

Havacılık Sektöründe Yeşil Kompozitler: NACA 4452 Rib Uygulaması

Mesut UYANER^{1*}  Kübra KARADAL²  Tolga MERDAN³ 
Nagehan Nur ACAR⁴ 

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

² Fergani Uzay Teknolojileri Bilişim Sanayi ve Ticaret A.Ş., İstanbul, Türkiye

³ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

⁴ TUSAŞ Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş., Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

ÖZET

Geliş Tarihi: 09.12.2023
Kabul Tarihi: 15.04.2024
Yayın Tarihi: 31.08.2024

Anahtar Kelimeler:

Analiz,
Havacılık,
Yenilenebilirlik,
Yeşil Kompozit,
AL 7075-T6,
Cam elyaf/Elium.

Günümüzde kompozit malzemelerin kullanımı gelişen teknolojiyle birlikte doğru orantılı bir şekilde artmaktadır. Kompozit malzemeler hayatımızın birçok farklı alanında özellikle makina, otomotiv ve havacılık ve uzay sanayide ve bunun gibi birçok alanda karşımıza çıkmaktadır. Kompozit malzemeler kullanacağımız alan ve istediğimiz yapısal özellikler için maksimum verime ulaşmamızda yardımcı olacak en az iki malzemenin makro düzeyde birleşmesiyle oluşan malzemelerdir. İstenilen yapısal özellikleri özellikle havacılık ve uzay sanayide bir numaralı öncelik olan hafiflik ve yüksek mukavemet dayanımı özelliklerini bize daha başarılı bir şekilde sunmakta ve bunun neticesinde de şirketlerin ekonomik olarak daha iyi seviyelere gelmesine ve dolaylı yoldan hizmetlerin fiyat performans oranında daha üst seviyelere çıkmasına sebep olmuştur. Kompozit malzemelerin hayatımıza doğrudan etki etmesi ve gelişen teknoloji ile birlikte bu alana daha çok ilgi ve beklentinin artması kaçınılmaz hale gelmiştir. Doğal liflerden ve biyopolimerlerden yapılan polimer kompozitler yeşil kompozitler olarak adlandırılır ve kompozitlere kıyasla bazı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Çalışmamız yeşil kompozitlerin özellikleri, kullanım alanları, günümüzde ve havacılık sektöründeki yerini ortaya koymakta ve yeşil kompozit olarak değerlendirilen termoplastik kompozit sistemlerinde cam elyaf/Elium'un NACA 4452 uçak kanadı ribinin gerilme analizini sunmaktadır. Bu çalışmamız, bertarafı zor ve maliyetli olan termoset kompozit sistemlerinin yerine termoplastik kompozit sistemi olan cam elyaf/Elium sisteminin metal rib yerine rahatlıkla kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Green Composites in Aviation Industry: NACA 4452 Rib Application

Article Info

ABSTRACT

Received: 09.12.2023
Accepted: 15.04.2024
Published: 31.08.2024

Keywords:

Analysis,
Aviation,
Green Composite,
Renewability,
AL 7075-T6,
Glass fiber/Elium.

Today, the use of composite materials is increasing in direct proportion with the developing technology. Composite materials appear in many different areas of our lives, especially in the machinery, automotive and aerospace industries, and in many other areas. Composite materials are materials that are formed by combining at least two materials at a macro level that will help us achieve maximum efficiency for the area we will use and the structural features we want. The desired structural features, especially the number one priority in the aerospace industry, provide us with the lightness and high strength features more successfully, and as a result, the companies have come to better levels economically and indirectly the price-performance ratio of the services has increased to higher levels. With the direct impact of composite materials on our lives and the developing technology, it has become inevitable to increase more interest and expectations in this field. Polymer composites made from natural fibers and biopolymers are called green composites and have some advantages and disadvantages compared to composites. Our study reveals the properties of green composites, their usage areas, their place in today's and aerospace industry and presents the stress analysis of glass fiber/Elium in thermoplastic composite systems considered as green composites in NACA 4452 aircraft wing rib. This study has shown that the glass fiber/Elium thermoplastic composite system can be easily used in replace of metal ribs, as thermoset composite systems, which are hard and costly to recycle.

To cite this article:

Uyaner, M.; Karadal, K.; Merdan, T. & Acar, N.N. (2024). Havacılık sektöründe yeşil kompozitler: NACA 4452 Rib uygulaması. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(2), 272-288. <https://doi.org/10.47112/neufmbd.2024.48>

*Sorumlu Yazar: Mesut Uyaner, muyaner@erbakan.edu.tr



This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde, teknolojinin gelişmesiyle birlikte kompozit malzemelerin kullanımı artmaktadır. Bu malzemeler, minimum iki farklı malzemenin birleştirilmesiyle oluşan ve istenilen yapısal özellikleri elde etmek için tasarlanmış malzemelerdir. Kompozit malzemeler, makine, otomotiv, havacılık ve uzay sanayi gibi çok çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Özellikle havacılık ve uzay sanayisi sektöründe, hafiflik ve yüksek mukavemet dayanımı gibi önemli yapısal özelliklerin elde edilmesinde kompozit malzemeler çok işlevsel hale gelmiştir. Bu özellikleri sayesinde, şirketler ekonomik açıdan daha verimli hale gelmiş ve hizmetlerinin fiyat performans oranı yükselmiştir.

Kompozit malzemelere kıyasla hafiflik, yenilenebilirlik gibi konularda nispeten daha avantajlı olduğu, doğal liflerden ve biyo-polimerlerden yapılan polimer kompozitlere yeşil kompozitler denir. Yeşil kompozitlerin kullanımı her geçen gün artması beklenmekte olup bu konu üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bazı çalışmalar aşağıda verilmiştir.

2021’de Habib Awais ve arkadaşları çalışmalarında [1] doğal liflerle güçlendirilmiş termoplastik kompozitlerin çevre dostu bir seçenek olabileceği konusunu incelemişlerdir. Bu malzemeler biyolojik olarak parçalanabilir, düşük maliyetli ve yenilenebilir özellikleri nedeniyle havacılık endüstrisinde giderek daha popüler hale gelmektedir. Makalede ayrıca, farklı doğal lif türlerinin avantajları ve dezavantajları ele alınarak, bu liflerin termoplastik kompozitler ile birleştirilerek nasıl kullanılabileceği incelenmiştir. Bu doğal lifler arasında, kenevir, keten, jüt, bambu, kuzu yünü ve pamuk gibi lifler yer almaktadır.

2012’de Anahi Pereira da Costa ve arkadaşları yaptıkları çalışmaya [2] göre; termoplastik kompozitler için en yaygın kullanılan kaynak teknolojilerinden biri ultrasonik kaynaktır. Bu teknik, yüksek frekanslı titreşimleri kullanarak ısının üretilmesini ve kaynaklanacak iki parça arasında moleküler bağ oluşmasını sağlar. Diğer sık kullanılan bir teknik ise lazer kaynağıdır. Bu teknik, ısı girdisinin hassas kontrolünü ve karmaşık şekillerin kaynağı yapabilme yeteneğini sağlamaktadır. Termoplastik kompozitler için keşfedilen diğer kaynak teknolojileri arasında sıcak plaka kaynağı, titreşimli kaynak ve indüksiyon kaynağı yer almaktadır. Her bir teknik kendi avantajları ve sınırlamalarına sahiptir ve kaynak teknolojisi seçimi, kaynaklanacak parçaların geometrisi, kaynaklı birleşik özellikleri ve üretim hacmi gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu çalışma havacılık endüstrisinde termoplastik kompozitlerin kaynak teknolojileri konusunda detaylı bir inceleme sunmaktadır.

2016’da yaptığı çalışmada [3] Django Mathijsen, termoplastik kompozit malzemelerin havacılık endüstrisindeki kullanımının önemini vurgulamaktadır, termoplastik kompozit malzemelerin hafif, sağlam ve çevre dostu olduğu belirtilmektedir. Yazar, termoplastik kompozit malzemelerin avantajlarına odaklanarak, uçak parçalarının üretim sürecinin daha hızlı ve verimli hale getirilebileceğini ve aynı zamanda daha sürdürülebilir bir seçenek sunabileceğini ifade etmektedir.

2014’te T.Subash, S.Nadaraja Pillai tarafından yapılan çalışmada [4] uçak iç yapılarında kullanılan yeşil kompozitlerin üretiminde bast liflerinin önemini incelemişlerdir. Bu lifler, düşük maliyetli ve çevre dostu oldukları için tercih edilmektedir. Aynı zamanda, bu liflerin yüksek mukavemet özellikleri de bulunmaktadır. Yapılan çalışmada ayrıca, bast liflerinin farklı matris malzemeleri ile birleştirilerek yeşil kompozitlerin üretilebileceği belirtilmiştir. Bu yeşil kompozitler, geleneksel kompozitlere göre daha çevre dostu olmaları nedeniyle havacılık endüstrisinde giderek popüler hale gelmektedir. Yeşil kompozitlerin uçak iç yapılarında kullanımı konusunda kapsamlı bir inceleme sunan çalışma. Ayrıca, çalışmada bast liflerinin diğer geleneksel liflerle karşılaştırıldığında avantajlarına da yer verilmiştir.

2017’de Claudio Scarponi ve arkadaşları yapmış olduğu çalışmada [5], havacılık endüstrisi için yeşil kompozit malzemelerin, biyobazlı polimerlerin ve doğal fiber takviyeli polimer matrislerinin iç mekân panellerinde kullanımının avantajlarını vurgulamaktadır. Yazar bu malzemelerin havacılık endüstrisinde yaygınlaştırılması konusunda farkındalık oluşturmuştur.

2017’de S. Gopi ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [6] havacılık endüstrisinde yeşil malzemelerin kullanımının önemi vurgulanmıştır. Makale, biyolojik kaynaklardan elde edilen malzemelerin ve geri dönüştürülmüş malzemelerin havacılıkta kullanımının artmasıyla birlikte çevresel sürdürülebilirliğin artacağına dair bir argüman sunmaktadır. Çalışma, biyoplastikler ve geri dönüştürülmüş malzemelerin havacılık endüstrisi için potansiyel olarak kullanılabilir olduğunu göstermektedir.

2018’de Sharath Shekar ve M. Ramachandra yaptıkları çalışmada [7], yeşil kompozit malzemelerin kullanımının çevresel sürdürülebilirlik açısından önemini vurgulamıştır. Makale, biyolojik kaynaklardan elde edilen malzemelerin ve geri dönüştürülmüş malzemelerin bileşiminden oluşan yeşil kompozit malzemelerin avantajlarına odaklanmaktadır.

2019’da C. Soutis ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [8], havacılık endüstrisinde yeşil kompozit malzemelerin kullanımının önemini vurgulanmaktadır. Makale, güçlendirici lifler için biyolojik kaynakların kullanılması, geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımı ve biyo-temelli polimerler gibi yenilenebilir kaynakların kullanımına odaklanmaktadır. Yazarlar, bu yeşil kompozit malzemelerin geleneksel malzemelere göre çevresel etkilerinin daha düşük olduğunu ve aynı zamanda daha hafif olduğunu belirtmektedirler. Bu sayede, uçakların yakıt tüketiminde azalma sağlayarak çevreye daha az zarar verilebileceği söylenmektedir. Ayrıca havacılık endüstrisinde kullanılan geleneksel malzemelerin neden çevreye zararlı olduğuna da değinmektedir.

Bayraktar ve arkadaşları, Poliamid – Naylon 6/6 %50 uzun cam elyaf takviyeli kompozitten yapılmış ve kapı boşluğu içeren uçak gövde parçasının sanal testi gerçekleştirmişlerdir [9]. Bu çalışma ile uçak ana bileşeninde termoplastik kompozit sistemi kullanılabilirliği araştırılmıştır. Analiz neticesinde önerilen kompozit sisteminin standart iç basınç uygulamalarında erkenden akmaya uğradığı belirtilmiştir.

AL 7075-T6 alüminyum ve grafit epoksi malzemedan NACA-4412 ribleri boşluklu ve boşluksuz olarak tasarlanmış ve gerilme analizi gerçekleştirilmiştir [10].

Bu çalışmamızda ise NACA-4452 ribleri cam elyaf/Elum termoplastik kompozit sistemi kurgulanmıştır. Karşılaştırma için de AL 7075-T6 alüminyumundan mamul ribler seçilmiştir.

Yeşil Kompozitlerin Güncel Durumu

Kompozit malzemeler, farklı özelliklere sahip malzemelerin kombinasyonu ile oluşur ve bir arada kullanıldığında, benzersiz özellikler sunarlar. Kompozitler, dayanıklılık, hafiflik ve yüksek mukavemet gibi özellikleri nedeniyle pek çok farklı uygulamada kullanılır. Örneğin, karbon fiberle güçlendirilmiş polimer matrisli kompozitlerin, yüksek mukavemet ve hafiflik özellikleri vardır [11,12].

Kompozit malzemeler, dayanım özelliklerinden dolayı geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bu malzemeler havacılık, otomobil, uzay teknolojisi, rüzgâr santralleri, spor malzemeleri ve daha birçok alanda kullanılmaktadır. Bununla birlikte, kompozit malzemelerin sınıflandırılması, uygulama alanlarına göre değişebilir.

İlk sınıflandırma kriteri, matris malzemesinin türüdür. Polimer matrisli kompozitler, seramik matrisli kompozitler, metal matrisli kompozitler ve karbon matrisli kompozitler olarak sınıflandırılabilirler. Her kategorinin kendine özgü özellikleri ve farklı uygulama alanları bulunmaktadır.

İkinci sınıflandırma kriteri, takviye elemanının tipidir. Takviye elemanları, lifler veya parçacıklar biçiminde olabilir. Fiber kompozitler, cam, karbon, aramid veya doğal fiberler gibi yüklem elemanlarından oluşur ve genellikle polimer matrisli kompozitlerde kullanılır. Parçacık takviyeli kompozit malzemeler, alümina, silisyum karbür ve bor gibi yüksek mukavemetli tozlardan oluşan malzemelerdir.

Kompozitlerin başka bir sınıflandırması, takviyelerin yönüne dayanmaktadır. Bu yönelim, tek yönlü, çift yönlü ve çok işlevli kompozitler olarak adlandırılabilir [11,12].

Kompozitlerin özellikleri, bileşen malzemelerin özelliklerine, yani kullanılan liflere ve reçinelere bağlıdır. Kompozitlerin mukavemeti ve sertliği, yükün çoğunu ve hacim içeriğini taşıyan takviye edici elyaf özelliklerine bağlıdır. Reçine ise kompozit içindeki liflerin göreceli konumunu korumaya yardımcı olur ve daha da önemlisi, yükü alt liflerden bozulmamış liflere aktarır. Yüksek mukavemetli kompozitler üretmek için, fiber özellikleri, reçine özellikleri ve ayrıca fiber/reçine arayüz özellikleri gibi üç faktörün tümü hesaba katılmaktadır. Elyafta yapılan modifikasyon ayrıca arayüzün ve kompozit özelliklerinin nemden etkilenecek bozulmasına karşı direnci geliştirir.

Ek olarak, işleme koşulları/teknikleri gibi faktörler, elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri üzerinde önemli etkiye sahiptir. Mekanik özellikleri üretim kalitesine, elde edildikleri bitkinin yaşına ve gövdesine, ekstraksiyon tekniklerine ve sahanın çevre koşullarına bağlı olarak değişir [7].

Yeşil Kompozitler

Doğal liflerden ve biyo-polimerlerden yapılan polimer kompozitlere yeşil kompozitler denir [13]. Doğal liflerden bazıları ise Hindistan cevizi, keten, sisal, kenevir vb.dir. Biyopolimerlere örnek olarak ise nişasta, Poli laktik asit (PLA), CNSL, furan vb. verilebilir.

Selüloz bazlı lifler, kökenlerine göre ayrıca sınıflandırılabilir: yaprak, sak, tohum, sap ve çimen. Sak, gövde ve yapraktan elde edilen lifler doğal olarak demetler halinde düzenlenir ve bu nedenle lif demetleri olarak adlandırılırken, tohumdan elde edilen lifler tek hücrelidir. Doğal lifler esas olarak üç ana bileşenden yapılır; selüloz, lignin ve hemiselüloz. Selüloz, doğal elyafın doğal mukavemetinden ve stabilitesinden sorumlu olan ana bileşendir. Genellikle kırsal alanlarda doğal lifler, halat, çanta, süpürge ve mobilya gibi yapısal olmayan uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Lifler ayrıca çatı kaplama ve yalıtım için kullanılabilir.

Selüloz bazlı elyaf/termoplastik kompozit sistemleri son zamanlarda araştırma ilgi konusu olmuştur. Yeniden üretilmiş selüloz kumaş/Elüim reçine termoplastik sisteminin üretimi, mekanik testleri ve simülasyonu bunlardan birisidir [14].

Yeşil kompozitlerin avantajları şu şekilde verilebilir:

- Kompozit ürünler, birim ağırlık başına iyi mekanik özelliklere sahiptir, dayanıklıdır. Yapıları karmaşık ve büyük şekillerin imalatına izin verir. Üretim esnasında karmaşık şekiller halinde oluşturulabilir ve ayrıca kolayca boyuna kesilebilirler.
- Bu lifler yenilenebilir, işlemek için kullanılan ekipmana aşındırıcı etkisi azdır. İyi bir kalorifik değere sahip olduklarından enerji geri kazanımı için yaşam döngülerinin sonunda yakılabilirler. Bitki lifleri, düşük yoğunluk ve yüksek özgül sertlik, düşük maliyet ve yeniden kullanım nedeniyle fosil bazlı liflere göre avantaja sahiptir.
- Bitki lifleri, üretim ve proses süreçleri göz önüne alınmadığında karbon nötr olarak değerlendirilebilir. Bu yüzden bunlar çevre dostu olarak bilinmektedir. Selüloz bazlı liflerin daha düşük özgül yoğunluğu, taşımada doğrudan avantajlarla birlikte kompozit üretiminde ağırlık tasarrufuna imkân verir.

- Bitki liflerinin fosil yakıt bazlı takviyelere kıyasla daha yüksek lif hacim fraksiyonları, bitki lifleri matrislerden daha ucuz olduğu için önemli malzeme maliyet tasarrufları da sağlamaktadır.

Bu avantajların yanı sıra bazı dezavantajlar da mevcuttur. Bunlar şu şekilde sıralanabilir:

- NFRP kompozitlerin kullanımı, doğal liflerin nem emme eğiliminde oluşu, sentetik muadillerine göre zayıf yapışma ve işleme sırasında düşük termal kararlılık gibi belirli özelliklerinden dolayı kısıtlanmıştır.
- Doğal elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri, elyaf, elyaf-matris arayüz bölgesi ve matris yapısı tipik olarak nemden etkilendiği için belirli bir süre içinde bozulur.
- Doğal elyaf kompozitlerinin özelliklerinin bozulma derecesi ve tersine çevrilebilirliği, büyük ölçüde nem emme derecesine paraleldir.
- Düşük termal kararlılığa sahiptir diğer bir deyişle orta sıcaklıkta (230-250 °C) kolayca bozulabilir [15,16].

Görüldüğü üzere yeşil kompozitlerin avantajları olduğu gibi bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Ancak bunlar kıyaslandığında, dezavantajların göz ardı edilebileceği görülmektedir.

Havacılık Uzak Sektörü İçin Yeşil Kompozitler

İlk uçak yapıları, uçuş merakıyla birlikte üretildi ve büyük ölçüde ahşap, tel ve kumaştan imal edildi. Daha sonra 1930'larda alüminyum alaşımları tercih edilmeye başlandı ve günümüzde sektörde çok kullanılan bir malzeme oldu. Ancak, ahşap yapılar 2.Dünya Savaşı'na kadar devam etti. Bu süreçte kullanılan teknolojiler ise geliştikçe, Havilland Mosquito uçağı (DH98) gibi mühendislik tasarımının zirvesini temsil eden kontrplak-balsa-kontrplak sandviç laminat gibi yapılar ortaya çıktı.

Günümüzde ise elyaf takviyeli plastikler ile uçak yapımında ise genellikle karbon, cam, Kevlar veya bunların hibritleri kullanılır. Bu materyallerin bir araya getirilmesiyle lifli kompozitler oluşur. Matris malzemesi olarak ise ısıyla sertleşen epoksi sistemleri kullanılır. Uçak endüstrisinde epoksi reçineler yaygın olarak kullanılmaktadır ancak ateşe maruz kaldıklarında kolayca yanarlar ve aşırı ısı ve duman yayabilirler. Bu nedenle, FAA gibi otoritelerin belirlediği yangına dayanıklılık standartlarına ulaşmak için polimerlere alev geciktirici katkı maddeleri eklenir. Alev geciktirici katkı maddeleri, ya polimer içinde ayrı parçacıklar şeklinde ya da polimer zincir yapısına kimyasal olarak dahil edilerek kullanılır. Yolcu uçaklarındaki iç donanım ve mobilyaların çoğu fenolik reçine (cam elyafı) kullanılarak yapılmıştır. Fenolik reçineler, federal havacılık yönetmeliklerine uygun olduğundan yangın durumunda daha güvenlidir. Bu reçineler alternatif olarak termoplastik esaslı reçineler üzerinde çalışılmaktadır. Termoset reçineler gibi sıvı formda üretilen ve ticarileşmiş Elium® reçinesi mevcuttur. Üreticisi Arkema, Fransa, olan bu reçine kullanılarak üretilen kompozit parçalarından elyaf ve reçinelerin %100 oranında geri dönüşüm yapıldığı bilgisi üretici firma web sitesinde mevcuttur.

Elastomerler, dayanım ve mukavemet açısından iyi bir performans göstermezler, ancak yüksek elastikliğe sahiptirler ve sıkı bir sızdırmazlık gerektiren uçak bileşenlerinde kullanılabilirler. Elastomerler, çapraz bağlanma adı verilen bir üretim süreci ile elastik gerilmeye karşı az miktarda direnç sağlayacak şekilde üretilirler. Vulkanizasyon adı verilen bir işlemle çapraz bağlanma oluşturulur ve bu işlem elastomerin özelliklerini belirleyen önemli faktördür. Çapraz bağların elastikliği ve aşınma direnci arttırması için doğru oranda yapılması gerekir. Ancak, fazla çapraz bağlanma elastomeri kırılğan hale getirebilir. Uçak lastikleri gibi düşük sertlik ve yüksek esneklik gerektiren yapılar elastomerlerden yapılabilir.

Hava taşımacılığı endüstrisinde, yapısal bileşenlerin geleneksel malzemeler yerine, elyaf takviyeli polimer bazlı doğal malzemelerle üretilmesi üzerine araştırmalar yapılmaktadır. Geleneksel

cam ve karbon fiberler çevre sorunlarına neden olduğu için doğal elyaf takviyeli kompozit malzemeler son dönemde popüler hale gelmiştir. Doğal elyaf malzemelerinin avantajı düşük maliyetli, yüksek dayanıklılık, düşük yoğunluklu ve geri dönüştürülebilir olmasıdır. Tarımsal atıklardan da kolayca sağlanabilir. Bu doğal malzemeler, uçak iç panelleri gibi yapılarda kullanılabilir. Kenaf, bambu, Hindistan cevizi, sisal gibi doğal lifler havacılık ve otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem, gelecekte daha sürdürülebilir bir hava taşımacılığı sistemine geçişte önemli bir adım olabilir [16].

Elyaf takviyeli polimer matris (FRP) kompozitler hafif ve güçlüdür. Ancak, FRP kompozitleri, liflerin polimer matrisinde ayrılmasına neden olan delaminasyon adı verilen hasarlara eğilimlidir. Bu sorunu engellemek için, polimerler yapıştırıcı özellikteki malzemelerdir ve elyafları bir arada tutmak için kullanılır. Polimerler, plastik, elastomer ve yapıştırıcı gibi farklı malzemelerden oluşan geniş bir malzeme sınıfıdır. Üç ana polimer grubu ise termoplastikler, termosetler ve elastomerlerdir. Polimerler, elyaf-polimer kompozitlerde yüksek dayanım ve yüksek mukavemetli elyafları bir arada tutmak için kullanılan yapıştırıcı özelliğindeki malzemelerdir.

Polimerler, uçak yapı bölümlerinin birleştirilmesinde de önemli bir rol oynar ve ayrıca, hasar gören kompozit ve metal bileşenlerin onarımında da kullanılabilir. Geleneksel bağlantı elemanları yerine polimer yapıştırıcılar kullanılarak yüksek mukavemetli ve dayanıklı bağlantılar sağlanabilir. Bu sayede, uçak gövde parçalarını birleştirmede perçin veya vida gibi olumsuz etkilere sahip olan geleneksel yöntemlere ihtiyaç duyulmaz.

Airbus A380 gövdesinde kullanılan Glare [17] adlı fiber-metal laminat, alüminyum ve fiber-polimer kompozit levhaları birbirine yapıştırmak için ince yapışkan katmanları şeklinde kullanır. Elastomerler ise genellikle conta gibi yapısal olmayan uçak parçalarında kullanılır ve yüksek esneklik gerektirir. Bu nedenle, polimer yapıştırıcıların kullanımı, uçak endüstrisinde bağlantı elemanlarından kaçınmak ve daha hafif, daha verimli ve daha dayanıklı uçak yapıları oluşturmak için önemlidir.

Nanokompozitler, havacılık ve uzay endüstrisinde geleneksel malzemelerin yerini alma potansiyeline sahip umut verici bir malzeme sınıfıdır [18]. Nanokompozitler, karbon nanotüpler (CNT'ler), karbon nano lifler (CNF'ler) ve SiO₂ gibi malzemelerle üretilirler. Nanomalzemelerin günümüzdeki gelişmiş üretim teknolojileri sayesinde artık üretimi mümkündür. Bu nanomalzemelerin mekanik, termal ve elektriksel özellikleri değiştirilerek daha yüksek performans sağlanabilir.

CNT'ler ve CNF'ler gibi nano dolgu malzemeleri, düşük ağırlıklı kompozitler için iyi derecede mekanik, elektriksel ve termal özelliklere sahip olan yeni fırsatlar sunmaktadır. Bu dolgu malzemeleri, fiber takviyeli polimer kompozitlerin polimer matrisleri için modifiye ediciler olarak kullanılabilir. CNT teknolojisi, uzay ve uçak uygulamalarında manyetik cihazlar, özellikle mıknatıslar için etkileyici bir ileriye doğru adım atılmasını sağlayabilir.

Kompozit sandviçlerin sönümlenme davranışı ve darbe tokluğu sonuçlarından yola çıkarak yapılan araştırmalar, karbon nano lif takviyeli numunelerin geniş bir sıcaklık aralığında daha iyi darbe dayanımına ve titreşim sönümlenme özelliklerine sahip olduğunu göstermiştir.

Uçak yapısında kullanılan malzemeler arasında fiber-polimer kompozitler ve alüminyum alaşımları en popüler olanlardır. Fiber-polimer kompozitler, düşük yoğunluğu, yüksek mukavemeti, dirençli yapısı ve kolay şekillendirilebilirliği nedeniyle tercih edilirler. Bu malzemelerin, sivil havacılık, askeri hava taşıtları ve helikopterler gibi çeşitli uygulamalarda kullanımı yaygındır.

Özellikle uzay taşıtlarında, polimer matrisli kompozitler kiriş elemanları, antenler ve parabolik reflektörler dahil olmak üzere birçok yapıda kullanılmaktadır. Örneğin, Hubble uzay teleskobunun ana kirişi, hafiflik, yüksek sağlamlık ve düşük termal genleşme katsayısı amaçlandığı için karbon fiber-

epoksi kompozitten yapılmıştır. Uzay mekiği yörünge aracının ana kargo kapıları da sandviç kompozit malzemeden imal edilmiştir.

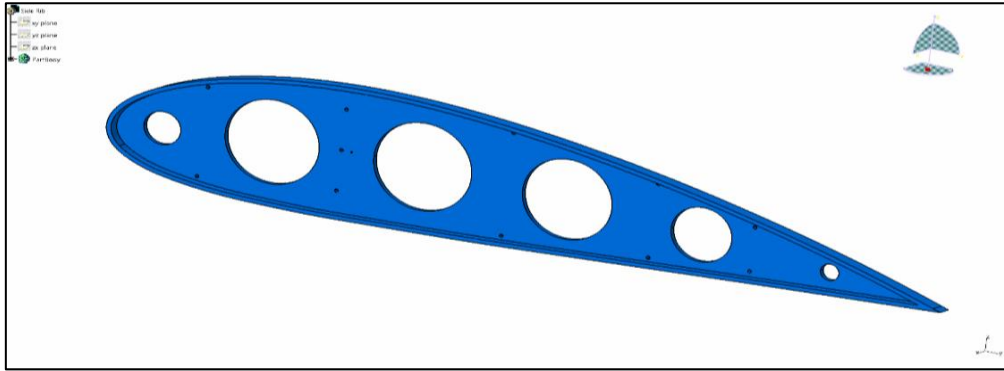
Ahşap plastik kompozitler (WPC'ler), otomotiv, inşaat, denizcilik, elektronik ve havacılık gibi pek çok uygulamada kullanılırlar. Fiberglas ve çeliklerin yerini alan yeşil WPC'lerin kullanımının olduğu ana pazara ise otomotiv bileşenleridir. Gösterge panellerinde, kapı panellerinde, sportif araçların koltuk minderlerinde, sırtlıklarda ve araç göğüs kaplamalarında trim parçası olarak kullanılırlar. Bitki lifleri ise hem termo hem de akustik yalıtım amaçları için giderek daha fazla kullanılmaktadır. Asbest liflerinin yerine araba disk frenlerinde keten liflerinin kullanılması da başka bir örnektir.

Havacılık endüstrisi, yeşil kompozitlerin kullanımı ile ilgili araştırmalarına devam ederek, daha güvenli, daha sürdürülebilir ve daha hafif uçak yapı bölümleri geliştirmek için çalışmaktadır.

MATERYAL VE METOT (MATERIALS AND METHODS)

Geometrik Özellikler

Çalışma kapsamında NACA 4412 profiline ait rib (kiriş) CATIA çizim ortamında modellenmiştir. Geometri modeli Şekil 1' de verilmiştir.



Şekil 1

NACA 4412 Rib Geometri Modeli

Sınır Koşulları ve Basınç Uygulanması

Sınır koşulları, sonlu elemanlar analizinde çok önemli kriterlerdir. Modele uygulanacak yüklemenin yeri, yükleme miktarı ve yükleme türü bu kriterler sonucunda belirlenir. Temel olarak modelin ekli kenarlarının, köşelerinin veya yüzeylerinin dönme ve yer değiştirme serbestlik dereceleri ve bunlara ek olarak sonlu elemanlar analizinde bilinen özel sınır koşulu tipleri varsa bu kriterlere göre sınıflandırılırlar. Çalışmada uygulanan sınır koşulları, kanat kirişinin altı serbestlik derecesinin tümü kısıtlanmış olarak sabit öteleme ve dönme hareketleridir.

Uygulama kapsamında 0.1MPa'lık hava basıncı veya aerodinamik yük diyebileceğimiz kuvvet hem AL 7075-T6 alüminyumdan hem de Elium reçinesi kullanılarak yapılmış cam elyaf takviyeli kompozitten ribe, ribin üst flanşı denk gelecek şekilde uygulanmıştır. Bu yolla elde edilen analiz sonuçlarından AL 7075-T6 alüminyumunun yerinin tasarlanan kompozit malzemenin alabilme potansiyeli irdelenecektir. Bu irdeme ise yükleme altında her iki malzemenin ortaya koymuş olduğu performans değerlendirilerek yürütülecektir.

Mekanik Özellikler

Analiz kapsamında Rib üretiminde sıkça tercih edilen AL 7075-T6 alüminyumu ve Elium reçinesi kullanılarak üretilen cam elyaf takviyeli kompozit kullanılarak iki ayrı malzemeden iki ayrı rib

tasarlanmıştır. AL 7075 T6 yüksek mukavemet özelliklerine ve iyi korozyon direncine sahip alüminyum alaşımıdır. Hafifliği ile de ön plana çıkmaktadır. Özellikle havacılık, uzay endüstrisi ve yüksek performanslı mühendislik uygulamalarında sıkça tercih edilir. Elium reçinesi kullanılarak üretilen cam elyaf takviyeli kompozit malzeme ise geri dönüştürülebilirlik vadeden yeşil kompozit olarak nitelendirilebilecek bir malzemedir. Mekanik özellikler bakımından AL 7075-T6 alüminyumuna yakın performansa sahip bu malzeme geri dönüştürülebilir ve daha hafif olması gibi özellikleri ile ön plana çıkmaktadır. AL 7075-T6 alüminyumunu ve Elium/E-Camı kompozitin mekanik özellikleri Çizelge 1 de verilmiştir. Kompozit sistemin özellikleri, kompozit malzemenin makro-mekanikğine göre E camı ve Elium özellikleri kullanılarak hesap edilmiştir.

Tablo 1

DM ve Bu Ürüne Farklı Sıcaklık ve Miktarda NaOH Uygulanarak Hazırlanan Ürünlerin Yüzey Alanları ve Gözenek Hacimleri

Mekanik Özellikler	AL 7075 T6	Elium/E-Camı ($V_f=0,5$)
Yoğunluk (kg/m^3)	2804	1895
Nihai Çekme Dayanımı (MPa)	572	557
Akma Çekme Dayanımı (MPa)	503	520
Elastiklik Modülü (GPa)	71.7	30
Poisson Oranı	0,33	0,30

Mesh Kalitesinin Önemi

Mesh kalitesi modelin yapılan analize veya model boyutuna (2D, 3D) göre yüzeyin veya hacmin ne kadar iyi kalitede sanal ortamda gösterildiğinin bir metriğidir. Mesh kalitesi iyi seviyede olduğunda modelin görünümü, yapılacak olan analizin model üzerinde uygulanabilirliği artar. Bu artışın etkisi ile yapılan analizde daha doğru ve gerçekçi sonuçlar elde edilir. HyperMesh, gelişmiş özellikleri ile birlikte modelleri hızlı ve son derece yüksek kalitede meshleme imkânı sunar. Modele mesh üretirken, yakınsamanın yüksek olabilmesi ve analizin doğru sonuç verebilmesi için meshlemenin düzgün dağılımı, eğrisel yüzeylerde eleman seçimine dikkat edilmesi, yapının durumuna göre simetriden yararlanılması daha doğru olacaktır. Bu özellikler mesh işleminde elde edilen elemanların kalite değerleri ve element sayıları olup Şekil 2’de görülmektedir.

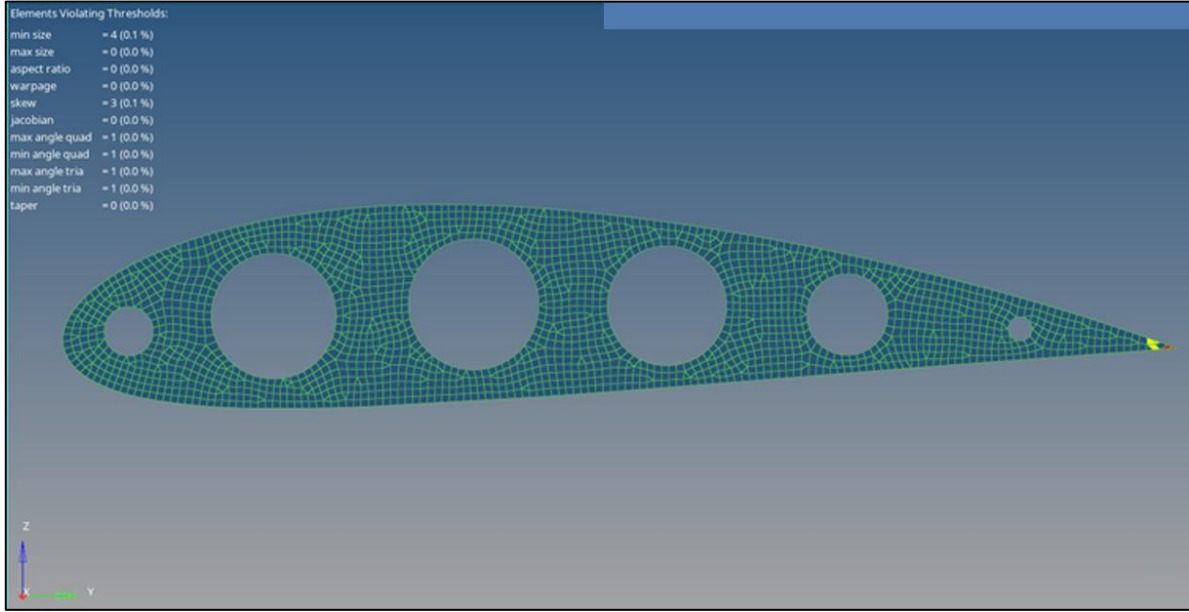
On	Checks	Color	Calculation Method	Fail
<input checked="" type="checkbox"/>	Minimum size	Yellow	Minimal normalized height	2.000
<input checked="" type="checkbox"/>	Maximum size	Purple		20.000
<input checked="" type="checkbox"/>	Aspect ratio	Pink	HyperMesh	5.000
<input checked="" type="checkbox"/>	Warpage	Green	HyperMesh	15.000
<input checked="" type="checkbox"/>	Maximum interior angle quad	Brown		140.000
<input checked="" type="checkbox"/>	Minimum interior angle quad	Light Green		40.000
<input checked="" type="checkbox"/>	Maximum interior angle tria	Red		120.000
<input checked="" type="checkbox"/>	Minimum interior angle tria	Blue		30.000
<input checked="" type="checkbox"/>	Skew	Purple	HyperMesh	40.000
<input checked="" type="checkbox"/>	Jacobian	Yellow	At integration points	0.600
<input type="checkbox"/>	Chordal deviation	Blue		1.000
<input checked="" type="checkbox"/>	Taper	Green	HyperMesh	0.600
<input checked="" type="checkbox"/>	Time step	Yellow		0.010
<input checked="" type="checkbox"/>	% of trias			15.000

Legend colors: ■ QI view ■ Ideal ■ Good ■ Warn ■ Fail ■ Worst

Şekil 2

Eleman Kalitesi

Şekil 3'te ise HyperMesh paket programı üzerinde elde edilen iyi derece mesh kalitesine sahip rib modeli gösterilmektedir.



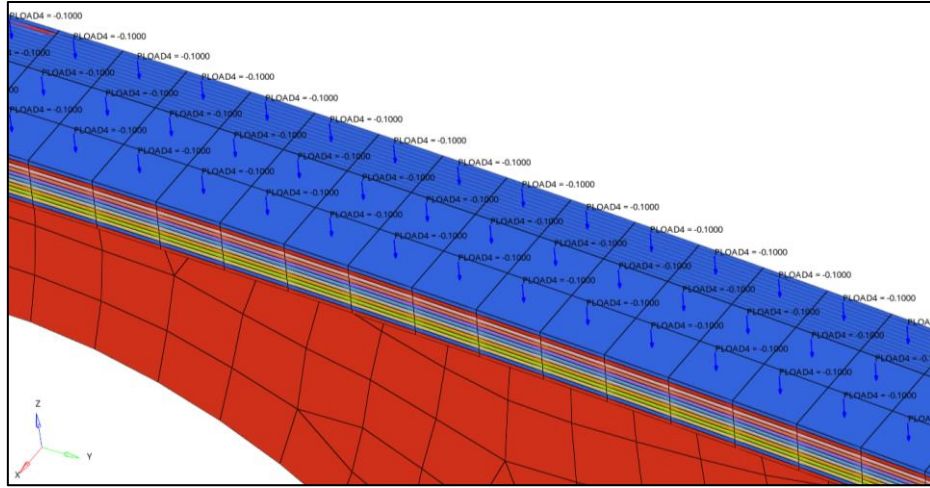
Şekil 3
Mesh Kalitesi

Elium/Cam Elyaf Kompozit Malzeme Serimi

Tablo 2, kompozit rib malzemesi için serim bilgilerini içermektedir.

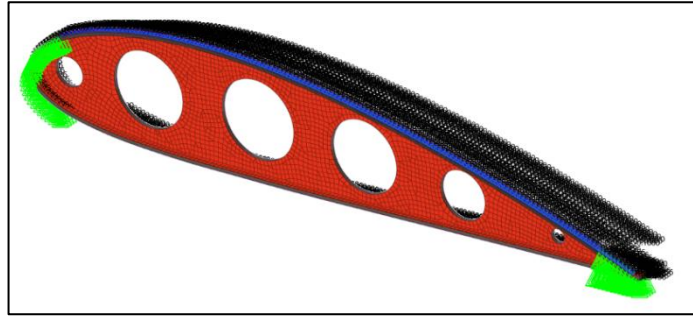
Tablo 2
Kompozit Rib Serimi

Serim Numarası	Malzeme	Kalınlık [mm]	Yönlenme [°]
Serim 1	Elium/Cam Elyaf	0,21	45
Serim 2	Elium/Cam Elyaf	0,21	-45
Serim 3	Elium/Cam Elyaf	0,21	45
Serim 4	Elium/Cam Elyaf	0,21	-45
Serim 5	Elium/Cam Elyaf	0,21	45
Serim 6	Elium/Cam Elyaf	0,21	-45
Serim 7	Elium/Cam Elyaf	0,21	-45
Serim 8	Elium/Cam Elyaf	0,21	45
Serim 9	Elium/Cam Elyaf	0,21	-45
Serim 10	Elium/Cam Elyaf	0,21	45
Serim 11	Elium/Cam Elyaf	0,21	-45
Serim 12	Elium/Cam Elyaf	0,21	45



Şekil 4
Üst Flanş Görüntüsü

Şekil 4, kompozit ribin malzeme serimini ayrıntılı olarak göstermektedir.

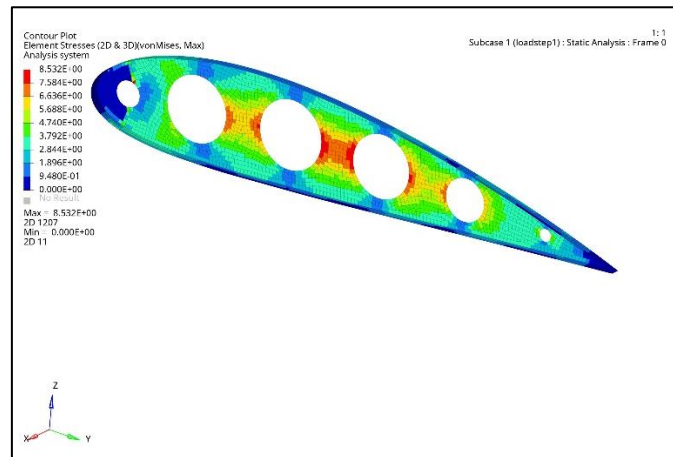


Şekil 5
Çözüm Öncesi Rib Görüntüsü

Şekil 5, ağ yapısına dönüştürülmüş (mesh yapılandırılmış) ve yük uygulanmış ribe aittir.

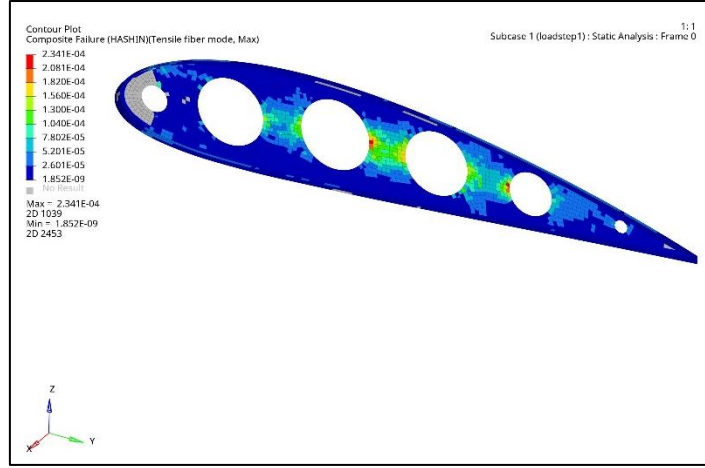
BULGULAR ve ANALİZ (RESULTS AND ANALYSIS)

Eş Değer Gerilme



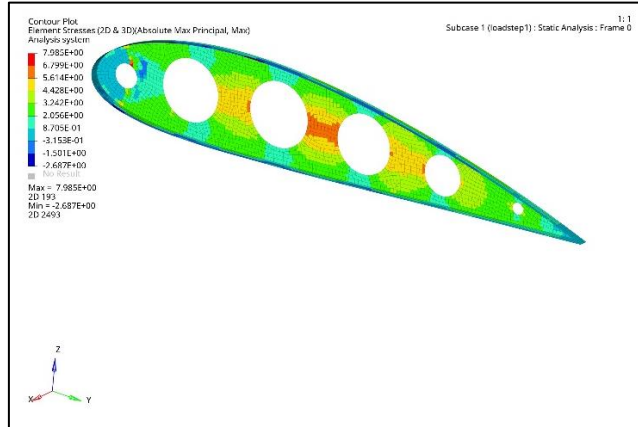
Şekil 6
AL 7075-T6 Eş Değer Gerilme

Eş değer gerilme değerlerine bakıldığında AL 7075-T6 alüminyumunu 8.53 MPa (Şekil 6), Elyum/cam elyaf kompozit ise 23,4E-03 MPa (Şekil 7) değerlerine sahiptir. Eş değer gerilme yapının belirli yüklere maruz kaldığında gerilme seviyelerinin güvenli sınırlar içinde kalıp kalmadığının değerlendirilmesin de yardımcı olmaktadır. Eş değer gerilme malzeme kullanımını optimize ederek ağırlığın azalmasını ve maliyetlerin düşürülmesini sağlamaktadır.



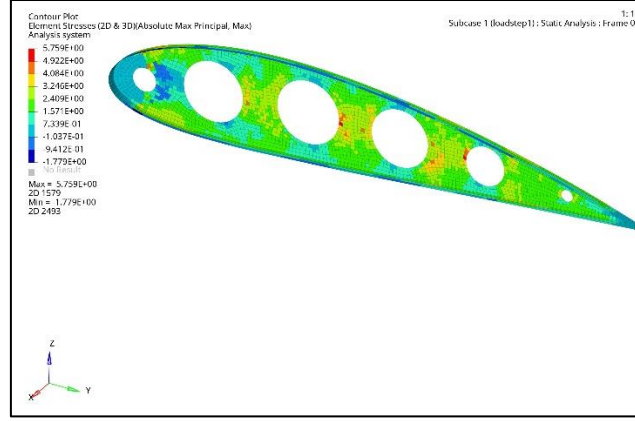
Şekil 7
Cam Elyaf Elyum/ Eş Değer Gerilme

Maksimum Asal Gerilme



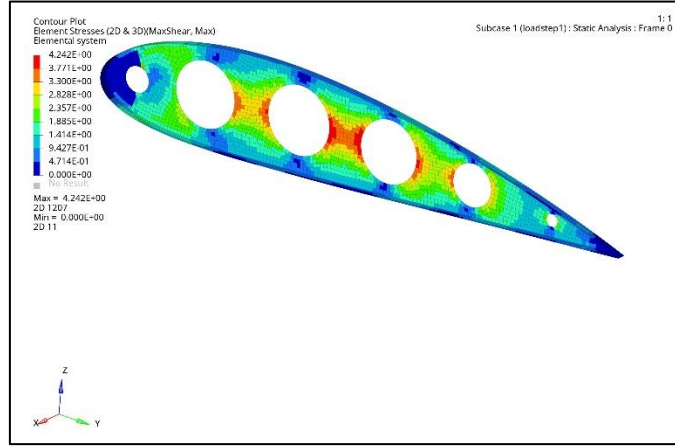
Şekil 8
AL 7075-T6 Maksimum Asal Gerilme Dağılımı

Maksimum asal gerilme değerlerine bakıldığında AL 7075-T6 alüminyumunu 7,985 MPa (Şekil 8), Elyum/cam elyaf kompozit ise 5,759 MPa (Şekil 9) değerlerine sahiptir. Maksimum asal gerilme değeri de malzeme dayanımı ve kullanımındaki optimizasyon açısından önemlidir.



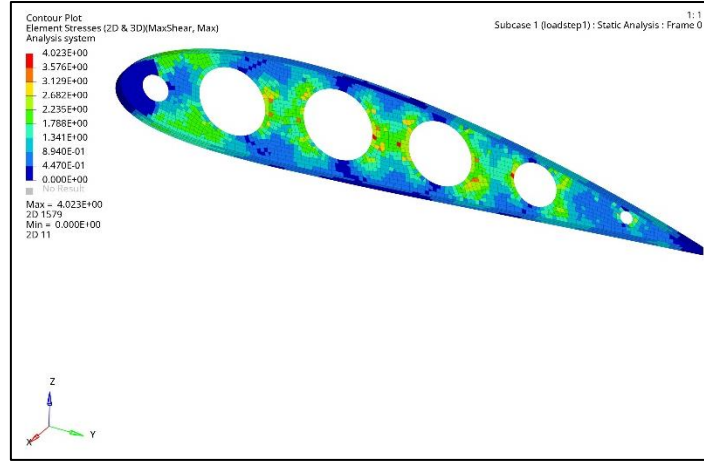
Şekil 9
Cam Elyaf/Elium Maksimum Asal Gerilme Dağılımı

Maksimum Kayma Gerilmesi



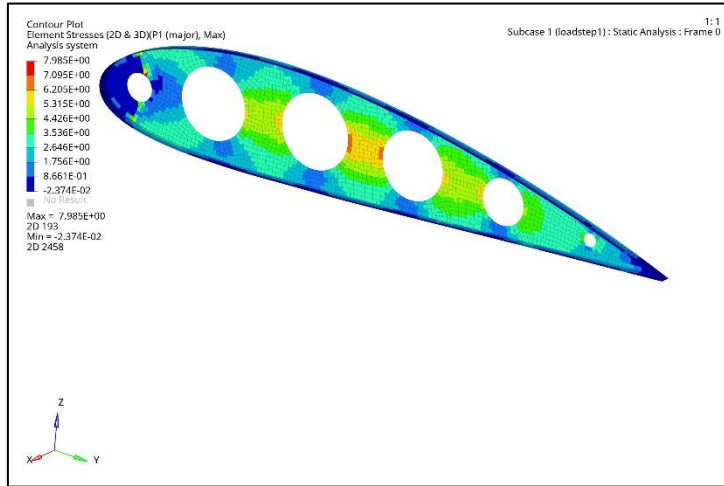
Şekil 10
AL 7075-T6 Maksimum Kayma Gerilmesi

Maksimum kayma gerilmesi değerlerine bakıldığında AL 7075-T6 alüminyum 4,24 MPa (Şekil 10), Elium/cam elyaf kompozit ise 4,02 MPa (Şekil 11) değerlerine sahiptir. Maksimum kayma gerilmesi, bir malzemenin içindeki kesme kuvvetlerinin en yüksek olduğu noktada meydana gelen gerilmedir. Diğer stres parametrelerinde olduğu gibi maksimum kayma gerilmesi de dayanım ve yorulmanın değerlendirilmesi, kesme deformasyonun belirlenmesini sağlamaktadır. Bu belirleme ışığında istenilen özelliklere sahip malzeme seçimi yapılmaktadır.



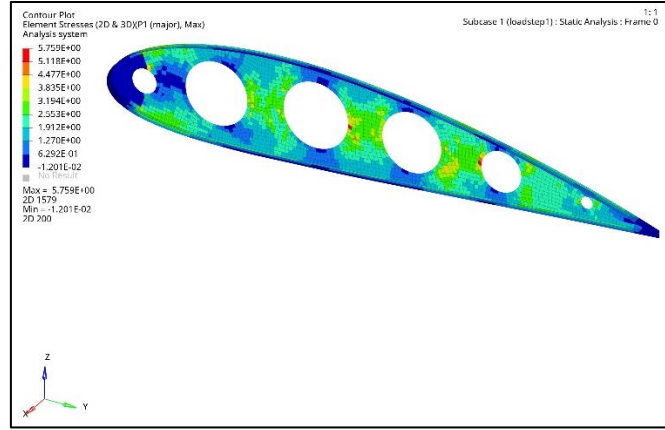
Şekil 11
Elyum/cam Elyaf Maksimum Kayma Gerilmesi

Eksenel Gerilme



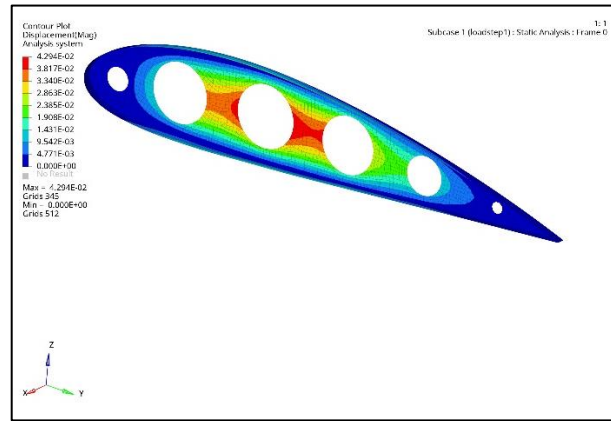
Şekil 12
AL 7075-T6 Maksimum Eksenel Gerilme

Şekil 12 ve Şekil 13'ten en büyük eksenel gerilme değerlerinin sırasıyla AL 7075-T6 rib için 7,99 MPa, Elyum/cam elyaf kompozit için ise 5,76 MPa değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Eksenel gerilme, bir malzemenin eksenel yüklemelere maruz kaldığında ortaya çıkan gerilmedir. Taşıma kapasitesinin değerlendirilmesi, şekil değiştirme, malzeme mukavemetinin belirlenmesinde eksenel gerilme değerleri dikkate alınmaktadır.



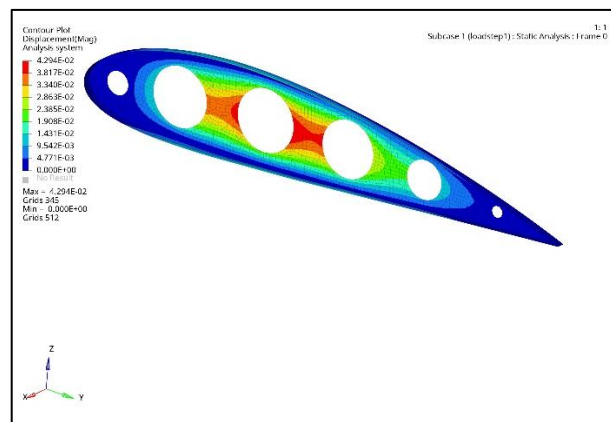
Şekil 13
Elium/cam Elyaf Maksimum Eksenel Gerilme

Toplam Deformasyon



Şekil 14
AL 7075-T6 Rib Toplam Deformasyon

Şekil 14 ve Şekil 15 sırasıyla AL 7075-T6 rib ve Elium/cam elyaf riblerin toplam deformasyonunu göstermektedir.



Şekil 15
Elium/cam Elyaf Toplam Deformasyon

Toplam deformasyon değerlerine bakıldığında AL 7075-T6 ribin 0,043 mm, Elium/cam elyaf

kompozit ise 0,096 mm değerlerine sahiptir. Toplam deformasyon, dış yüklerin veya kuvvetlerin etkisi altında bir yapının veya malzemenin şeklindeki veya konumundaki genel değişikliği ifade eder. Toplam deformasyon yapısal bütünlük, tasarım optimizasyonu, hasar tahmini ve önleme açısından önemlidir. Toplam deformasyon malzemenin yük altında yapısal bütünlüğünü koruması ve herhangi bir hatanın oluşacağı seviyenin belirlenmesinde önemli bir unsurdur. Uygun malzeme seçilmemesi sonucu oluşan aşırı deformasyon, yapıların bir arada bulunduğu durumlarda yetersiz boşluklara yol açabilir ve işletme sorunlarına, sürtünmeye hatta arızalara varan sonuçlara sebep olabilir.

Metal riblerin yerine havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan grafit/epoksi riblerinin gerilme analizi açısından kullanılabileceği literatürde verilmiştir [10]. Bu çalışmamız, bertarafı zor ve maliyetli olan termoset kompozit sistemlerinin yerine termoplastik kompozit sistemi olan E-camı/Elium sisteminin metal rib yerine rahatlıkla kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

TARTIŞMA VE SONUÇLAR (DISCUSSION AND CONCLUSIONS)

Genel olarak kompozit malzemeler sahip oldukları düşük ağırlıklara rağmen yüksek mukavemete sahip olmaları, kimyasal ve mekanik etkilere karşı göstermiş oldukları direnç, tasarım aşamasında kullanıcıya sağlamış olduğu esneklik, gelenekselleşmiş malzemeler ile aynı mukavemete daha az malzeme kullanılarak ulaşılması gibi özellikler bakımından gelenekselleşmiş malzemeler ile karşılaştırıldığında geride kalmamaktadır. Bu çalışmada ele alınan Al 7075 yerine E-camı/Elium sisteminin kullanılması halinde %32 oranında ağırlıktan kazanç sağlanacağı gösterilmiştir.

Analiz sonuçları karşılaştırıldığında ise Elium reçinesi ile yapılmış cam elyaf takviyeli kompozit malzeme genel olarak Al 7075-T6 alüminyumuna yakın performans göstermiştir. Bununla birlikte, kompozit malzemelerin bazı dezavantajları da vardır. Üretim maliyetleri daha yüksek olabilir ve bazı uygulamalar için ise daha karmaşık üretim yöntemleri gerektirebilirler. Özellikle kompozit malzemenin üretilen yeni nesil uçak gövdelerinin yer operasyonlarında “no touch policy” denilen sıfır temas gerekliliğinin getirdiği zorluklar, bazı uçak modellerinde oluşan boya dökülmesi sorunları gibi etmenler ise bu malzemelere karşı üreticileri daha temkinli olmaya sevk etmektedir. Fakat geleneksel malzemelerden geride kalmayan mekanik özellikleri ve sağlamış oldukları hafiflik sebebiyle gelecekte daha da geliştirilip birçok alanda kullanımı öngörülmektedir.

Etik Beyan (Ethical Statement)

Bu çalışma, Prof. Dr. Mesut UYANER 'in lisans öğrencileriyle beraber Necmettin Erbakan Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi Uçak Mühendisliği bölümünde 2022-2023 Bahar yarıyılında başlayıp Ekim 2023'e kadar devam eden süre zarfında gerçekleştirilmiştir.

Etik Kurul Onayı (Ethics Committee Approval)

Bu çalışmada etik kurul onayı gerektiren insan veya hayvan denekleri kullanılmamıştır. Araştırma, kamuya açık veri setleri, literatür taramaları veya teorik analizler üzerinden yürütülmüştür. Etik kurallar gereği, araştırma sürecinin her aşamasında akademik dürüstlük ve bilimsel etik kurallara tam uyum sağlanmıştır. Bu nedenle, etik kurul onayı gerekmemiştir.

Finansal destek (Funding)

Çalışma herhangi bir kurum/kuruluş tarafından finanse edilmemiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarların bu çalışma için beyan ettikleri herhangi bir çıkar çatışması yoktur. (The author has

no conflicts of interest to disclose for this study.)

Yazar Katkıları (Author Credits)

Araştırma Tasarımı (CRediT 1) Mesut Uyaner (%100)

Veri Toplama (CRediT 2) Mesut Uyaner (%30) – Kübra Karadal (%30) – Tolga Merdan (%30) – Nagehan Nur Acar (%10)

Araştırma - Veri Analizi - Doğrulama (CRediT 3-4-6-11) Kübra Karadal (%35) – Tolga Merdan (%35) – Nagehan Nur Acar (%30)

Makalenin Yazımı (CRediT 12-13) Mesut Uyaner (%30) – Kübra Karadal (%35) – Tolga Merdan (%35)

Metnin Tashihi ve Geliştirilmesi (CRediT 14) Mesut Uyaner (%100)

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SDG)

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları: 9 Sanayi, Yenilikçi ve Altyapı

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları: 12 Sorumlu Üretim ve Tüketim

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları: 13 İklim Eylemi

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] H. Awais, Y. Nawab, A. Amjad, A. Anjang, H. Md Akil, M.S. Zainol Abidin, Environmental benign natural fibre reinforced thermoplastic composites: A review, *Composites Part C: Open Access*. 4 (2021) 100082. doi:10.1016/J.JCOMC.2020.100082.
- [2] A.P. da Costa, E.C. Botelho, M.L. Costa, N.E. Narita, J.R. Tarpani, A review of welding technologies for thermoplastic composites in aerospace applications, *Journal of Aerospace Technology and Management*. 4 (2012) 255-266. doi:10.5028/jatm.2012.040303912.
- [3] D. Mathijsen, Leading the way in thermoplastic composites, *Reinforced Plastics*. 60 (2016) 405-407. doi:10.1016/j.repl.2015.08.067.
- [4] T.Subash, S.N. Pillai, Bast fibers reinforced green composites for aircraft indoor structures applications: Review, *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*. 7 (2015) 305-307.
- [5] C. Scarponi, C. Santulli, F. Sarasini, J. Tirillò, Green composites for aircraft interior panels, *International Journal of Sustainable Aviation*. 3 (2017) 252. doi:10.1504/IJSA.2017.086848.
- [6] S. Gopi, P. Balakrishnan, M.S. Sreekala, A. Pius, S. Thomas, Green materials for aerospace industries, içinde: *Biocomposites for High-Performance Applications*, Elsevier, 2017: ss. 307-318. doi:10.1016/B978-0-08-100793-8.00011-9.
- [7] H.S.S. Shekar, M. Ramachandra, Green composites: A review, *Materials Today: Proceedings*. 5 (2018) 2518-2526. doi:10.1016/j.matpr.2017.11.034.
- [8] C. Soutis, X. Yi, J. Bachmann, How green composite materials could benefit aircraft construction, *Science China Technological Sciences*. 62 (2019) 1478-1480. doi:10.1007/s11431-018-9489-1.
- [9] B. Ateş, S. Bayraktar, M. Arıcı, Z. Akçay, B. Durak, M. Uyaner, Termoplastik kompozitten yapılmış ve kapı boşluğu içeren uçak gövde parçasının sanal testi, *Aerospace Research Letters (ASREL) Dergisi*. 2 (2023) 52-62. doi:10.56753/ASREL.2023.2.1.
- [10] P. Dharmendra, K.J. Chaithanya, A. Sameera, K. Kavathiya, K.M. Monika, Design and analysis of an aircraft wing rib for different configurations, *International Research Journal of Engineering and Technology*. 7 (2020). www.irjet.net.
- [11] W.D.C. Jr, D.G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 2018.
- [12] R.F. Gibson, *Principles of Composite Material Mechanics*, CRC Press. 2016. doi:10.1201/b19626.
- [13] O. Faruk, M. Sain, *Biofiber Reinforcements in Composite Materials*, Woodhead Pub Ltd, Elsevier Ltd, Cambridge, 2015.
- [14] P. Khalili, M. Skrifvars, A. Ertürk, Fabrication, mechanical testing and structural simulation of regenerated cellulose fabric Elium® thermoplastic composite system, *Polymers*. 13 (2021) 2969. doi:10.3390/polym13172969.
- [15] A. Baysal, P. Yayla, H.S. Türkmen, A review on engineering biocomposites and natural fiber-reinforced materials, *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*. 7 (2022) 231-249. doi:10.47481/jscmt.1136018.
- [16] B.C. Kandpal, R. Chaurasia, V. Khurana, Recent advances in green composites – a review, *International Journal For Technological Research In Engineering (IJTRE)*. 2 (2015) 742-747.
- [17] T. Dağ, N. Yıldırım, G. Şentürk, M. Durmazoğlu, S. Yıldırım, M. Uyaner, Virtual investigation on the response of Glare to low velocity impact, içinde: *2023 10th International Conference on Recent Advances in Air and Space Technologies (RAST), IEEE, İstanbul, 2023, 1-5*. doi:10.1109/RAST57548.2023.10198016.
- [18] M. Uyaner, A. Yar, Nano elyaf takviyeli nanokompozit üretimi ve karakterizasyonu, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 1 (2019) 10-19.