5. Nesil Savaş Uçakları için Radar Soğurucu BN Kaplı C Fiber Malzemelerin Üretilmesi ve Karakterizasyonu

Kaan Örs^{1,2}, Cennet Yıldırım³, Muhammet Nasuh Arık³, Özden Kısacık³, Zeliha Bengisu Yakışık³, Uğur Nakaş², Korhan Şahin^{2,4}, Erdal Çelik^{2,4}

¹Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği, Ankara

²Türk Havacılık ve Uzay Sanayi Şirketi, Ar-Ge ve Teknoloji Direktörlüğü, Ankara

³TENMAK Bor Araştırma Enstitüsü, Ankara

⁴İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği, İstanbul

ÖZET

5. nesil savaş uçakları yüksek manevra kabiliyeti, gelişmiş aviyonik sistemler, hayalet teknolojisi gibi özelliklere sahip olmalıdır. Bu özellikler içerisinde hayalet teknolojisi, savaş aracının radar kesit alanını düşürmeyi amaçlamaktadır. Radar kesit alanı şekillendirme, aktif iptal, radar soğurucu malzemeler gibi yöntemlerle düşürülmektedir. Bu amaç kapsamında, 5. nesil savaş araçlarına uygun hafif, yüksek mukavemetli ve yüksek elektrik iletkenliğine sahip karbon fiber malzemesine bor nitrür (BN) kaplaması yaparak radar soğurucu özellik kazandırılması hedeflenmektedir. Bu çalışmada, yenilikçi yaklaşımlarla karbon fiberler üzerine BN'nin kaplanması ıslak kaplama tekniği ile sağlanmıştır. Islak kaplama sürecini optimize etmek için yapısal ve morfolojik analizleri kapsayan bütünsel bir yaklaşım benimsenmiştir. BN kaplamalarında kristalin fazların tanımlanması için XRD analizi yapılmıştır. Kaplamaların yüzey kimyasal analizi XPS sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. BN kaplamaların yüzey morfolojisi SEM kullanılarak incelenmiştir. Yapılan karakterizasyonlar sonucunda bor nitrür malzemesinin hekzagonal kristal yapısına sahip olduğu, kimyasal kompozisyonunun yüksek oranda B-N elementlerinden oluşup kaplama morfolojisinin sürekli ve oluklu karbon fiber yapısını doldurduğu tespit edilmiştir.

GİRİŞ

"5. nesil savaş uçakları" terimi genellikle ileri teknolojiye sahip, son nesil savaş uçaklarını ifade etmek için kullanılmaktadır. Bu uçakların örnekleri olarak Amerikan F-22 Raptor ve F-35 Lightning II, Rus Su-57 ve Çin J-20 ve Türk KAAN gibi modeller bulunmaktadır. 5. nesil savaş uçakları, gelişmiş ve ileri teknolojiye sahip savaş uçakları olarak daha önceki nesil uçaklardan yüksek manevra kabiliyeti, gelişmiş aviyonik ve iletişim sistemleri özellikle de gelişmiş sensörler ve pilotun çevresel farkındalığını en üst düzeye çıkarmak için sensör füzyonu yetenekleriyle ayrılmaktadır. Bunların yanında 5. nesil savaş uçaklarının en önemli özelliği düşük görünürlüktür. Düşük görünürlük, radar kesiti (*RCS*) ve termal imzanın azaltılması ile sağlanarak bu uçakların düşman hava savunma sistemlerine yakalanmadan operasyonel faaliyet göstermelerini amaçlamaktadır. 5. nesil savaş uçakları genellikle yüksek maliyetli ve karmaşık projeler olsalar da modern savaş gereksinimlerini karşılamak için önemli bir rol oynamaktadırlar [1-5].

Hayalet teknolojisi, modern hava araçlarının düşman radarları tarafından tespit edilmesini zorlaştırmak için kullanılan bir dizi teknik içermektedir. Bu tekniklerin başında şekillendirme, aktif ve pasif engelleme ve radar soğurucu malzemeler gelmektedir. Öncelikle hava aracının

gövde ve kanatları, radar dalgalarını yansıtarak minimal bir radar imzası oluşturmak için özel olarak şekillendirilmektedir. Şekillendirme radar düşük görünürlüğüne katkı sunarken aerodinamik performansı sınırlayabilmektedir, bu nedenle farklı engelleme mekanizmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Aktif engelleme, düşman radar sinyallerini manipüle ederek veya karıştırarak hava aracının radar izini gizlemeyi, pasif engelleme ise hava aracına eklenen malzemeler veya sistemlerle radar sinyallerini absorbe etme yöntemlerini içermektedir. Yüksek kayıplı dielektrik, manyetik ve iletken malzemelerden oluşan radar soğurucu bu malzemeler gelen radar dalgalarını emerek yansıtma ve saçılma etkisini azaltmaktadır. Radar soğurucu malzemelerin, hafif, ince, yüksek mukavemetli ve korozyona karşı dirence sahip olması beklenmektedir. Bu tekniklerin birlikte kullanılması hava araçlarının düşman radarlar tarafından tespit edilme olasılığını düşük seviyeye çekerek operasyonel üstünlük sağlamaktadır [6-8].

Radar kayıp mekanizması, elektromanyetik dalgaların bir nesneyle etkileşime girdiğinde, o nesnenin bu dalgaları yansıtması, saçması veya absorbe etmesi sonucunda radarın alqılayabileceği sinyal gücünün azalmasına neden olarak radarın hedefi algılamasını ve takip etmesini zorlaştırmaktadır. Radar kayıp mekanizması üç kategoride incelenmektedir. Öncelikle elektromanyetik dalgalar, bir nesneyle temas ettiğinde yansıtılabilir. Yansıma, dalgaların radarın kaynağına geri dönmesine neden olmaktadır. Yansıtılan sinyal, nesnenin yüzey özelliklerine (örneğin, düz, pürüzlü, parlak, mat) ve elektromanyetik dalga frekansına bağlı olarak değişmektedir. İkinci olarak elektromanyetik dalgalar, bir nesneyle temas ettiğinde saçılabilmektedir. Saçılma, dalgaların farklı yönlere dağılmasına ve radar tarafından algılanmasının zorlaşmasına neden olmaktadır. Saçılma genellikle nesnenin boyutuna ve sekline bağlıdır. Örneğin, küçük bir nesne genellikle dalgaları daha fazla saçar ve radarın tespitini zorlastırmaktadır. RCS azaltmak icin en önemli mekanizma ise soğurmadır. Elektromanyetik dalgalar, bir nesneyle temas ettiğinde dalgaların enerjisi nesne tarafından absorbe edilerek ısı enerjisine dönüştürülebilmektedir. Soğurma, özellikle radar dalgalarının malzemeye nüfuz etme eğiliminde olduğu düşük frekanslı radarlarda önemli bir kayıp mekanizmasıdır. [9-11].

Radar kayıp mekanizması genellikle dielektrik ve manyetik kayıp mekanizmaları olarak ikiye ayrılmaktadır. Dielektrik kayıp, gelen elektromanyetik dalganın elektriksel alanını hedef alırken, manyetik kayıp gelen elektromanyetik dalganın manyetik alanını hedef almaktadır. İdeal bir radar soğurucu malzemede manyetik ve elektrik alanı tamamen sönümleyecek bir yapı olması istenmektedir. Bu yapılar malzemenin dielektrik/manyetik sinerjiyle meydana gelmektedir. Makro yapıda dielektrik ve manyetik malzemelerin kayıp yapısı dielektrik ve manyetik sabitlerin imajiner kısımları ile ölçülmektedir. Dielektrik sabit (ϵ) ve manyetik sabit (μ), sırasıyla, ϵ_r ve μ_r ile ifade edilir ve şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$\varepsilon_r = \varepsilon' - j\varepsilon''$$

 $\mu_r = \mu' - j\mu''$

Kayıp tanjantları, malzemenin dielektrik sabitinin veya manyetik sabitinin imajiner kısmının reel kısmına oranı olarak belirlenmektedir.

$$tan\delta_e = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$$
$$tan\delta_e = \frac{\mu''}{\mu'}$$

Burada ε' ve ε'' dielektrik sabitin sırasıyla reel ve imajiner bileşenleri, μ' ve μ'' ise manyetik sabitin reel ve imajiner bileşenleridir. Dielektrik malzemelerde kayıp, yüklerin, atomların, iyonların ve diğer faktörlerin etkileşimi sonucu meydana gelmektedir. Bu kayıp, arayüzler, kusurlar, kristal yapısı, kirlilik, parçacık yapısı, tane boyutu, gözeneklilik, mikro çatlaklar ve kristal yapı gibi faktörlerden etkilenir. Soğurma, yüklerin gelen elektromanyetik dalganın frekansına yetişememesi sonucu dielektrik gevşemesinden kaynaklanmaktadır. Bu gevşeme kayıp tanjantı ile ölçülmektedir. Malzeme boyutları küçültülerek yüzey alanı/hacim oranı artırılarak çoklu iç yansımaların gerçekleştirilmesiyle radar soğurması artırılabilmektedir. Bu yöntem, radar soğurma mekanizmasını güçlendirmektedir [12-15].

Manyetik malzemelerde kayıp mekanizması, sınır tanelerinin hareketi, manyetik rezonans ve eddy kayıplarından meydana gelmektedir. Mikrodalga soğurma frekansında baskın olan soğurma karakteristiği, manyetik rezonans ve eddy kayıplarından kaynaklanmaktadır. Manyetik rezonans, gelen elektromanyetik dalganın frekansıyla malzemenin eşlenmemiş spin kuantları arasında rezonans oluşturması sonucu meydana gelmektedir. Bu rezonans sırasında, enerji aktarımı spin yönlerinin değişmesiyle gerçekleşir ve bu yönler değişirken oluşan manyetik alan, elektromanyetik dalganın ters fazda emilerek soğurulmasını sağlamaktadır. Eddy kayıpları, Faraday yasasına dayanmaktadır. Gelen elektromanyetik dalganın değişken manyetik alanına karşı malzeme içinde oluşturulan elektrik akımının ters fazda manyetik alan üretmesiyle oluşmaktadır. Bu mikro akımlar, radar dalgasını emerek soğurma sağlamaktadır. Ancak, mikro akımların yoğunluğu artarsa, yüksek iletkenlik nedeniyle empedans eşleşmesi oluşmayabilir ve elektromanyetik dalganın malzemeye girmesi engellenerek yansıma gerçekleşmektedir. Örnek manyetik radar soğurucu malzemeler arasında ferritler, manyetik metal tozlar, nano-manyetik soğurucu malzemeler, fiber manyetik soğurucu malzemeler ve karbon demir tozu soğurucu malzemeler yer almaktadır. Ferritler, yapısı bakımından genellikle garnet, spinel ve hekzaferrit olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Bu malzemeler arasında genellikle hekzaferritler, yüksek manyetik özellikleri nedeniyle radar soğurucu malzemelerde tercih edilebilmektedirler [16-18].

Radar soğurucu özellik bakımından malzeme morfolojisi veya yapısal dizayn önemli bir rol oynamaktadır. Bu yapılar, denizkestanesi-benzeri (urchin-like), çekirdek-kabuk (core-shell), hiverarsik, nanoküreler, nanoteller, nanotüpler, nanofiberler ve nanopullar gibi cesitli morfolojik özelliklere sahip olabilmektedirler. Radar soğurucu malzemelerde yapısal tasarım, 3 boyutlu malzemelerden tek boyutlu malzemelere gectikten sonra artma eğilimindedir. Bunun temel nedeni, yüzey alanı/hacim oranının artmasıdır. Artan yüzey alanı/hacim sayesinde arayüz qibi özelliklerden kaynaklanan polarizasvonu, coklu sacılma radar soğurması gerçekleşmektedir. Malzeme bazında genel soğurma teorisi yukarıdaki durumlarda gerçekleşirken, şekil bazlı soğurma sağlayan radar soğurucu malzemeler de yer almaktadır. Bu malzemelerin temel çalışma prensibi, şekil özelliklerini kullanarak karşı fazda yansıtarak soğurmayı sağlamaktır. Bu tür malzemeler arasında ceyrek dalga boyu soğurucular en önemli örnektir. Çeyrek dalga boyu soğurucular, gelen dalganın boyunun dörtte birinde bir kalınlığa sahip olarak faz değişimi ile soğurmayı sağlamaktadırlar. Bu yapısal tasarım ve morfoloji çeşitliliği, radar soğurucu malzemelerin etkinliğini artırarak elektromanyetik dalgaları daha etkin bir şekilde soğurmasına olanak tanımaktadır. Özellikle şekil bazlı soğurma stratejileri, malzemenin fiziksel özelliklerini kullanarak radar soğuruculuğunu optimize etmeyi sağlamaktadır [19-22].

Radar soğurucu özellikleri geliştirmek için malzemeler önemli bir yeri tutmaktadır. Bu durumda, karbon fiberlerin özelliklerini geliştirmek hava araçlarında daha etkili bir şekilde kullanılmasını sağlamak için önemlidir. Hekzagonal BN kaplamalarının, karbon fiber malzemenin performansını artırıcı özelliklere sahip olması, özellikle radar soğurucu malzeme olarak

kullanıldığında avantaj sağlayabilmektedir. BN kaplamaların karbon fiber üzerine uygulanmasıyla, hem empedans eşleşmesi sağlanarak elektriksel özelliklerin iyileştirilmesi hem de korozyon direncinin artırılması amaçlanmaktadır. Bu kaplamaların yüksek termal iletkenlik özelliği de karbon fiber malzemenin sıcaklık kontrolü açısından daha verimli hale gelmesine katkıda bulunabilmektedir. Karbon fiberlerin üzerine hekzagonal BN kaplamalarının uygulanması, karbon fiberlerin elektromanyetik dalgaları daha absorbe etmesini sağlayarak radar kesit alanını azaltabilmektedir. Ayrıca, korozyon direnci sağlanarak malzemenin ömrü uzatılabilmekte ve çeşitli hava koşullarında daha dayanıklı olabilmektedir. Bu tür kompozit malzemelerin geliştirilmesi, modern savaş uçaklarının hayalet teknolojisini daha etkili bir şekilde kullanmasına ve düşman radarları tarafından tespit edilme riskini azaltmasına olanak tanımaktadır. Bu da hava araçlarının operasyonel güvenliğini ve etkinliğini artırmaktadır [23, 24].

BN kaplamaların çağdaş araştırmaları, sentez, karakterizasyon ve radar soğurma uygulamalar için kullanım alanlarında önemli ilerlemeleri göstermektedir. Malzeme tasarımı, üretim metodolojileri ve performans artırma gibi devam eden çabalar, alana ivme kazandırmaya ve özellikle havacılık uygulamalarında radar soğurma ve düşük görünürlük teknolojileri için yeni olanaklar açmaya hazırdır. Bu çalışmada, karbon fiberler üzerine BN'nin kaplanması yenilikçi ıslak kaplama tekniği ile sağlanmıştır. Islak kaplama sürecini optimize etmek için yapısal ve morfolojik analizleri kapsayan bütünsel bir yaklaşım benimsenmiştir. BN kaplamalarında kristalin fazların tanımlanması için x-ışını kırınımı (XRD) analizi yapılmıştır. Malzemelerin yüzey kimyasal analizi, x-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Malzemelerin yüzey morfolojisi taramalı elektron mikroskopu (SEM) kullanılarak incelenmiştir.

YÖNTEM

Öncül çözeltinin sentezi, karbon fiber malzemesi üzerinde BN kaplamalar için ıslak kaplama süreç metodolojisinin önemli bir yönünü temsil etmektedir. Şekil 1'de gösterildiği gibi ayrıntılı bir akış şeması, bu öncül çözümün sentezinde gerekli olan sıralı adımlara ayrıntılı bir genel bakış sunmakta ve araştırma çabasının bu önemli aşamasında yer alan karmaşıklıkların kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlamaktadır.





Bu prosedürde, amonyum boran (BH₃-NH₃) materyali, öncül madde olarak kullanılmıştır. BH₃-NH₃ materyali, B ve N atomlarını stokiyometrik olarak 1:1 oranında içermektedir. Amonyum boran içeren çözücü, 7x7 cm boyutlarında karbon fiber kupon altlık üzerine dökülerek ıslak kaplama yöntemiyle uygulanmıştır. İlk olarak karbon fiberler desizing işlemi uygulanarak üretim sırasında yapılan polimerik kaplama malzemesinden arındırılmıştır. Amonyum boran içeren bir çözelti hazırlanmış ve bu çözelti, istenilen yüzeye, genellikle bir alt tabaka veya malzeme üzerine dökülmüştür. İşlem sırasında, amonyum boran çözeltisi yüzeyin üzerinde yayılarak bir film oluşturulmuştur. Amonyum boranın çözünürlüğünü artırmak ve homojen bir kaplama sağlamak için 15 dk boyunca THF çözücüsü ile çözelti hazırlanmıştır. Hazırlanan çözelti karbon fiber yüzeyi üzerine oda sıcaklığında dökülmüştür. Daha sonra amonyum boran çözeltisi kurumaya bırakılmıştır. Bu sayede, çözücünün buharlaşmasına ve amonyum boranın yüzeyde bir film olusturmasına izin verilmistir. Yüksek sıcaklıklarda termal ayrısma tekniği kullanılarak amonyak boran bileşiğinden bor nitrür (BN) elde edilmiştir. Üretim parametreleri belirlenerek, kaplama işlemi atmosfer kontrollü tüp fırını içinde gerçekleştirilmiştir. Bu parametreler 10 °C/dk ısıl artış oranı ile 2 saat boyunca 1300 °C sıcaklık altında inert bir gaz olan N2 atmosferi ile gerçekleştirilmiştir. Karbon fiber malzemesi üzerinde BN dönüşümü gerçekleştirilerek, yüzey/matris bağlantısı oluşturulmuş ve kaplama sağlanmıştır.

Karbon fiberler üzerine üretilen BN kaplamaların fazları, PanAnalytical Empryrean Nano Edition marka difraktometre cihazı kullanılarak x-ışını kırınımı (XRD) analizi ile belirlenmiştir. Ölçümler, Cu K_a radyasyonu (λ =0.15405 nm) kullanılarak yapılmış ve Cu tüpüne 45 kV gerilim ve 40 mA akım uygulanmıştır. Karbon fiberler üzerine üretilen BN kaplamaların yüzey kimyasal analizi, Thermo Scientific K-Alpha x-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Fotoemisyon, 150 W'de çalışan monokromatik bir Al K α x-ışını kaynağı (1486.6 eV) ile indirilmiştir. Emilen fotoelektronlar, sabit retardasyon oranı modunda çalışan bir yarı küresel analizörden geçirilerek, 11.75 eV geçiş enerjisi ile alınmış ve \leq 0.51 eV enerji çözünürlüğü sağlanmıştır. Veri toplama, tespit edilen elektronların alçak açılı (α) çıkış açısının 30° ila 70° arasında değiştiği bir açı ile gerçekleştirilmiştir. Üretilen malzemelerin morfolojik özellikleri, PHILIPS/FEI QUANTA 200F modeli taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak sistemli bir şekilde incelenmiştir. SEM görüntüleme işlemi, 10 kV hızlandırma gerilimi altında gerçekleştirilmiş ve ince filmlerin yüzey mikroyapısı ve nanometre ölçeğindeki morfolojisi kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

DENEYSEL SONUÇLAR

Şekil 2'de, 1300 °C'de 2 saatlik bir termal işlemle sentezlenen BN kaplamaların XRD analiz verileri sunulmaktadır. Baskın pikin BN fazına karşılık geldiği belirlenmiştir. 20 difraksiyon açılarına dayalı olarak yapılan analizler, karbon fiber üzerine BN kaplamanın sırasıyla 25°'de (002), 41.5°'de (100), 43.8°'de (101), 50.2°'de (102), 75.9°'de (004) ve 82.3°'de (112) kristalografik düzlem yönelimlere sahip belirgin bir tercih edilen dokuya sahip olduğunu göstermektedir. Bu veriler, BN kaplı C nanofiber malzemesinin belirli yönelimlerde yoğun bir kristal yapısı sergilediğini ve kristal yüzeylerin dikkate değer bir hizalanma gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu fenomen, malzemenin özellikleri ve davranışları üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilmektedir. Bu veriler sonucunda bor nitrür kristal yapısının hekzagonal olduğu tayin edilmiştir.

Şekil 3, karbon fiber üzerine üretilmiş BN kaplama malzemelerinin XPS analiz sonuçlarını göstermektedir. XPS analizi, Ar ile aşındırılarak derinlik profili yapılarak elde edilmiştir. XPS analizi sonucu ile BN kaplı malzemelerin elementel kimlikleri ve atom yüzdeleri özetlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan elementlerin bağlanma enerjileri tespit edilip, bağ tayini ile elementel

atom yüzdeleri, Şekil 3'te gösterildiği gibi B 1s, C 1s, N 1s ve O bölgeleri için XPS spektrumlar tespit edilmiştir. B ve N atomik yüzdeleri birbirine yakın olduğundan stokiyometrik yapının XRD sonuçlarından da görüldüğü gibi BN yapının oluştuğunun ispatı ve oksitlenme gibi fenomenlerin düşük olduğu gözlemlenmiştir. Oksitlenme iyi bilinen bor nitrür kaplı karbon fiberlerin havadaki nemi absorbe etmesinden dolayı kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 2. Karbon fiber kumaşlar üzerine üretilen BN kaplamaların XRD paternleri



Şekil 3. Karbon fiber kumaşlar üzerine üretilen BN kaplamaların XPS analiz sonuçları

BN kaplı C fiber malzemelerin mikroyapısı, SEM kullanılarak gözlemlenmiştir. Elde edilen SEM yüzey görüntüleri Şekil 4'te gösterilmiştir. Bu görüntünün analizi, üretilen BN kaplamanın homojen mikro yapısının amaçlanan sürekli film kalitesine uyduğunu, çıplak karbon fiberlerdeki olukları doldurduğunu ortaya koymuş ve bu da beklenen yapısal özelliklerin doğrulanmasını sağlamıştır.



Şekil 4. Kaplanmış malzemenin SEM görüntüsü

Yöntemin basitliği ve büyük ölçekte üretime uygun olması, yöntemi endüstriyel kullanım için uygun hale getirmektedir. Karbon fiber malzemenin hafif ve yüksek mukavemetli yapısı, yeni nesil savaş uçakları gibi uygulamalarda kullanılmasını teşvik etmektedir. Ayrıca, bor nitrürün sahip olduğu özellikler, karbon fiber malzemesine korozyon direnci gibi ek özellikler katarak, uzun süreli kullanımlara olanak tanımaktadır. Bu, malzemenin geniş bir endüstriyel yelpazede kullanılmasını sağlamakta ve çeşitli uygulama alanlarında önemli avantajlar sunmaktadır.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, 5. nesil savaş uçağında kullanılmak üzere radar soğurucu özellikler katmak için ıslak kaplama yöntemi ve ısıl işlem kullanılarak karbon fiber kumaşlar üzerine BN kaplamalar üretilmiştir. XRD analiz verilerine göre tam stokiyometrik BN fazı elde edilmiştir. BN kaplı C fiber kumaşlardan yapılan XPS analizlerinde B, C, N ve O elementleri saptanmıştır. B ve N atomik yüzdeleri birbirine yakın olduğundan stokiyometrik yapının BN formunda olduğu belirlenmiştir. SEM çalışmaları C fiber altlıklar üzerine homojen BN kaplamalar üretildiğini açıkça göstermiştir. Gelecek plan olarak, üretilen malzemelerin elektromanyetik soğurma davranışı incelenecektir.

TEŞEKKÜR

Bu makalede sunulan araştırma, Türk Havacılık ve Uzay Sanayi Şirketi (TUSAŞ, Ankara) tarafından 115M579 Proje Numarası altında finanse edilmiştir. Bu araştırma çalışmasında TENMAK Bor Araştırma Enstitüsü (BOREN, Ankara) teknik ve deneysel çalışmalar açısından sağlamış olduğu iş birliği ile proje yürütüldüğü için teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

[1] Ardil, C. (2021). A comparative analysis of multiple criteria decision making analysis methods for strategic, tactical, and operational decisions in military fighter aircraft selection. *International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*, *14*(7), 275-288.

[2] Jayalakshmi, C. G., Inamdar, A., Anand, A., & Kandasubramanian, B. (2019). Polymer matrix composites as broadband radar soğurucu structures for stealth aircrafts. *Journal of Applied Polymer Science*, *136*(14), 47241.

[3] Ahmad, H., Tariq, A., Shehzad, A., Faheem, M. S., Shafiq, M., Rashid, I. A., ... & Khaliq, Z. (2019). Stealth technology: Methods and composite materials—A review. *Polymer Composites*, *40*(12), 4457-4472.

[4] Vaitheeswaran, S. M., & Gowthami, T. S. (2016). RCS of the tail swept flying wing and comparison with milestone aircrafts. In *7th International Symposium on Microwaves*. Bengaluru, India: Nimhans.

[5] Stensrud, R., Valaker, S., Mikkelsen, B., & Betten, S. (2020). 5th generation fighter aircraft and future command and control: A note on some possible changes. *25th ICCRTS*, 1-29.

[6] Zikidis, K., Skondras, A., & Tokas, C. (2014). Low observable principles, stealth aircraft and antistealth technologies. *Journal of Computations & Modelling*, *4*(1), 129-165.

[7] Knott, E. F., Schaeffer, J. F., & Tulley, M. T. (2004). Radar cross section. SciTech Publishing.

[8] Saville, P. (2005). Review of radar soğurucu materials.

[9] Ahmad, H., Tariq, A., Shehzad, A., Faheem, M. S., Shafiq, M., Rashid, I. A., ... & Khaliq, Z. (2019). Stealth technology: Methods and composite materials—A review. *Polymer Composites*, *40*(12), 4457-4472.

[10] Ruiz-Perez, F., López-Estrada, S. M., Tolentino-Hernández, R. V., & Caballero-Briones, F. (2022). Carbon-based radar soğurucu materials: A critical review. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, *7*(3), 100454.

[11] Li, Q., Zhao, X., Xu, L., Xun, X., Gao, F., Zhao, B., ... & Zhang, Y. (2024). Engineering strategies in low-dimensional microwave absorbers: Fundamentals, progress, and outlook. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, *159*, 100795.

[12] Pang, H., Duan, Y., Huang, L., Song, L., Liu, J., Zhang, T., ... & Liu, X. (2021). Research advances in composition, structure and mechanisms of microwave soğurucu materials. *Composites Part B: Engineering*, 224, 109173.

[13] Green, M., & Chen, X. (2019). Recent progress of nanomaterials for microwave absorption. *Journal of Materiomics*, *5*(4), 503-541.

[14] Qin, M., Zhang, L., & Wu, H. (2022). Dielectric loss mechanism in electromagnetic wave soğurucu materials. *Advanced Science*, *9*(10), 2105553.

[15] Elmahaishi, M. F., Ismail, I., & Muhammad, F. D. (2022). A review on electromagnetic microwave absorption properties: their materials and performance. *Journal of Materials Research and Technology*, *20*, 2188-2220.

[16] Wei, H., Zhang, Z., Hussain, G., Zhou, L., Li, Q., & Ostrikov, K. K. (2020). Techniques to enhance magnetic permeability in microwave soğurucu materials. *Applied Materials Today*, *19*, 100596.

[17] Houbi, A., Aldashevich, Z. A., Atassi, Y., Telmanovna, Z. B., Saule, M., & Kubanych, K. (2021). Microwave soğurucu properties of ferrites and their composites: A review. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 529, 167839.

[18] Yin, P., Zhang, L., Feng, X., Wang, J., Dai, J., & Tang, Y. (2020). Recent progress in ferrite microwave soğurucu composites. *Integrated Ferroelectrics*, *211*(1), 82-101.

[19] Zeng, X., Cheng, X., Yu, R., & Stucky, G. D. (2020). Electromagnetic microwave absorption theory and recent achievements in microwave absorbers. *Carbon*, *168*, 606-623.

[20] Lv, H., Yang, Z., Pan, H., & Wu, R. (2022). Electromagnetic absorption materials: Current progress and new frontiers. *Progress in Materials Science*, *127*, 100946.

[21] Gai, L., Zhao, H., Wang, F., Wang, P., Liu, Y., Han, X., & Du, Y. (2022). Advances in core—Shell engineering of carbon-based composites for electromagnetic wave absorption. *Nano Research*, *15*(10), 9410-9439.

[22] Wu, Z., Cheng, H. W., Jin, C., Yang, B., Xu, C., Pei, K., ... & Che, R. (2022). Dimensional design and core–shell engineering of nanomaterials for electromagnetic wave absorption. *Advanced Materials*, *34*(11), 2107538.

[23] Zhou, W., Xiao, P., Li, Y., & Zhou, L. (2013). Dielectric properties of BN modified carbon fibers by dip-coating. *Ceramics International*, *39*(6), 6569-6576.

[24] Wang, T., Wang, X., Tang, D., Jia, C., Ren, B., & Ji, Y. (2023). Research progress of ceramic-based soğurucu composite materials. *Academic Journal of Science and Technology*, *8*(3), 24-28.