekli fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeden imal edilmiş sandviç plakaların burkulma analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında gözenekli malzemenin boşluk dağılımını farklı şekillerde modelleyerek gerçekçi sonuca ulaşmaya çalışmışlardır [8]. Arshid vd., fonksiyonel derecelendirilmiş piezo elektro manyetik nano kompozit tabakalarla bütünleştirilmiş heterojen sıcaklığa bağlı mikro halka şeklinde/dairesel gözenekli sandviç plakaların eğilme ve burulma davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmalarında bu tür sandviç plakların burkulma davranışlarını da ortaya koymuşlardır [9]. Altunsaray, yayınladığı bildiri çalışmasında sandviç uzun dikdörtgen plakların burkulmasını parametrik olarak incelemiştir. Çalışmasında farklı özellikteki cidar

ve çekirdek malzemesinin sandviç plakların burkulmaları üzerine etkilerini ortaya koymuştur. Çalışma sonucunda bilgisayar destekli parametrik analizlerle sandviç yapıların ön tasarımında zaman, ağırlık, maliyet, işgücünden tasarruf edilebileceği ortaya konulmuştur [10].

Bu çalışmada ise, ANSYS sonlu elemanlar paket programı kullanılarak, dört tarafından basit mesnetli, farklı çekirdek malzemeleri ve farklı tabaka kalınlıklarına sahip, tek eksenli düzgün yayılı düzlem yük ile yüklü köpük çekirdekli sandviç plakaların burkulma analizleri yapılmıştır. Sandviç plakaların burkulmasında malzeme ve tabaka kalınlığının etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla basit mesnetli kare sandviç plak düşünülmüş ve plaklara tek eksenli düzgün yayılı eksenel yükler uygulanmıştır. 11 farklı cidar ve çekirdek tabaka kalınlığına sahip sandviç plaklar, tabaka kalınlığının etkisini araştırmak için modellenmiştir. Bu burkulma analizleri sonucunda köpük çekirdek malzemesinin aynı koşullardaki köpük çekirdekli sandviç plaklar üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Hesaplanan sonuçlar tablo ve grafiklerle tartışılarak ortaya konulmuş ve sandviç plakların burkulmaya karşı en uygun tasarımı belirlenmiştir.

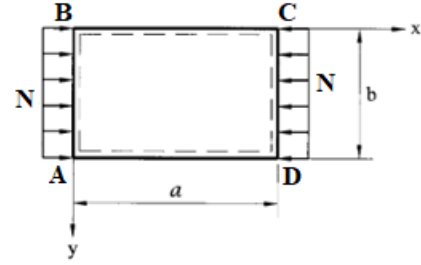
2. Materyal ve Metod

Sandviç yapılar ince ve yüksek yoğunluklu iki rijit tabaka arasında bulunan kalın ve düşük yoğunluklu bir çekirdek tabakasından oluşurlar. En az iki farklı malzemenin birleşmesi ile oluşur ve kompozit yeni bir malzemedir. Sandviç yapıların tercih edilmesinin sebebi; nihai malzemenin dayanıklılık, darbe direnci, hasar ve yorulma direncinin bileşen malzemelerinden yüksek olmasıdır. Sandviç plaklar, son derece hafif malzemeler olmalarına karşılık olarak yüksek sertlik ve güç-ağırlık oranları verdikleri için gerek havacılık gerekse ticari endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır [1].

2.1. Sandviç Plakta Burkulma Denklemleri ve Sınır Koşulları

İnce plaklar plak orta düzleminde etkili olan normal eksenel ve düzlem içi kesme yüklerine maruz kalabilir. Belirli koşullar altında bu tür yükler plakta burkulmaya neden olabilir. Plakların burkulması veya elastik kararsızlığı pratikte büyük öneme sahiptir. Burkulma yükü plak kalınlığına doğrudan bağlıdır. Plak ne kadar ince olursa kritik burkulma yükü de o kadar düşük olacaktır. Bu nedenle plakların burkulma analizi bir yapının genel analizinin ayrılmaz bir parçasıdır [11]

Dikdörtgen bir plağın burkulması ile ilgili yükleme ve plak geometrisi Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Tek eksenli burkulma yüklerine maruz sandviç plak geometrisi [11]

Plak, dört kenarından basit mesnetlenmiştir. AB ve CD kenarı N yükü (N/mm) ile yüklenmiştir.

$$\omega = 0 \quad (1)$$

$$M_n = 0 \quad (2)$$

M_n normal yöndeki eğilme momentini, ω ise z eksenli yöndeki düşey çökme değerini temsil etmektedir. Sınır koşulları normal ve teğet yönlerde ayrılmalıdır.

$$(N_n - \bar{N}_n)\delta u_n = 0 \quad (3)$$

$$(N_t - \bar{N}_t)\delta u_t = 0 \quad (4)$$

N_n normal yöndeki eksenel kuvveti, \bar{N}_n normal yöndeki plağa etki eden eksenel kuvveti, u_n normal yöndeki yer değiştirmeyi, N_t teğet yöndeki eksenel kuvveti, \bar{N}_t teğet yöndeki plağa etki eden eksenel kuvveti, u_t teğet yöndeki yer değiştirmeyi temsil etmektedir.

Şekil 3'teki plak için;

$$(N_{xx} - \bar{N}_{xx})\delta u_x = 0 \quad (5)$$

$$(N_{xy} - \bar{N}_{xy})\delta u_y = 0 \quad (6)$$

$$(N_{yy} - \bar{N}_{yy})\delta u_y = 0 \quad (7)$$

$$(N_{xy} - \bar{N}_{xy})\delta u_x = 0 \quad (8)$$

Şekil 3'teki plak için gerilme sınır koşulları uygulanır ve yüklemenin tensörü elde edilir;

$$\bar{N}_{\alpha\beta} = \begin{vmatrix} \bar{N} & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}, \quad N_{\alpha\beta} = \begin{vmatrix} N & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (9)$$

Bünye denklemlerinden eşitlik (10) ve (11) elde edilir;

$$N_{xx} = C(\epsilon_{xx}^\circ + \nu\epsilon_{yy}^\circ) \quad (10)$$

$$0 = C(\epsilon_{yy}^\circ + \nu\epsilon_{xx}^\circ) \quad (11)$$

Bu nedenle $\epsilon_{yy}^\circ = -\nu\epsilon_{xx}^\circ$ ve $N_{xx} = E h \epsilon_{xx}^\circ$ olur. Yer değiştirme eşitlik (12) ve (13)'teki iki denklem ile çözülür;

$$\epsilon_{xx}^{\circ} = \frac{\delta u_x}{\delta x} \quad (12)$$

$$\epsilon_{yy}^{\circ} = \frac{\delta u_y}{\delta y} \quad (13)$$

Koordinat sisteminin Şekil 3'teki plağın A köşesinde olduğu varsayılmaktadır. Çözüm eşitlik (14)'teki gibidir;

$$u_x = u_0 \left(1 - \frac{x}{a}\right), \quad u_y = v u_0 \frac{y}{a}, \quad N = \frac{Eh}{a} u_0 \quad (14)$$

N kuvveti basınçta pozitif olarak uygulanır. Bu sebeple Poisson oranı etkisi ile plak x yönünde sıkışır ve y yönünde yanal olarak genişler.

2.2. Basit Mesnetli Bir Plağın Burkulması

Şekil 3'teki dört kenarından basit mesnetli $x=0$ ve $x=a$ kenarları düzgün yayılı N düzlem yükü ile yüklü plağın doğrusal burkulma analizinin yönetici diferansiyel denklemi eşitlik (15)'teki gibidir;

$$D \left[\frac{\delta^4 \omega}{\delta x^4} + 2 \frac{\delta^4 \omega}{\delta x^2 \delta y^2} + \frac{\delta^4 \omega}{\delta y^4} \right] + N \frac{\delta^2 \omega}{\delta x^2} = 0 \quad (15)$$

Yukarıdaki sabit katsayılı lineer kısmi diferansiyel denklemin çözümü iki harmonik bir denklem haline getirilir;

$$\omega(x, y) = \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (16)$$

m boyuna yönde yarım dalga, n enine yönde yarım dalgayı temsil etmektedir. $\omega(x, y)$ fonksiyonu, yer değiştirme için sınır koşulunu sağlar. Eğilme momenti M_n ;

$$M_n = M_{xx} = D[K_{xx} + vK_{yy}] \\ = -D \left[\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \right. \\ \left. + v \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \right] \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (17)$$

$x=0$ ve $x=a$ kenarında eğilme momenti $M_n=M_{xx}=0$ olur. Ayrıca $y=0$ ve $y=b$ kenarında $M_n=M_{yy}=0$ 'dır. Böylelikle dört kenarda da basit mesnet sınır şartları sağlanmış olur. $\omega(x, y)$ denkleminde yerine yazılır ise;

$$\left\{ D \left[\left(\frac{m\pi}{a} \right)^4 + 2 \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^4 \right] \right. \\ \left. - \bar{N} \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \right\} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} = 0 \quad (18)$$

Denklem düzenlenirse;

$$\bar{N} = D \left(\frac{\pi a}{m} \right)^2 \left[\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right] \quad (19)$$

a,b ve m'nin tüm değerleri için en küçük \bar{N} değerinin $n=1$ iken elde edildiği görülmektedir. Buradan yola çıkarak, uygulanan yüke dik yönde bir yarım dalga oluşacağı anlaşılır.

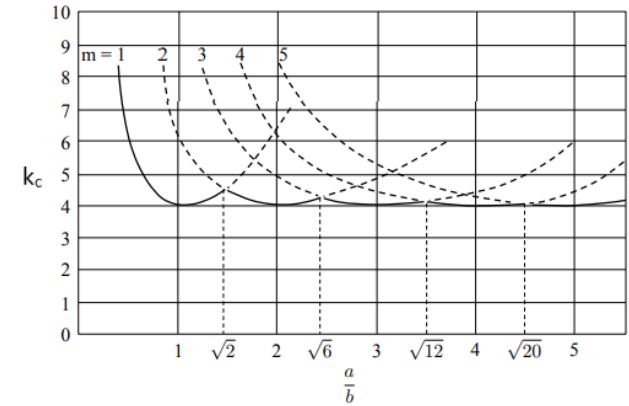
(17) denklemi kısaltılacak olursa;

$$\bar{N}_c = k_c \frac{\pi^2 D}{b^2} \quad (20)$$

k_c burkulma katsayısını temsil etmektedir;

$$k_c = \left(\frac{mb}{a} + \frac{a}{mb} \right)^2 \quad (21)$$

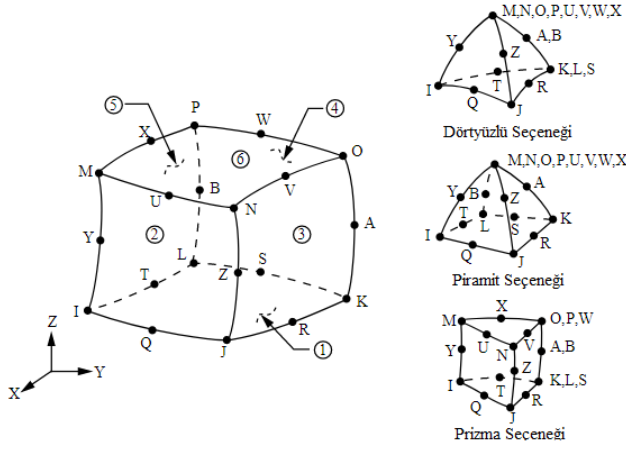
m parametresi bir tamsayıdır ve plağın uzunluğuna kaç tane yarım dalga oluşacağını belirler. En/boy oranı yani a/b oranı biliniyor fakat m parametresi bilinmiyor ise m parametresi, burkulma katsayısının a/b'nin bir fonksiyonu olarak çizilmesi ile bulunabilir. İlgili grafik aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



Şekil 4. Basit mesnetli bir plak için, a/b ve m değerleri için k_c burkulma katsayısı grafiği [12]

Bu çalışmada ele alınan örneklerin hesap sonuçları ANSYS sonlu elemanlar paket programı kullanılarak elde edilmiştir. Sonlu eleman olarak Şekil 5'te gösterilen, ANSYS eleman kütüphanesinde bulunan üç boyutlu SOLID186 katı elemanı kullanılmıştır.

SOLID186 elemanı, ikinci dereceden yer değiştirme davranışı gösteren yüksek mertebeden üç boyutlu 20 düğümlü katı elemandır. Bu elemanın 20 düğüm noktasının her birisinde x, y ve z yönlerindeki ötelemeler olmak üzere üç serbestlik derecesi mevcuttur. Plastisite, hiperelastisite, gerilme sertleşmesi, büyük yer değiştirme ve büyük şekil değiştirme gibi özellikleri desteklemektedir [13].

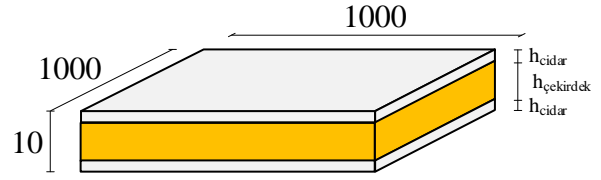


Şekil 5. ANSYS kütüphanesinde SOLID 186 elemanı [13]

3. Sayısal Örnekler

Bu çalışmada, cidar katmanında iki farklı rijit malzeme, çekirdek katmanında ise beş farklı köpük malzeme kullanılarak oluşturulan 1000 mm x 1000 mm düzlem genişliğinde, aynı toplam kalınlıkta, farklı katman

kalınlıklarına sahip kare sandviç plak modellerinin burkulma analizleri yapılmıştır. Sandviç plaklar x ekseninde tek eksenli AB ve CD kenarlarından düzgün yayılı düzlem yüklerine maruz bırakılmıştır.



Şekil 6. İncelenen sandviç plakların geometrisi

Plakalar dört kenarından basit mesnetle mesnetlenmiştir. Analizde Katman Kalınlığı Etkisi (K), Cidar Malzemesi Etkisi (F) ve Çekirdek Malzemesi Etkisi (C) olmak üzere üç farklı parametrenin kombinasyonları tartışılacaktır. Katman kalınlığı etkisi (K) sandviç plağın köpük çekirdek kalınlığının tek bir cidar tabakası kalınlığına oranı olarak hesaplanmaktadır. Kullanılan farklı köpük ve çekirdek malzemelerinin mekanik özellikleri Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Sandviç plak malzemelerinin mekanik özellikleri

Tip	Malzeme	E (MPa)	G (MPa)	K (MPa)	ν
Cidar 1	Çelik	206000.000	79300.000	171666.667	0.300
Cidar 2	Alüminyum	69000.000	25940.000	68986.203	0.333
Çekirdek 1	PVC H200	230.000	86.466	225.494	0.330
Çekirdek 2	PVC H60	45.000	20.737	18.072	0.085
Çekirdek 3	Linear PVC foam (Airex R63.80)	56.000	21.000	56.000	0.333
Çekirdek 4	AIREX® R82.110 High Performance Structural Foam	83.000	30.000	118.571	0.383
Çekirdek 5	CoreLite PVC 100 Closed-Cell PVC Foam Sheet	89.980	37.000	52.795	0.216

Tablo 1'deki E elastisite modülünü, G kayma modülünü, K hacim modülünü ve ν ise Poisson oranını göstermektedir.

Tablo 2. Sandviç plakların geometrik özellikleri (mm)

model no	k	a	h	h_{cidar}	$h_{\text{çekirdek}}$
1	9.0	1000	10	0.91	8.18
2	8.8	1000	10	0.93	8.14
3	8.6	1000	10	0.94	8.12
4	8.4	1000	10	0.96	8.08
5	8.2	1000	10	0.98	8.04
6	8.0	1000	10	1.00	8.00
7	7.8	1000	10	1.02	7.96
8	7.6	1000	10	1.04	7.92
9	7.4	1000	10	1.06	7.88
10	7.2	1000	10	1.08	7.84
11	7.0	1000	10	1.11	7.78

Kirchoff ince plak varsayımlarını sağlamak amacıyla sandviç plağın narinlik oranı $a/h = 100$ olarak sabit alınmıştır. Buna göre 1x1 metre örneklerde kare levhanın toplam kalınlığı 10 mm olarak alınmıştır. Numunelerde üst ve alt cidar kalınlıkları eşit olarak alınmıştır. $k = h_{\text{çekirdek}} / h_{\text{cidar}}$ denklemi ile çekirdek kalınlıkları artırılıp yüzey kalınlıkları azaltılarak aynı toplam kalınlıkta sandviç plakalar elde edilmiştir. Şekil 4'te k sabiti 7 ile 9 arasında olan farklı 11 sandviç plaka modeli ele alınmıştır. İncelenen plakaların geometrik özellikleri aşağıdaki Tablo 2'de gösterilmektedir.

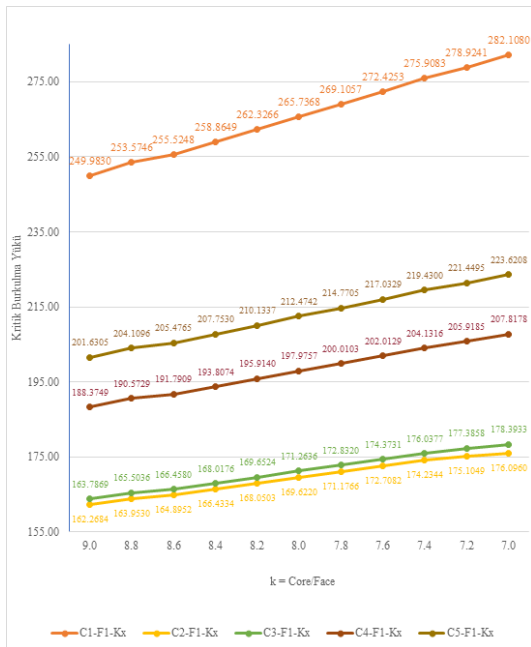
4. Bulgular ve Tartışma

Farklı cidar ve köpük malzemelerine sahip tek eksenli burkulma yüküne maruz dört kenarından basit

mesnetli sandviç kare plakların kritik burkulma yükleri ANSYS paket programı kullanılarak hesaplanmıştır.

Çalışmada oluşturulan sandviç plakların seri isimleri için Cx-Fx-Kx şeklinde kodlama kullanılmıştır. Bu kodlamada F1 Tablo 1’de verilen çelik malzemesini, F2 ise alüminyum malzemesini ifade etmektedir. Yine aynı tabloda numaralandırılan 5 farklı çekirdek malzemesi Cx ile tanımlanmıştır. Kx ise Tablo 2’de model no ile belirtilen sandviç plağın 11 adet tabaka kalınlık oranları ile ilgili geometrik özelliği ifade etmektedir.

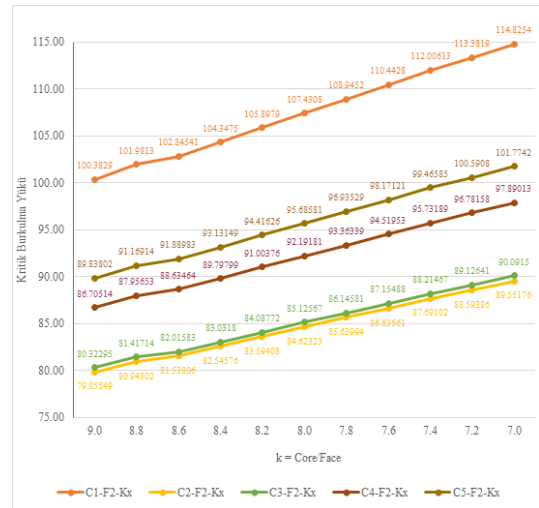
Çelik cidar tabakalı sandviç plakların kritik burkulma yükleri ile K katman kalınlığı etkisi arasındaki ilişki Şekil 7’de gösterilmektedir. Çekirdek malzemelerinin kayma modülü arttıkça rijitlikleri artar ve şekil değiştirmeye karşı dirençleri artar. Bu sebeple araştırma örnekleri arasında en rijit çekirdek PVC (H200) malzemesidir ve bu çekirdeğe sahip olan C1-F1-Kx serisi sandviç plağın kritik burkulma yükleri en yüksektir. C1-F1-Kx serisinde de en fazla kritik burkulma yükü cidarın en kalın olduğu araştırma örneği olan C1-F1-K11 araştırma örneğinde olduğu görülmektedir.



Şekil 7. C (1,2,3,4,5)-F1-Kx serilerinin kritik burkulma yüklerinin karşılaştırılması (N/mm)

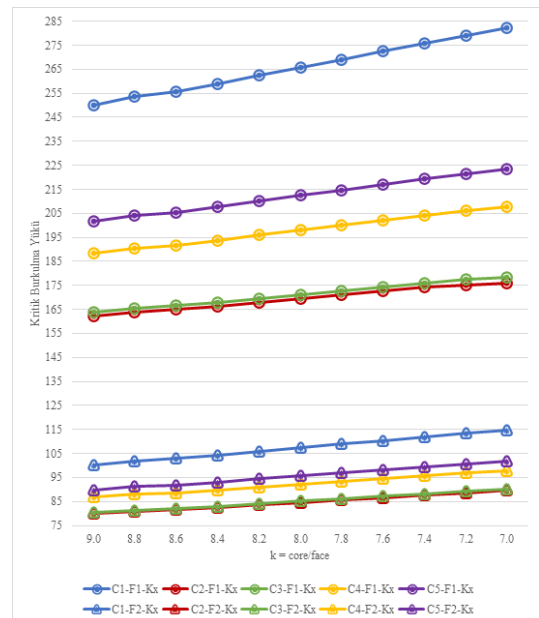
Alüminyum cidar tabakalı sandviç plakların kritik burkulma yükleri ile K katman kalınlığı etkisi arasındaki ilişki Şekil 8’de gösterilmektedir. Çekirdek malzemelerinin kayma modülü arttıkça rijitlikleri artar ve şekil değiştirmeye karşı dirençleri artar. Bu sebeple araştırma örnekleri arasında en rijit çekirdek PVC (H200) malzemesidir ve bu çekirdeğe sahip olan C1-F1-Kx serisi sandviç plağın kritik burkulma yükleri en yüksektir. C1-F2-Kx serisinde de en fazla kritik

burkulma yükü cidarın en kalın olduğu araştırma örneği olan C1-F2-K11 araştırma örneğinde olduğu görülmektedir.



Şekil 8. C (1,2,3,4,5)-F2-Kx serilerinin kritik burkulma yüklerinin karşılaştırılması (N/mm)

Şekil 9’da görüldüğü üzere çekirdek kalınlığının cidar kalınlığına oranı olan k değeri azaldıkça sandviç plağın burkulması için gereken kritik burkulma yükü değeri artmaktadır. Çünkü k oranının azalması; cidarın kalınlığı artarken çekirdeğin kalınlığının azaldığını ifade etmektedir. Cidar malzemesinin çekirdek malzemesine göre daha rijit bir yapıda olması, kritik burkulma yükünün hesaplanmasında çekirdek malzemesine göre cidar malzemesinin daha belirleyici olduğunu göstermektedir.



Şekil 9. C (1,2,3,4,5)-F (1,2)-Kx serilerinin kritik burkulma yükleri (N/mm)

5. Sonuçlar

Araştırma örneklerinde en yüksek burkulma yüküne C1-F1-Kx serisinin sahip olduğu grafikte gözlemlenmektedir. C1-F1-Kx serisinde kullanılan cidar malzemesinin elastisite modülü 206000 ve poisson oranı 0.3, çekirdek malzemesinin elastisite modülü 230 ve poisson oranı 0.33'tür. Araştırma örneklerinde cidar malzemesi olarak kullanılan çelik ve alüminyumdan rijit olan F1 numaralandırma koduyla çeliktir, çekirdek malzemelerinden de en rijiti C1 numaralandırma koduyla PVC (H200)'dür. Sonuç olarak bu iki malzeme ile oluşturulan sandviç plakta en rijit, en dayanıklı ve şekil değiştirmeye karşı dirençli olan C1-F1-Kx serisinin sandviç plaklarıdır. Analizler sonucunda da bu yaklaşım doğrulanmaktadır.

C1-F1-Kx serisinin en dayanıklı ve şekil değiştirmeye en dirençli olan araştırma örneği de C1-F1-K11'dir. Çünkü C1-F1-K11 numaralı sandviç plak, C1-F1-Kx serisi içerisinde cidar kalınlığı en yüksek olan araştırma örneğidir. Çekirdek malzemesinin kalınlığının cidar malzemesinin kalınlığına oranı azaldıkça, kritik burkulma yükü artmaktadır.

C2-F2-Kx serisi diğer araştırma serilerine göre daha az bir kuvvetle burkulduğu görülmektedir. C2-F2-Kx serisi; elastisite modülü 69000 MPa ve poisson oranı 0.333 olan alüminyum ve elastisite modülü 45 MPa ve poisson oranı 0.085 olan PVC (H60)'tır. Diğer araştırma örnekleri olan sandviç plaklarda kullanılan cidar ve çekirdek malzemelerinin rijitliğine göre C2-F2-Kx serisinde kullanılan alüminyum ve PVC (H60)'ın rijitliği düşüktür. Bunun yanında C2-F2-Kx serisinin en düşük kritik burkulma yüküne sahip olan araştırma örneği C2-F2-K1 model numaralı sandviç plağıdır. Çünkü çekirdek kalınlığının cidar kalınlığına oranı en fazla olan sandviç plak modelidir. Bu sebeple de tüm araştırma örnekleri arasında C2-F2-K1 model numaralı sandviç plak, en düşük kritik burkulma yükü ile burkulmaktadır. ANSYS Workbench sonlu elamanlar paket programı ile elde edilen analiz sonuçları da bu yaklaşımı doğrulamaktadır.

Kaynaklar

- [1] D. Çıraklı, "Investigation of Bending and Buckling Behaviors of Foam Core Sandwich Plates," Master Thesis, Kütahya Dumlupınar University, Kütahya, 2023.
- [2] D. Çıraklı, M. H. Saraçoğlu, and U. Albayrak, "Köpük Dolgulu Sandviç Plakların Statik Analizi," in 2022 Büyük Zafer'in 100. Yılı Anısına Ulusal Lisansüstü Öğrenci Sempozyumu, Kütahya, 2022, pp. 53–53.
- [3] Ç. Uzey, "Developing And Testing Of Polymer Foam Core Sandwich Structures With Hybrid Carbon

Fiber/Wire Mesh Sheet Facings," Çukurova University, Adana, 2020.

- [4] DIABGroup, "Guideline to Core and Sandwich," <https://www.diabgroup.com/media/q5ylbde4/dia-b-guideline-to-core-and-sandwich.pdf>.
- [5] A. Garg, M. O. Belarbi, H. D. Chalak, and A. Chakrabarti, "A review of the analysis of sandwich FGM structures," *Composite Structures*, vol. 258. Elsevier Ltd, Feb. 15, 2021. doi: 10.1016/j.compstruct.2020.113427.
- [6] F. Uslu, M. H. Saraçoğlu, and U. Albayrak, "Buckling of Square and Circular Perforated Square Plates under Uniaxial Loading," *Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 61–75, 2022.
- [7] P. Balaraman and V. M. Sreehari, "A comprehensive study on the buckling of sandwich plates," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Dec. 2018. doi: 10.1088/1757-899X/455/1/012128.
- [8] B. Adhikari, P. Dash, and B. N. Singh, "Buckling analysis of porous FGM sandwich plates under various types nonuniform edge compression based on higher order shear deformation theory," *Compos Struct*, vol. 251, 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112597.
- [9] E. Arshid, S. Amir, and A. Loghman, "Bending and buckling behaviors of heterogeneous temperature-dependent micro annular/circular porous sandwich plates integrated by FGPEM nano-Composite layers," *Journal of Sandwich Structures and Materials*, vol. 23, no. 8, pp. 3836–3877, Nov. 2021, doi: 10.1177/1099636220955027.
- [10] E. Altunsaray, "Sandviç Uzun Dikdörtgen Plakların Burkulmasının Parametrik Olarak İncelenmesi," in 12. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi, 2023.
- [11] E. Ventsel and Krauthammer T., *Thin Plates and Shells_ Theory, Analysis, and Applications*. 2001.
- [12] T. Wierzbicki, "2.080 Structural Mechanics Lecture 11: Buckling of Plates and Sections."
- [13] A. Swanson Analysis System Inc., "ANSYS User's manual." 2005.



Araştırma Makalesi/Research Article

Cüce kuyruksüren optimizasyon algoritması: Çok seviyeli inverter çıkış geriliminin toplam harmonik distorsiyon değerinin azaltılması

Yasin BEKTAŞ *1

¹Aksaray Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Elektrik-Enerji Bölümü, 68000, Aksaray, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Cüce Kuyruksüren
Optimizasyon Algoritması
Toplam harmonik distorsiyon
Çok seviyeli inverter
Hızlı Fourier transform analizi

Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 19.07.2023
Kabul Tarihi: 29.11.2023

Öz: Toplam Harmonik Distorsiyon (THD) değeri, elektrik sistemlerinde kullanılan çeşitli cihazların ve sistemlerin performansını değerlendirmek için kullanılan önemli bir ölçüttür. THD değerinin olabildiğince düşük değerde olması beklenir. Bu çalışmada, kaskad h-köprü çok seviyeli inverter (KHK-ÇSİ) çıkış geriliminin THD değerini en iyi seviyeye getirmek için yeni geliştirilen Cüce Kuyruksüren Optimizasyon (DMO) algoritması uyarlanmıştır. Uyarlanan DMO algoritmasının performansı, üç fazlı dokuz seviyeli kaskad h-köprü çok seviyeli (KHK-ÇSİ) üzerinde Genetik Algoritma (GA) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritmaları ile birlikte test edilmiştir. Bu algoritmaların yakınsama, tutarlılık ve hız testleri yapılmıştır. Sonuçlar, MATLAB simülasyonlarıyla ayrıntılı bir şekilde doğrulandıktan sonra analiz edilmiş ve DMO algoritmasının 0.1 ile 1.0 modülasyon indeksi aralığında belirtilen algoritmalarından daha üstün performans gösterdiği sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak, KHK-ÇSİ çıkış geriliminin THD değerini optimize etmek için DMO algoritmasının etkili bir şekilde kullanılabileceğini gösterilmiştir.

Atıf için/To Cite:

Bektaş Y. Cüce kuyruksüren optimizasyon algoritması: Çok seviyeli inverter çıkış geriliminin toplam harmonik distorsiyon değerinin azaltılması. Ulusallararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 15(3), 118-128, 2023.

Dwarf mongoose optimization algorithm: Minimization of total harmonic distortion in multi-level inverter output voltage

Keywords

Dwarf Mongoose
Optimization Algorithm
Total Harmonic Distortion
Multi-level Inverter
Fast Fourier Transform
Analysis

Article history:

Received: 19.07.2023
Accepted: 29.11.2023

Abstract: The Total Harmonic Distortion (THD) value is an important metric used to evaluate the performance of various devices and systems in electrical systems. A low THD value is expected for optimal performance. In this study, the THD value of the output voltage of a cascaded H-bridge multi-level inverter (CHB-MLI) was optimized by using a newly developed Dwarf Mongoose Optimization (DMO) algorithm. The performance of the adapted DMO algorithm has been tested alongside the Genetic Algorithm (GA) and Particle Swarm Optimization (PSO) algorithms on a three-phase, nine-level cascaded H-bridge multi-level inverter (CHB-MLI). Convergence, consistency, and speed tests have been conducted for these algorithms. After detailed validation through MATLAB simulations, the results were analyzed, and it was concluded that the DMO algorithm outperformed the mentioned algorithms in the modulation index range of 0.1 to 1.0. In conclusion, it has been demonstrated that the DMO algorithm can effectively optimize the THD value of the output voltage of CHB-MLI.

1. Giriş

Çok seviyeli inverterler (ÇSİ) [1], elektrik güç sistemlerinin önemli bir parçasıdır ve doğru akımı (DC) alternatif akıma (AC) dönüştürmede kullanılır. Özellikle solar inverter güç dönüşümü ve şebeke senkronizasyonu için yaygın olarak kullanılırlar [2]. ÇSİ

aynı zamanda HVDC (Yüksek Gerilim Doğru Akım) iletimi, FACTS (Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri) cihazları gibi güç kalitesi düzelten cihazlar ve sistemlerde yaygın olarak kullanılır [3-5]. Son zamanlarda, ÇSİ'ler asenkron ve senkron motor sürücülerini için elektrikli araçlara da entegre edilmektedir [6]. Toplam harmonik distorsiyon (THD),

* İlgili yazar/Corresponding author: yasinbektas@aksaray.edu.tr

gerilim veya akım dalga formunun temel frekans bileşeni dışındaki harmonik içeriğini değerlendiren bir ölçüttür. THD değerinin düşük olması, bir dizi olumlu etkiyi beraberinde getirir. Bu etkiler arasında enerji kayıplarının azaltılması, verimliliğin artırılması, yüklerin ve elektrik ekipmanının ömrünün uzatılması, daha az ısınma ve gürültü seviyesinin azaltılması, elektronik cihazların arıza ve dengesiz çalışma gibi sorunların azaltılması ve elektromanyetik girişim değerinin azaltılması gibi faktörler bulunur [7].

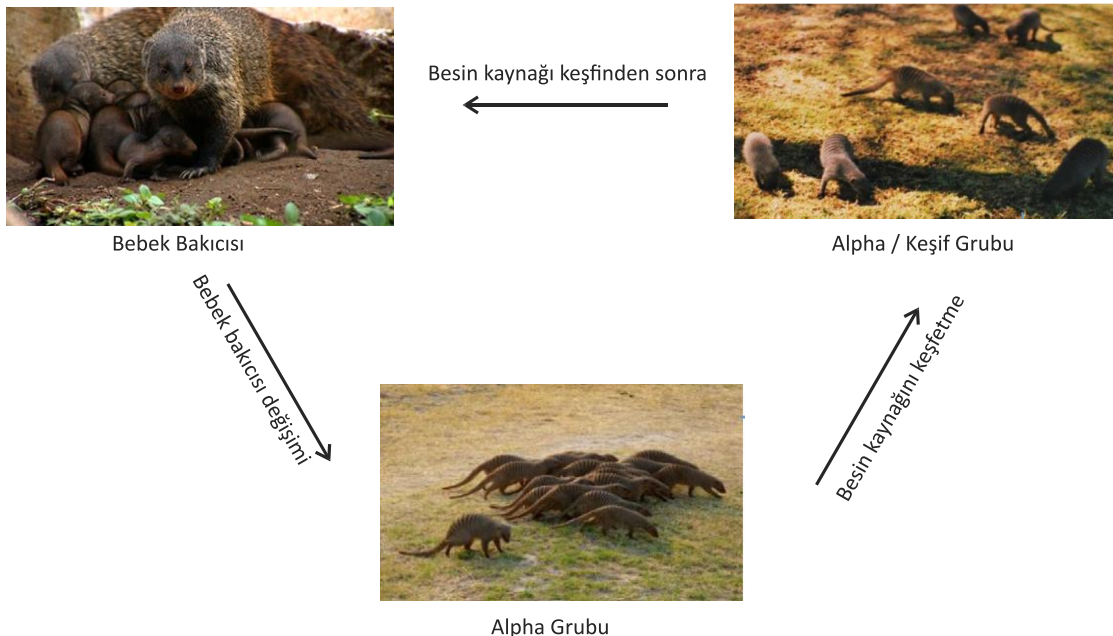
THD değerinin minimize etmek için çeşitli teknikler uygulanmaktadır ve bunların bazıları uygulama özgü ve diğerleri ise yalnızca güç sistem ağları için geçerlidir. Sayısal yöntemler matematiksel formülasyonlar ve Newton-Raphson yöntemi gibi tahmin tabanlı algoritmalar içerir. Seçici harmonik eliminasyonu (SHE) [8], özellikle düşük dereceli baskın harmonikleri ortadan kaldırmak için yaygın bir tekniktir. Darbe genişlik modülasyonu (PWM) ve sinüzoidal PWM, Uzat vektör modülasyonu (SVM) ve çeşitli varyantları, THD değerini büyük ölçüde ortadan kaldırma yeteneğine sahiptir, ancak hızlı anahtarlama ve karmaşık bir yapıya ihtiyaç duyarlar [9]. Bulanık mantık ve yapay sinir ağları kullanılmaktadır, ancak bu yöntemler modülasyon indeksine (M) göre sınırlıdır, bu nedenle M değerinin tüm aralığı için optimal bir çözüm sunamazlar [10]. M değerinin sınırlanmasının yanı sıra, bu yöntemler daha iyi optimizasyon için genetik algoritma (GA) [11], parçacık sürü optimizasyonu (PSO) [12,13] gibi temel optimizasyon algoritmaları kullanılır. Ancak algoritmaların probleme uygun çözümü daha çabuk bulması ve kullanılan algoritma yapısının daha az parametre içermesi ve daha az karmaşık yapıya sahip olması istenir.

Bu çalışmada, üç fazlı dokuz seviyeli bir ÇSİ'nin THD değerini en iyi değere getirmek için yeni bir meta-sezgisel olan DMO algoritma tabanlı anahtarlamalı teknik önerilmektedir. Makale aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir: Bölüm 2, DMO algoritmasının açıklamasını içermektedir. Bölüm 3, simülasyon sonuçlarını sunmaktadır ve sonuçlar Bölüm 4'te sunulmuştur.

2. Cüce Mangolar Optimizasyon Algoritması

Cüce Kuyruksüren Optimizasyon Algoritması (DMO), doğal yaşamdan ilham alarak geliştirilen bir meta-sezgisel optimizasyon algoritmasıdır. Bu algoritma, Afrika'da yaşayan küçük etçil memelilerden biri olan cüce kuyruksüren mangonun beslenme davranışını taklit ederek farklı alanlardaki optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılmaktadır [14].

Cüce mangolar topluluklar halinde yaşar ve grubun tamamına verimli bir şekilde besin sağlamak için işbirliğine dayalı beslenme stratejileri sergilerler. Cüce mangoların adaptif davranışlarından, örneğin av boyutu seçimi, alan kullanımı, grup büyüklüğü ve besin sağlama gibi özelliklerinden ilham alarak karmaşık optimizasyon problemlerine optimal çözümler bulur. DMO algoritması, nüfusa dayalı bir algoritmadır. Alfa grup ve bakıcılardan oluşan sosyal grupları kullanarak arama ve optimizasyon görevleri gerçekleştirilir. Alfa grup, beslenmeyi başlatma, beslenme yolu ve katedilen mesafe gibi önemli kararları alır. Bakıcılar, genç mangoların bakımını üstlenir ve grubun beslenmesi sırasında değiştirilir, bu da algoritmanın keşif ve kullanma aşamalarına katkıda bulunur.



Şekil 1. DMO algoritmasının prosedürleri.

DMO, çeşitli optimizasyon problemlerini çözmede olumlu sonuçlar göstermiş ve diğer güncel algoritmalara karşı karşılaştırılmış, yakın optimal çözümler bulma konusundaki etkinliği ve verimliliği kanıtlanmıştır [15-19].

DMO algoritmasının optimizasyon prosedürleri, Şekil 1'de gösterildiği gibi üç aşamada temsil edilir. DMOA modeli, sözde kod ve algoritma yapısı aşağıda sunulmuştur.

2.1. Başlangıç popülasyonu

DMO algoritması, cüce mangoların aday çözümleri için rast gele oluşturulan popülasyon ile başlar. Bu başlangıç popülasyonu, (1) ifadesinde belirtildiği gibi oluşturulur.

$$S = \begin{bmatrix} S_{1,1} & \cdots & S_{1,Q} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N_p,1} & \cdots & S_{N_p,Q} \end{bmatrix} \quad (1)$$

N_p , toplam popülasyon büyüklüğüdür ve Q , cüce mangonun karar değişkenlerinin sayısıdır. Popülasyon, (2) ifadesi kullanılarak rastgele oluşturulur.

$$S_{u,v} = \text{unifrnd}(LB, UB, Q) \quad (2)$$

2.2. DMO Alogritma Modeli

DMO algoritmasının prosedürü üç gruba ayrılmıştır. Bu gruplar aşağıda sunulmuştur.

Alpha Grubu

İlk adımda, her çözümün popülasyon uygunluğu (uygunluk fonksiyonunun değeri) eşitlik (3) kullanılarak hesaplanır. Uygunluğa göre dişi alpha, eşitlik (3) ifadesinde belirtildiği şekilde seçilir.

$$\alpha = \frac{fit_j}{\sum_{j=1}^{N_p} fit_j} \quad (3)$$

Cüce mangolardaki α grubundaki cüce sayısı, bebek bakıcısı sayısı bs ve baskın dişinin seslenmesi p ile ilişkilidir, eşitlik (4) kullanılarak güncellenir.

$$S_{j+1} = S_j + \emptyset * \rho \quad (4)$$

\emptyset , rastgele seçilen bir sayıdır. Her tekrar için uyku yuvası, eşitlik (5) kullanılarak hesaplanır.

$$\varepsilon_j = \frac{fit_{j+1} - fit_j}{\max\{|fit_{j+1}, fit_j|\}} \quad (5)$$

ε_j değerinin ortalaması eşitlik (6) kullanılarak hesaplanır.

$$\sigma = \frac{\sum_{j=1}^{N_p} \varepsilon_j}{N_p} \quad (6)$$

Bebek bakıcısı kriterleri karşılandığında bir sonraki aşamaya geçilir. Yani keşif grubu oluşturulur.

Keşif Grubu

Keşif grubu, cüce mangoların önceki yatak yuvalarına geri dönmedikleri bilgisine dayanarak bir sonraki yatak yuvasını aramaya yönelir, bu da keşfi garanti altına alır. Mantık, ailenin yiyecek arayışını yeterince uzakta sürdürmesi durumunda yeni bir yatak yuvası keşfedeceğini öngörür. Bu durum, denklemler 7(a) ve 7(b) olarak matematiksel olarak ifade edilmiştir.

$$\text{if } \theta_{j+1} > \theta_j: S_{j+1} = S_j - DF * \text{rand} * [S_j - \vec{V}] \quad (7)$$

$$\text{else } S_{j+1} = S_j + DF * \text{rand} * [S_j - \vec{V}] \quad (8)$$

Burada, "rand" değeri [0, 1] arasında bir rastgele sayıdır. DF, cüce mangolar grubunun kolektif hareketini kontrol etmek için bir parametredir ve \vec{V} hareket vektörüdür; Bu parametreler eşitlik (9) ve (10) kullanılarak hesaplanır.

$$DF = \left(1 - \frac{m}{\max_G}\right)^{\left(2 * \frac{m}{\max_G}\right)} \quad (9)$$

$$\vec{V} = \sum_{j=1}^{N_p} \frac{S_j \times \varepsilon_j}{S_j} \quad (10)$$

Bebek Bakıcısı

Bebek bakıcısı, yavrularla birlikte kalan ikincil bir gruptur. Alfa dişisine yardımcı olmak için bebek bakıcıları düzenli olarak değiştirilirken, diğer ekip üyeleri günlük av gezileri düzenler. DMOA'nın sözdizimi Tablo 1'de sunulmuştur.

3. Sonuçlar ve Tartışmalar

3.1. THD minimizasyonu için uygunluk fonksiyonu

Uygunluk fonksiyonunun amacı daha düşük THD değerine sahip temel gerilim değerini elde etmek. Uygunluk fonksiyonu denklem (11)'de verilmiştir.

Tablo 1. DMO Algoritmasının sözde kodu.

DMO Algoritması
Başla:
DMOA parametrelerini ayarla: Np, bb
Np = Np - bb değerini ayarla.
K, bebek bakıcısı değişim parametre değerini ayarla
for m=1 : max_G
Kuyrusüren'lerin uygunluk değerini hesapla
D, zaman sayacı ayarla.
Eşitlik (3)'ü hesapla.
Aday yiyecek konumunu hesapla (Eşitlik 4)
Yeni uygunluk değerini değerlendir
Uyku yuvasını değerlendir (Eşitlik 5)
Uyku yuvalarının ortalamasını hesapla (Eşitlik 6)
Hareket vektörünü hesapla (Eşitlik 10)
D ≥ K ise bebek bakıcısını değiştir.
(1)'i kullanarak bb konumunu başlatın ve uygunluk değerlerini hesapla
Sonraki konumu simüle et (Eşitlik 7 ve 8)
En iyi çözümü güncelle
end
En iyi çözümü döndür
end

$$FF = \min_{\theta_i} \left\{ |V_{1p} - V_{ref}| + \sum_{j=5,7,11\dots}^{49} V_j \right\} \quad (11)$$

Burada θ_i anahtarlama açılarını temsil eder. Dokuz seviyeli KHK-ÇSİ için her bir köprü de tek anahtarlama yapılacağından $\theta_1, \theta_2, \theta_3,$ ve θ_4 olarak toplamda dört adet açı hesaba katılır. Bu açıların hesaba katılması ile oluşan gerilim değer V_{1p} ile V_{ref} istenilen referans temel gerilim değeridir.

$$M = \frac{V_{1p}}{\sum V_{DC}} \quad (12)$$

Burada, V_{1p} hesaplanan çıkış geriliminin tepe değeri iken V_{ref} istenilen temel geriliminin tepe değeridir. Temel gerilim modülasyon indeksi M ile kontrol edilir. Modülasyon indeksi eşitlik (12)'de verildiği gibi istenilen temel gerilimin tepe değerinin DC gerilim değerinin toplamına oranı olarak tanımlanır.

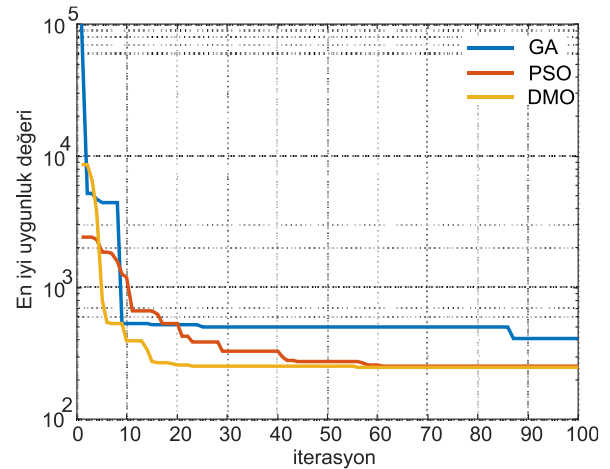
3.2. THD değerinin minimizasyonu için anahtarlama açılarının optimizasyonu

9 seviyeli KHK-ÇSİ için DMO algoritması kullanarak THD minimizasyonu yapılmıştır. Sonuçlar MATLAB Simulink kullanılarak FFT analiz aracıyla doğrulanmıştır. GA, PSO ve DMO algoritmalarında her biri 50 bireyden oluşan, bağımsız olarak 5 çalıştırma yapılmıştır. Her bir çalıştırma, 100 iterasyon içermektedir.

0 ile 1 modülasyon indeksi aralığı için her bir algortima 5'er defa çalıştırılmış en iyi sonuçlar GA için Tablo 2'de

PSO için Tablo 3'de ve DMO için ise Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 2' GA ile hesaplanan anahtarlama açıları ve bu açılar invertere uygulandığında elde edilen simülasyon sonuçlarını göstermektedir. Tablo 3 ve Tablo 4 de ise sırasıyla PSO ve DMO algortimaları ile hesaplanan anahtarlama açıları ve buna karşı elde edilen simülasyon sonuçları verilmiştir. Tablolar incelendiğinde verilen modülasyon indeksi aralığı için temel gerilimi en az hata ile kontrol eden ve en iyi THD değerine sahip olan algortimanın DMO algoritması olduğu görülür. PSO ise GA algoritmasından daha iyi performans göstermiştir.



Şekil 2. M=1.0 için GA, PSO ve DMO yakınsama eğrileri

Şekil 2. 1.0 modülasyon indeksi için algoritmaların yakınsama eğrilerini göstermektedir. Görüldüğü gibi en erken ve daha iyi uygunluk değeri ile çözüm bulan algoritma DMO algoritmasıdır.

DMO algoritması, GA ve PSO gibi diğer optimizasyon yöntemleriyle karşılaştırıldığında aşağıdaki avantajlara sahiptir.

- *Daha Yüksek Diverjans:* DMO, problem alanında daha yüksek bir çeşitliliğe sahiptir. Bu özellik, genellikle daha iyi global çözümler bulunmasına yardımcı olur.
- *Daha İyi Hız ve Yakınsama:* DMO, bazı durumlarda daha hızlı yakınsayabilir ve daha hızlı çözümler üretebilir. THD optimizasyonunda bu durum kanıtlanmıştır.
- *Parametre Duyarlılığı:* DMO, bazı durumlarda daha az hassaslık gösteren veya parametre ayarlarına daha az duyarlı olan bir algoritmadır.
- *Karmaşıklık:* DMO, GA ve PSO'dan daha az karmaşıktır ve daha az ayar gerektirir.

Ancak, her optimizasyon algoritması farklı problemler ve uygulama senaryoları için daha iyi veya daha kötü performans gösterebilir. Hangi algoritmanın kullanılacağı, belirli bir problemin özelliklerine ve gereksinimlerine bağlı olarak değerlendirilmelidir [20]. Her bir algoritmanın avantajları ve dezavantajları

farklıdır ve uygulama bağlamına bağlı olarak tercih edilen bir algoritma değişebilir [21].

Sonuç olarak THD optimizasyonu için DMO, GA ve PSO algoritmalarından daha üstündür.

3.3. Tutarlılık Testi

Standart sapma, bir veri kümesindeki değerlerin ortalamadan ne kadar uzaklaştığına dair bir ölçüdür. Yani, veri noktalarının ortalama değere göre ne kadar dağıldığını gösterir. Standart sapmanın düşük olması, elde edilen sonuçların daha tutarlı olduğu ve daha az değişkenlik gösterdiği anlamına gelir, bu da algoritmanın daha güvenilir olduğunu ve performansının daha öngörülebilir olduğunu gösterir. Her bir algoritma için, en iyi FF (uygunluk değeri), en kötü FF, ortalama FF ve Standart sapma (SD) karşılaştırılarak sonuçlarının tutarlılığı açısından test edilmiştir. İstatistiksel analiz sonuçları GA, PSO ve DMO için sırasıyla Tablo 5, 6 ve 7'de verilmiştir. Görüldüğü üzere standart sapma değerleri en düşük değer alan algoritma DMO algoritmasıdır. PSO ise GA'dan daha üstün performans göstermiştir.

Tablo 2. GA ile hesaplanan anahtarlama açıları

GA-THD										
	m	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	Vref(max)	Vref(rms)	V1p(rms)	hata(%)	THD (%)
Düşük	0.1	1.25324	1.56987	1.57080	1.57080	31.1	22	21.88	0.55%	81.98
	0.2	0.91551	1.55388	1.57080	1.57080	62.2	44	43.74	0.59%	31.56
	0.3	0.72382	1.38037	1.56991	1.57080	93.3	66	65.61	0.59%	17.17
Orta	0.4	0.68755	1.08395	1.55905	1.57080	124.4	88	87.46	0.61%	15.24
	0.5	0.70103	0.97232	1.33031	1.57080	155.5	110	109.3	0.64%	12.50
	0.6	0.44427	0.90939	1.20066	1.57080	186.6	132	131.2	0.61%	8.95
Yüksek	0.7	0.63771	0.85119	1.05783	1.32974	217.7	154	153	0.65%	8.29
	0.8	0.41486	0.81670	1.03502	1.16486	248.8	176	174.9	0.62%	7.78
	0.9	0.08328	0.27442	0.56629	1.54637	279.9	198	197.3	0.35%	5.25
	1.0	0.19495	0.40987	0.72392	1.05394	311.0	220	219.3	0.32%	5.32

Tablo 3. PSO ile hesaplanan anahtarlama açıları

PSO-THD										
	m	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	Vref(max)	Vref(rms)	V1p(rms)	hata(%)	THD (%)
Düşük	0.1	1.25227	1.57080	1.57080	1.57080	31.1	22	21.86	0.64%	81.80
	0.2	0.91357	1.55745	1.56867	1.57080	62.2	44	43.75	0.57%	31.51
	0.3	0.83233	1.29807	1.57080	1.57080	93.3	66	65.81	0.29%	18.74
Orta	0.4	0.71650	1.05657	1.56019	1.57080	124.4	88	87.71	0.33%	14.70
	0.5	0.72671	0.93416	1.33979	1.57080	155.5	110	109.7	0.27%	12.28
	0.6	0.62987	0.89079	1.20133	1.48478	186.6	132	131.5	0.38%	8.02
Yüksek	0.7	0.66086	0.77720	1.05472	1.36595	217.7	154	153.5	0.32%	8.19
	0.8	0.44211	0.84467	0.96275	1.18738	248.8	176	175.4	0.34%	7.16
	0.9	0.09049	0.56487	0.76939	1.29990	279.9	198	197.2	0.40%	5.89
	1.0	0.16927	0.42080	0.73278	1.04751	311.0	220	219.2	0.36%	5.09

Tablo 4. DMOA ile hesaplanan anahtarlama açıları

DMO-THD										
	m	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	Vref(max)	Vref(rms)	V1p(rms)	hata(%)	THD (%)
Düşük	0.1	1.251545	1.570796	1.570796	1.570796	31.1	22	22	0.00%	81.53
	0.2	0.900349	1.562805	1.570796	1.570796	62.2	44	43.96	0.09%	31.15
	0.3	0.746519	1.358777	1.570791	1.570796	93.3	66	65.98	0.03%	16.59
Orta	0.4	0.702014	1.063255	1.562513	1.5705	124.4	88	87.9	0.11%	14.56
	0.5	0.727711	0.956474	1.323003	1.565338	155.5	110	109.9	0.09%	12.08
	0.6	0.617192	0.914646	1.171068	1.493439	186.6	132	132.1	-0.08%	7.97
Yüksek	0.7	0.644452	0.844053	1.065616	1.31157	217.7	154	153.8	0.13%	7.89
	0.8	0.430911	0.8492	0.963534	1.186946	248.8	176	175.4	0.34%	7.09
	0.9	0.092548	0.268715	0.577773	1.540064	279.9	198	197.4	0.30%	5.14
	1.0	0.17221	0.417323	0.729419	1.047572	311.0	220	219.4	0.27%	5.08

Tablo 5. GA Algoritması tutarlılık test sonuçları

	M	En iyi FF	En kötü FF	Ortalama FF	SD
Düşük	0.1	639.1005	681.4048	646.0766	22.08179178
	0.2	402.1548	628.7134	449.9921	99.95809935
	0.3	343.3644	625.0000	428.5866	113.8551927
Orta	0.4	325.0000	760.9142	483.1489	174.5489118
	0.5	411.8874	594.4970	468.6769	75.26091957
	0.6	350.0000	476.1420	398.6683	52.50764789
Yüksek	0.7	322.1084	369.4670	340.9151	20.79198513
	0.8	350.0000	527.0231	405.6887	73.8926317
	0.9	350.5010	527.0231	415.7465	67.76408978
	1.0	412.0000	521.0000	443.4694	46.33881392

Tablo 6. PSO Algoritması tutarlılık test sonuçları

	M	En iyi FF	En kötü FF	Ortalama FF	SD
Düşük	0.1	639.9397	640.0677	639.9709	0.054494908
	0.2	372.2047	394.2057	378.9300	8.915979937
	0.3	242.5685	309.2399	259.8002	27.90816435
Orta	0.4	330.8299	405.0950	349.1023	31.66964576
	0.5	350.5683	418.7842	367.8205	28.78559707
	0.6	223.0783	229.9863	226.9226	2.723931944
Yüksek	0.7	321.5113	441.7283	390.5902	62.22153717
	0.8	317.7837	326.2569	320.8432	3.273073759
	0.9	208.0000	291.3917	245.6687	38.21190026
	1.0	253.4175	268.9137	261.7454	6.995747459

Tablo 7. DMO Algoritması tutarlılık test sonuçları

	M	En iyi FF	En kötü FF	Ortalama FF	SD
Düşük	0.1	639.9191	639.9195	639.9193	0.000151658
	0.2	372.2170	373.4845	372.5665	0.523020136
	0.3	240.0000	243.4628	241.6354	1.346578969
Orta	0.4	330.0449	335.8261	332.3950	2.173133603
	0.5	313.2210	318.6277	316.2707	2.089369069
	0.6	230.3388	239.7146	233.5729	3.615158234
Yüksek	0.7	331.7954	343.5299	336.0832	4.719616123
	0.8	231.7386	239.7378	236.2114	3.355964747
	0.9	210.2884	215.9969	213.5371	2.260840591
	1.0	248.2629	252.4363	249.6602	1.658498588

Tablo 8. Algoritmaların her deneme için hesaplama sürelerinin karşılaştırmalı tablosu

Algoritma	Çalıştırma Sırası					Ortalama Süre (sn)
	1	2	3	4	5	
GA	1.156	1.141	1.146	1.176	1.173	1.1584
PSO	0.620	0.710	0.712	0.669	0.728	0.6878
DMO	0.450	0.452	0.408	0.441	0.468	0.4438

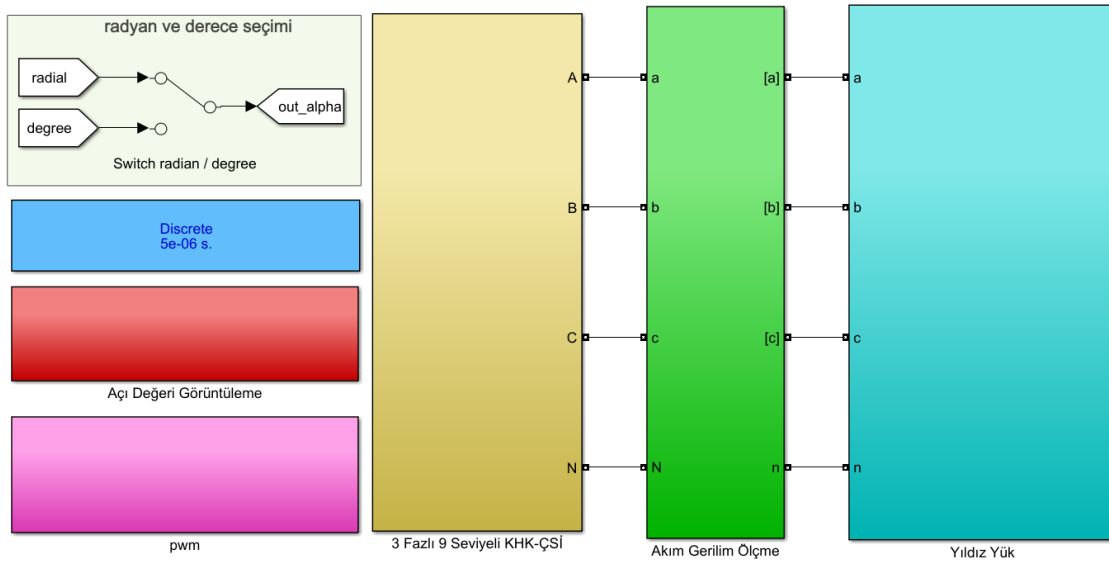
3.4. Hız Testi

Optimizasyon hız testi, bir optimizasyon algoritmasının çalışma hızını ve sonuç üretme hızını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen bir test yöntemidir. Bu test, bir algoritmanın çözüm süresini ve hızını ölçerek performansını değerlendirir.

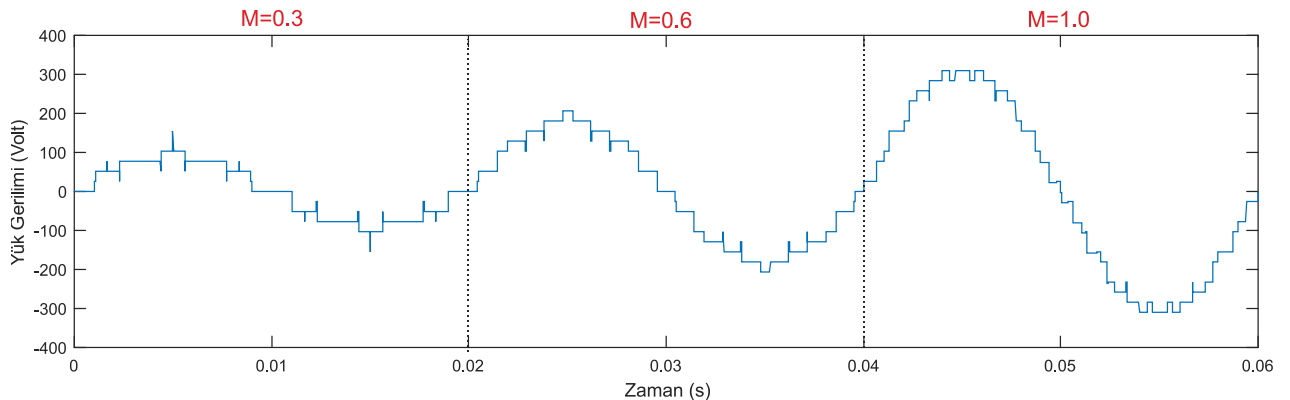
Her üç algoritma, 5 farklı denemede çalıştırılmış ve her bir deneme 100 tekrarla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 8'de sunulmaktadır. Bu sonuçlara göre, DMO algoritması en hızlı çalışan algoritma olarak belirlenirken, GA en yavaş çalışan algoritma olarak belirlenmiştir.

Tablo 2, 3 ve 4'de görüldüğü üzere düşük, orta ve yüksek modülasyon indeks değerleri için GA, PSO ve

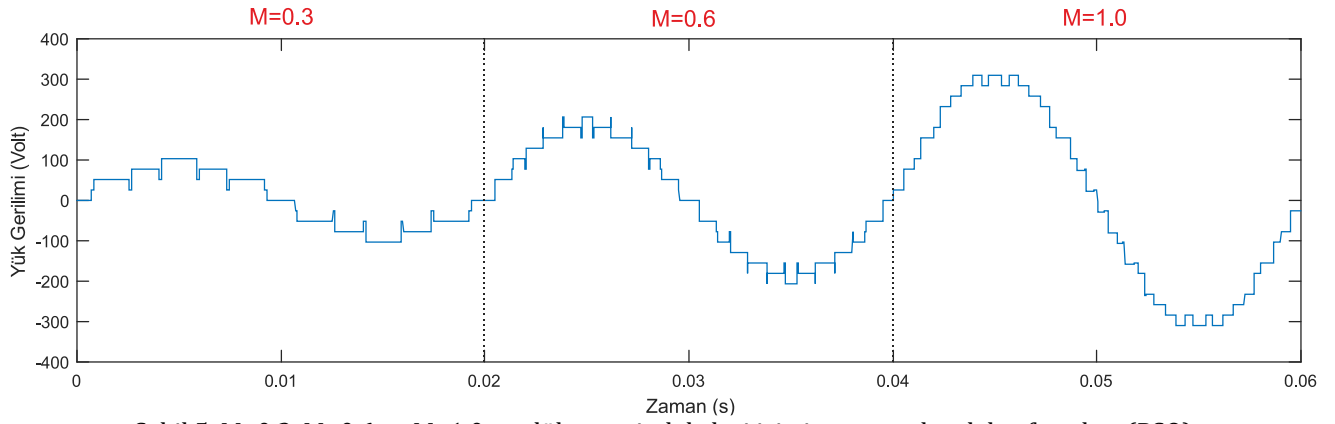
DMO algoritmaları uygun çözümler bulunmuştur. Çok seviyeli inverterler genel olarak düşük modülasyon indekslerinde çalıştırılmaz. Uygulamalarda kullanılan modülasyon değeri orta modülasyon değerini aşmaktadır. Tabloda görüldüğü gibi düşük, orta ve yüksek modülasyon indeksi için DMO algoritması ile daha uygun çözümler bulunmuştur. GA, PSO ve DMO algoritmalarıyla düşük, orta ve yüksek modülasyon indeksi için elde edilen anahtarlamaya açıları Şekil 3'de verilen üç fazlı 9 seviyeli inverter Simulink modeline uygulanmıştır. GA, PSO ve DMO algoritmaları ile elde edilen gerilm dalgı formu sırası ile Şekil 4, 5 ve 6'de verilmiştir.



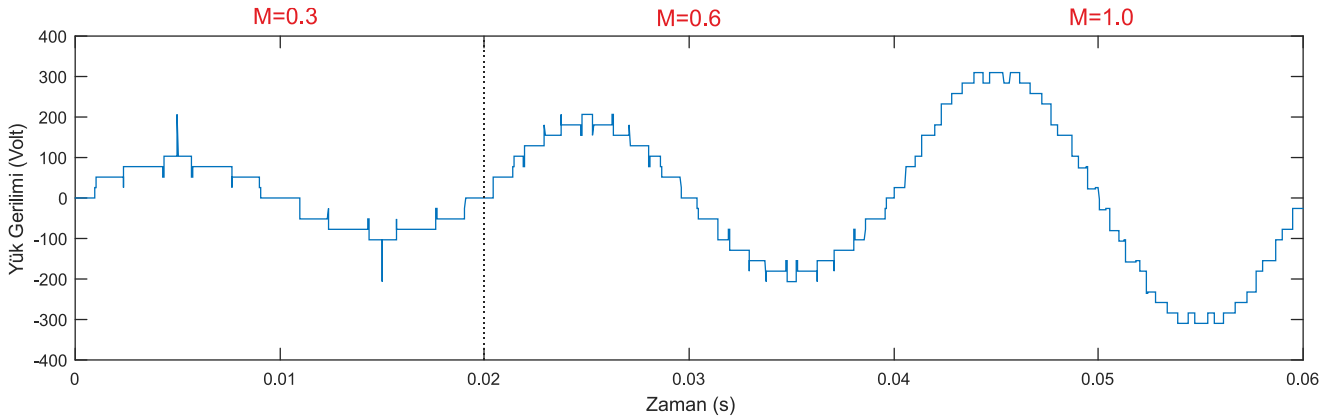
Şekil 3. Üç fazlı dokuz seviyeli KHK-ÇSİ simulink modeli



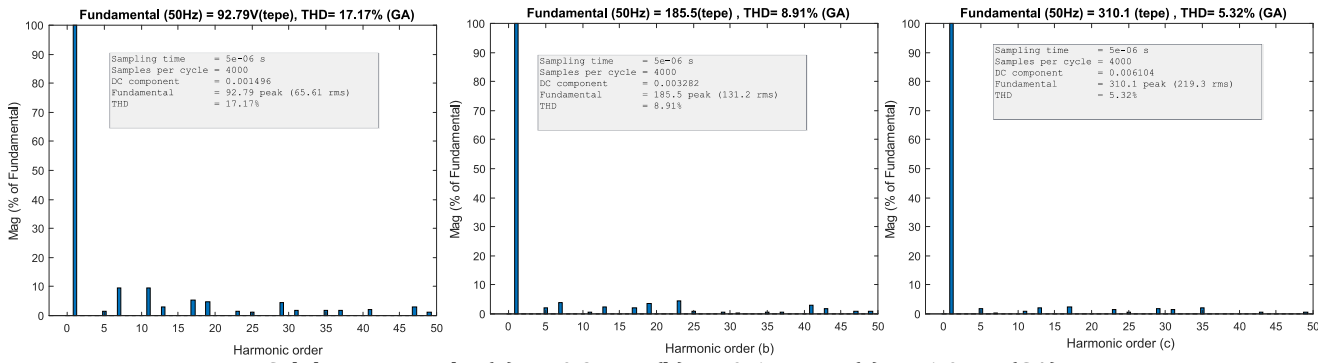
Şekil 4. M=0.3, M=0.6 ve M=1.0 modülasyon indeksleri için inverter çıkış dalgı formları (GA)



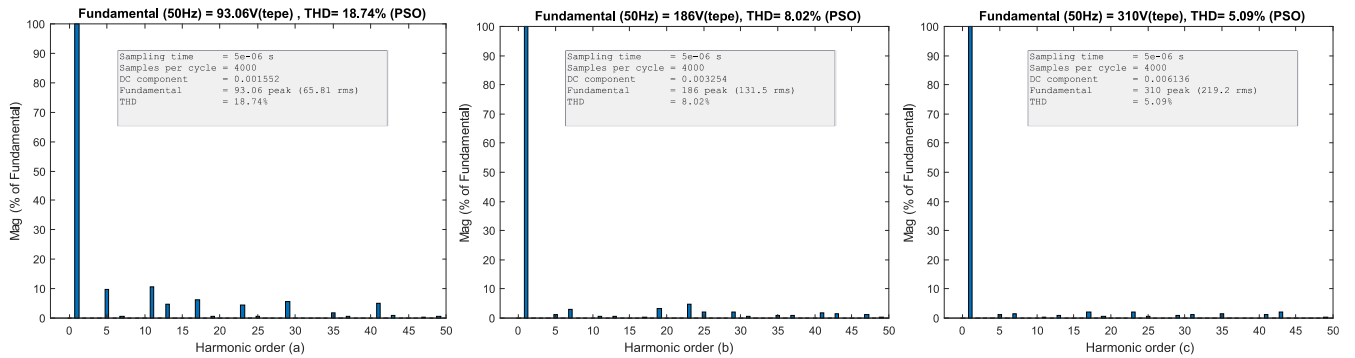
Şekil 5. M=0.3, M=0.6 ve M=1.0 modülasyon indeksleri için inverter çıkış dalga formları (PSO)



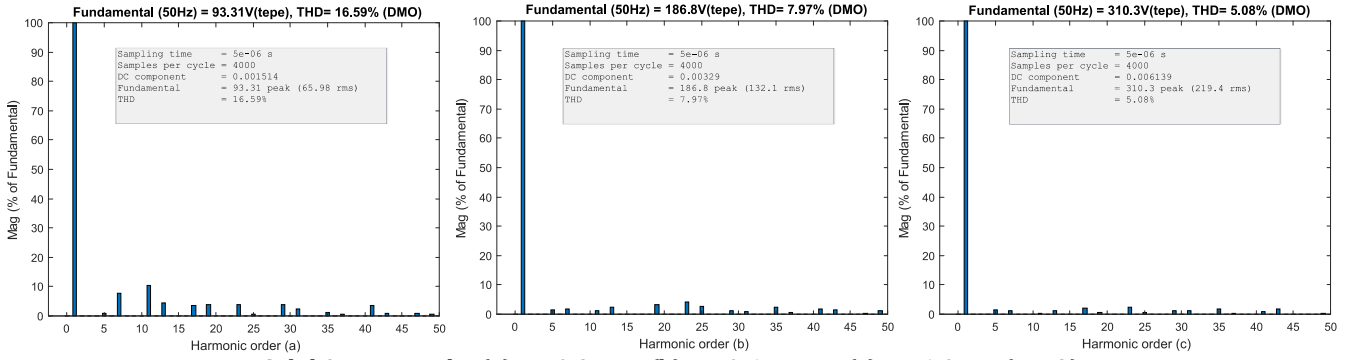
Şekil 6. M=0.3, M=0.6 ve M=1.0 modülasyon indeksleri için inverter çıkış dalga formları (DMO)



Şekil 7. THD analiz (a) M=0.3 için, (b) M=0.6 için ve (c) M=1.0 için(GA)



Şekil 8. THD analiz (a) M=0.3 için, (b) M=0.6 için ve (c) M=1.0 için(PSO)



Şekil 9. THD analiz (a) M=0.3 için, (b) M=0.6 için ve (c) M=1.0 için(DMO)

Şekil 4, GA ile elde edilen dalga formunun harmonik analizini sunmaktadır. 0.3 modülasyon indeksi için hesaplanan temel gerilim değeri %0.59 hata payıyla 92.79V tepe değerine ve 65.61V rms değerine sahiptir. Bu koşulda, THD değeri %17.17 olarak ölçülmüştür. 0.6 modülasyon indeksi için temel gerilim değeri %0.61 hata ile 185.5V tepe değerine ve 131.2V rms değerine ulaşmıştır. Bu modülasyon indeksi değerinde THD değeri %8.91 olarak hesaplanmıştır. 1.0 modülasyon indeksi için temel gerilim değeri %0.32 hata ile 310.1V tepe değerine ve 219.3V rms değerine sahiptir. Bu durumda THD değeri %5.32 olarak ölçülmüştür.

Şekil 5, PSO ile elde edilen dalga formunun harmonik analizini sunmaktadır. 0.3 modülasyon indeksi için hesaplanan temel gerilim değeri %0.29 hata payıyla 93.06V tepe değerine ve 65.81V rms değerine sahiptir. 0.3 modülasyon indeksi için THD değeri %18.74 olarak ölçülmüştür. 0.6 modülasyon indeksi için temel gerilim değeri %0.38 hata ile 186V tepe değerine ve 131.5V rms değerine ulaşmıştır. Bu durumda THD değeri %8.02 olarak hesaplanmıştır. 1.0 modülasyon indeksi için temel gerilim değeri %0.36 hata ile 310V tepe değerine ve 219.2V rms değerine sahiptir. Birim modülasyon indeksi için THD değeri %5.09 olarak ölçülmüştür.

Şekil 6, DMO ile elde edilen dalga formunun harmonik analizini içermektedir. 0.3 modülasyon indeksi için hesaplanan temel gerilim değeri %0.03 hata ile 93.31V tepe değerine ve 65.98V rms değerine sahiptir. Bu koşulda THD değeri %15.59 olarak ölçülmüştür. 0.6 modülasyon indeksi için temel gerilim değeri %0.08 hata ile 186.8V tepe değerine ve 132.1V rms değerine ulaşmıştır. 0.6 modülasyon indeksi için THD değeri %7.97 olarak hesaplanmıştır. 1.0 modülasyon indeksi için temel gerilim değeri %0.27 hata ile 310.3V tepe değerine ve 219.2V rms değerine sahiptir. Bu durum için THD değeri %5.08 olarak ölçülmüştür.

4. Sonuç

Bu çalışmada, Total Harmonik Distorsiyon (THD) optimizasyon problemine ilk defa uygulanan, yeni geliştirilen bir meta-sezgisel algoritma olan Cüce

Kuyruksüren Optimizasyon Algoritması (DMOA) incelenmiştir. Algoritmanın performansı, üç fazlı dokuz seviyeli kaskad h-köprü çok seviyeli inverter üzerinde Genetik Algoritma (GA) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritmaları ile birlikte test edilmiştir. Bu algoritmalar, 0.1 ile 1.0 modülasyon indeksi aralığında uygun çözümler elde etmiştir. GA ve PSO, THD standartlarını 0.8 ile 1.0 modülasyon indeksi aralığında sağlarken, DMOA daha geniş bir aralık olan 0.6 ile 1.0 modülasyon indeksi için başarılı sonuçlar elde etmiştir.

Duyarlılık, hız ve istatistiksel hesaplamalar açısından yapılan karşılaştırmalar sonucunda, DMO algoritması her durumda en avantajlı algoritma olarak öne çıkmıştır. PSO algoritması, GA algoritmasına göre daha iyi performans göstermiştir.

Ayrıca, temel gerilim kontrol hatası incelendiğinde, GA algoritması en yüksek hataya sahip iken, PSO algoritması DMO algoritmasına göre daha fazla hataya sahiptir.

Sonuç olarak, DMOA algoritması, karmaşık hesaplamalara ihtiyaç duymadan çeşitli çok seviyeli inverterlerde etkili bir şekilde kullanılabilir. Ayrıca, DMOA, diğer optimizasyon problemlerini çözmek için de etkili bir araç olabilir.

Kaynaklar

- [1] Mittal, N., Singh, B., Singh, S. P., Dixit, R., & Kumar, D. (2012, December). Multi-level inverters: A literature survey on topologies and control strategies. In 2012 2nd International Conference on Power, Control and Embedded Systems (pp. 1-11). IEEE.
- [2] Panigrahi, R., Mishra, S. K., Srivastava, S. C., Srivastava, A. K., & Schulz, N. N. (2020). Grid integration of small-scale photovoltaic systems in secondary distribution network—A review. IEEE Transactions on Industry Applications, 56(3), 3178-3195.
- [3] Djehaf, M. A., Zidi, S. A., Kobibi, Y. D., & Hadjeri, S. (2015, March). Modeling of a multi-level converter

- based VSC HVDC supplying a dead load. In 2015 International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT) (pp. 218-223). IEEE.
- [4] Zhou, B., Li, B., He, J., Li, Y., & Li, Q. (2023). A novel mitigation strategy of subsequent commutation failures in the hybrid cascaded LCC-MMC HVDC transmission system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 148, 108969.
- [5] Shashank, B. P., Ananya, T., Venkatesh, S., & Srinivas, N. (2023, May). Application of Multi Level Inverter Using MMC and FACTS in Distributed Energy Systems. In 2023 4th International Conference for Emerging Technology (INCET) (pp. 1-5). IEEE.
- [6] Behbahanifard H, Abazari S, Sadoughi A (2019) New scheme of SHE-PWM technique for cascaded multi-level inverters with regulation of DC voltage sources. *ISA Trans*
- [7] Arani AAK, Ghasemi A, Karami H et al (2019) optimal switching algorithm for different topologies of 15-level inverter using genetic algorithm. In: 2019 IEEE 5th conference on knowledge based engineering and innovation (KBEI 2019), pp 352–358
- [8] Fei, W., Du, X., & Wu, B. (2009). A generalized half-wave symmetry SHE-PWM formulation for multi-level voltage inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(9), 3030-3038.
- [9] Hutson CM, Venayagamoorthy GK, Corzine KA (2008) Optimal SVM switching for a multi-level multi-phase machine using modified discrete PSO. In: 2008 IEEE Swarm Intelligence Symposium
- [10] Sumithira TR, Nirmal Kumar A (2013) Elimination of harmonics in multi-level inverters connected to solar photovoltaic systems using ANFIS: an experimental case study. *J Appl Res Technol* 11:124–132.
- [11] Karaca, H., & Bektaş, E. (2016). Selective Harmonic Elimination Using Genetic Algorithm for Multi-level Inverter with Reduced Number of Power Switches. *Engineering Letters*, 24(2).
- [12] Jing, T., Maklakov, A. S., & Gasiyarova, O. A. (2019, January). Research on selective harmonic elimination technique based on particle swarm optimization. In 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus) (pp. 694-700). IEEE.
- [13] Sayyah A, Aflaki M, Rezazadeh A (2008) Optimization of total harmonic current distortion and torque pulsation reduction in high-power induction motors using genetic algorithms. *J Zhejiang Univ Sci A* 9:1741–1752
- [14] Agushaka, J. O., Ezugwu, A. E., & Abualigah, L. (2022). Dwarf mongoose optimization algorithm. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 391, 114570.
- [15] Akinola, O. A., Ezugwu, A. E., Oyelade, O. N., & Agushaka, J. O. (2022). A hybrid binary dwarf mongoose optimization algorithm with simulated annealing for feature selection on high dimensional multi-class datasets. *Scientific Reports*, 12(1), 14945.
- [16] Aldosari, F., Abualigah, L., & Almotairi, K. H. (2022). A normal distributed dwarf mongoose optimization algorithm for global optimization and data clustering applications. *Symmetry*, 14(5), 1021.
- [17] Agushaka, J. O., Ezugwu, A. E., Olaide, O. N., Akinola, O., Zitar, R. A., & Abualigah, L. (2023). Improved dwarf mongoose optimization for constrained engineering design problems. *Journal of Bionic Engineering*, 20(3), 1263-1295.
- [18] Raj, M. G., & Pani, S. K. (2023). Intrusion detection system using combination of deep residual fuzzy network and white shark-dwarf mongoose optimization. *Soft Computing*, 1-17.
- [19] Dora, B. K., Bhat, S., Halder, S., & Sahoo, M. (2023). Solution of Reactive Power Dispatch problems using Enhanced Dwarf Mongoose Optimization Algorithm. In 2023 International Conference for Advancement in Technology (ICONAT) (pp. 1-6). IEEE.
- [20] Çelik, E. (2023). IEGQO-AOA: information-exchanged Gaussian arithmetic optimization algorithm with quasi-opposition learning. *Knowledge-Based Systems*, 260, 110169.
- [21] Çelik, E., Öztürk, N., & Arya, Y. (2021). Advancement of the search process of salp swarm algorithm for global optimization problems. *Expert Systems with Applications*, 182, 115292.