

HAVA ARAÇLARI KANOPI SAYDAMLARINDA STREÇ AKRİLİK (STRETCHED ACRYLIC) KULLANIMININ MEKANİK DAYANIMA ETKİSİ VE AVANTAJLARI

Enes UÇAR¹, Batu ÖZKAHYA¹, Rifat YAPICI¹
Volo Kompozit ve Mühendislik, Ankara

Özge ÇİMEN BOSLU²
Volo Kompozit ve Mühendislik, Ankara

ÖZET

İnsanlı hava araçlarında pilotların dış dünyayı görebilmesi ve hareketlerini planlayabilmesi açısından saydam dış yüzeylere ihtiyaç duyulmaktadır. Saydam malzemelerin mekanik dayanımları pilot, mürettebat ve yolcuların hayatlarını etkilemektedir. Havacılık saydamlarında sıklıkla kullanılan PMMA (Polimetil metakrilat) malzemelerin askeri standartlarınca farklı türevleri bulunmaktadır. Bu çalışmada, havacılıkta en çok kullanılan iki PMMA malzemenin, dökme akrilik ve streç akrilik, mekanik açıdan dayanımları incelenmiştir. MIL-P-8184 ve MIL-P-25690 standartları karşılaştırılmış olup, iki standart arasındaki farklar incelenmiştir. İncelemenin havacılık dünyasındaki karşılıkları ise var olan hava araçlarında kullanılan akrilik malzemelerin sunumu ile gerçekleştirilmiştir.

GİRİŞ

Bu çalışmada hava araçlarının kanopilerinde streç (stretched) akrilik kullanımının mekanik dayanım açısından avantajları incelenmiştir. İnsanlı hava araçlarında pilotların dış dünyayı görebilmesi için saydam malzemeler kullanılmaktadır. Potansiyel dış tehlikelere ve çevresel tüm etmenlere karşı ise pilotun ve varsa mürettebat ve yolcuların can güvenliği yine bu saydam malzemelerin mekanik dayanımlarına bağlıdır. Olası kuş çarpması kazaları bu tehlikelerin başında gelmektedir. Bu bağlamda; hava araçlarında kullanılan belli başlı termoplastik, şeffaf polimer malzemeler bulunmaktadır. Bu çalışmada hava araçları kanopilerinde yaygın bir şekilde kullanılan polimetil metakrilat (PMMA) malzeme türevleri incelenmiştir. Askeri standartlarca PMMA türevi saydamlar 3 farklı standarda uygun şekilde sınıflandırılabilir. Bunlar:

MIL-P-5425 → Military Specification: Plastic sheet, Acrylic, Heat Resistant[1]

MIL-P-MIL-P-8184 → Performance Specification: Plastic Sheet, Acrylic, Modified[2]

MIL-P-MIL-P-25690 → Performance Specification: Plastic, Sheets, and Formed Parts, Modified Acrylic Base, Monolithic, Crack Propagation Resistant[3]

Standartların içeriğinde, bu standartlara uygun malzemeler için azami veya asgari termal, mekanik ve optik özellikler verilmektedir. Örneğin her üç standartta da çekme mukavemetleri için minimum değerler verilmiştir. MIL-P-5425 standardında 8,000 psi minimum gereksinim olarak verilirken, MIL-P-8184 standardında 9,000 psi ve MIL-P-25690 standardında bu değer 11,000 psi[MIL-P-25690, 1993] olarak verilmiştir. Bir akrilik plaka MIL-P-8184 standardına uygun olması için 9,000 psi[MIL-P-8184, 1998] veya daha fazla çekme mukavemeti sağlamalıdır.

Dokümanın devamında MIL-P-25690 standardında malzemeler için streç akrilik, MIL-P-8184 standardında malzemeler için ise dökme akrilik ifadeleri kullanılacaktır.

Dökme Akrilik

Dökme akrilik, sıvı polimetil metakrilat (PMMA) reçinesinin kalıplara dökülerek şekillendirilmesi ve ardından sertleştirilmesi ile üretilir. Bu yöntem, ilk olarak akrilik reçinenin sıvı formda özel kalıplara dökülmesiyle başlar. Kalıptaki reçine, belirli bir sıcaklık ve süre boyunca ısıtılarak kimyasal

¹ Havacılık Saydamları Ürün Mühendisi, Volo Kompozit ve Mühendislik, E-posta: enes@volo.com.tr, batu@volo.com.tr, rifat@volo.com.tr

² Program Lideri, Volo Kompozit ve Mühendislik, E-posta: ozge@volo.com.tr

reaksiyonlarla polimerize olur ve sertleşir[MIL-HBK-17A, 1993]. Bu süreç, akrilik malzemenin homojen ve pürüzsüz bir yüzey yapısına sahip olmasını sağlar. Son olarak, sertleşmiş akrilik levhalar kalıptan çıkarılır ve istenilen kalınlıkta kesilir veya işlenir. Dökme akriliklerin bu üretim yöntemi, yüksek optik şeffaflık, düzgün yüzey kalitesi ve çeşitli renk ve şekillerde üretim imkânı sağlar, bu nedenle optik uygulamalar için tercih edilir.

Streç Akrilik

Streç akrilik plastik, MIL-P-8184'ü oluşturan uzun polimer zincirlerinin yeniden yönlendirilmesiyle üretilir. Germe işlemi, MIL-P-8184 levhalarının yaklaşık 300°F'ye ısıtılması ve ardından %65 ila %70 daha uzun hale gelene ve kalınlığı orijinal değerinin yaklaşık 1/3'üne düşene kadar tüm kenarlardan eşit şekilde çekilmesiyle gerçekleştirilir[MIL-HBK-17A, 1993]. Daha sonra levha, gerekli optik kaliteyi ve kalınlık kontrolünü sağlamak için zımparalanır ve cilalanır. Bu işlemin bir sonucu olarak, gerilmiş akrilik, dökme çeşidinden daha pahalı bir üretim maliyetine sahiptir. Germe işlemi ayrıca dökme akriliğin bazı özelliklerini de bozar. Gerilmiş akrilik 220°F'nin üzerine ısıtılırsa, dökme boyutlarına geri dönmeye başlar. Bu, şekillendirilebileceği sıcaklıkları sınırlar ve parçaları konturlamak için özel şekillendirme yöntemleri kullanılmalıdır[Kay, 1979].

Mekanik Dayanımların Karşılaştırılması

Çekme Mukavemeti

Hava araçlarında çekme mukavemeti, kullanılan malzemelerin çekme kuvvetlerine karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır ve havacılık mühendisliği için kritik bir öneme sahiptir. Hava araçları, uçuş sırasında büyük aerodinamik kuvvetlere, basınç değişimlerine ve diğer çevresel streslere maruz kalır. Bu nedenle, uçak gövdesi, kanatlar, iniş takımları gibi kritik bileşenlerin, yüksek çekme dayanımına sahip malzemelerden yapılması gereklidir. Çekme mukavemeti, bu bileşenlerin güvenli bir şekilde çalışmasını sağlarken, uçuş sırasında meydana gelebilecek herhangi bir yapısal arızayı önlemede önemli bir rol oynar. Yetersiz çekme dayanımına sahip malzemeler, hava araçlarının güvenliğini tehlikeye atabilir ve kazalara yol açabilir[Titterton, 1968].

Çekme mukavemetinin önemi, sadece yapısal bütünlükle sınırlı kalmaz; aynı zamanda ağırlık ve performans üzerinde de doğrudan etkilidir. Havacılık sektörü, yakıt verimliliğini artırmak ve maliyetleri düşürmek amacıyla hafif ve dayanıklı malzemelere yönelmektedir. Yüksek çekme dayanımına sahip alüminyum alaşımlar, titanyum ve karbon fiber kompozitler gibi malzemeler, hafif ama güçlü yapıların tasarlanmasına olanak tanır. Bu malzemeler, uçakların ağırlığını azaltarak yakıt tüketimini ve emisyonları düşürürken, performanslarını artırır. Kanopi saydamları özelinde incelendiğinde ise farklı PMMA türevleri kullanılarak ağırlık azaltma çalışmaları yapılabilir. Dolayısıyla, çekme dayanımı, hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından havacılık endüstrisi için hayati öneme sahiptir. Ayrıca, çekme dayanımı, hava araçlarının güvenilirliği ve uzun ömürlülüğü açısından da kritiktir. Hava araçları, sürekli olarak değişen çevresel koşullar ve tekrarlayan yükler altında çalışmak zorundadır. Yüksek çekme dayanımına sahip malzemeler, bu zorlu koşullara daha iyi dayanarak bakım sıklığını azaltır ve hava araçlarının hizmet ömrünü uzatır. Bu, havayolu şirketleri için önemli maliyet tasarrufları sağlar ve uçakların daha uzun süre güvenli bir şekilde hizmet vermesine olanak tanır. Özetle, çekme mukavemeti, hava araçlarının tasarımında ve operasyonunda vazgeçilmez bir unsur olup, güvenlik, performans, ekonomi ve sürdürülebilirlik üzerinde belirleyici bir etkisi bulunmaktadır.

Dökme akrilik için MIL-P-8184'de verilen malzeme özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Dökme Akrilik Malzeme Özellikleri [MIL-P-8184, 1998]

CHARACTERISTIC	REQUIREMENT
Specific gravity	1.19 ±0.01
Water absorption	See table I
Long term water absorption (class 2), percent, maximum	2.90
Flammability	See table I
Coefficient of thermal expansion per °F (°C), maximum	0.000055 (0.00010)
Internal strain (dimensional change), percent, maximum	1
Flexural deformation temperature	See table I
Tensile strength, psi (MPa), minimum	9000 (62.1)
Elongation, percent, minimum	2
Ultraviolet transmittance (290 to 330 mμ range), percent, maximum	2
Index of refraction <u>1</u> /	1.49 ±0.01

Streç akrilik için MIL-P-25690'da verilen malzeme özellikleri Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Streç Akrilik Malzeme Özellikleri [MIL-P-25690, 1993]

Characteristic	Requirement		Test para
	Individual Value	Average Value	
Resistance to crack propagation, Pounds per inch ^{3/2} , min, K value			4.6.6
Received @ std conditions	2300	2700	
As received @ -17.8°C (0°F)	1150	1250	
After weathering @ std conditions	2100	2300	
Thermal relaxation, shrinkback @ 110°C (230°F), %, max	10.0		4.6.7
@ 145°C (293°F), %, min	37.5		
Tensile strength, psi, min		11000	4.6.8
Shear strength, psi, min		3000	4.6.9
Dimensional stability, after natural weathering, %, max.	0.2		4.6.11.2

Standartlar incelendiğinde çekme dayanımları için minimum isterlerinin dökme akrilikte 9000 psi ve streç akrilikte 11000 psi olduğu görülmektedir. Streç akriliklerin çekme mukavemetleri bağlamında dökme akriliklerden daha dayanıklı olduğu görünmektedir. Aynı kalınlıkta iki farklı malzeme kullanılarak üretilecek iki kanopi saydamında streç akrilikten yapılan kanopinin daha mukavemetli olacağı söylenebilir. Başka bir açıdan yorumlanmak istenirse, daha hafif bir hava aracı üretilmek istendiğinde aynı mukavemet değerine sahip iki farklı malzemeden üretilmiş hava aracı saydamlarında, streç akrilikten üretilen kanopi saydamının daha ince olduğu için daha hafif olacağı da rahatlıkla söylenebilir. Aynı mukavemet değerleri için dökme akrilik kullanıldığında daha kalın bir malzeme seçilmesi gerekecektir.

Çatlama Direnci (Craze Resistance)

Çatlama(Crazing), genellikle polimerlerde ve seramiklerde meydana gelen, malzemenin yüzeyinde ince çatlaklar ağı olarak görülen bir tür mikroskobik hasar şeklidir. Bu çatlaklar, malzemenin optik

görünümünü etkileyebilir ve yüzeyde mat, sisli bir görünüm oluşturabilir. Crazing, malzemenin içyapısında gerilim yoğunlaşmasına neden olur ve bu da malzemenin kırılma tokluğunu ve dayanıklılığını azaltabilir. Genellikle malzemenin stres altında olduğu durumlarda ortaya çıkar ve bu çatlaklar ilerledikçe malzemenin kopma veya kırılma riski artar[Kay, 1979].

Havacılık sektöründe kullanılan saydam malzemelerin çatlama direnci (craze resistance), uçuş güvenliği ve performansı açısından kritik bir öneme sahiptir. Uçakların camları, pencereleri ve diğer saydam yüzeyleri, yüksek irtifalarda maruz kaldıkları aşırı sıcaklık değişimleri, basınç farkları ve UV ışınları gibi zorlu çevresel koşullar nedeniyle ciddi stres altındadır. Bu stres faktörleri, malzemelerin yüzeyinde küçük çatlakların oluşmasına ve zamanla büyüyerek ciddi yapısal hasarlara yol açabilecek çatlamalara sebep olabilir.

Çatlama direnci yüksek olan malzemeler, bu tür olumsuz etkiler karşısında daha dayanıklıdır ve uzun süreli kullanımda güvenilir performans sunar. Özellikle kabin pencereleri ve kokpit camları, uçuş sırasında sürekli basınca maruz kaldıklarından, bu alanlarda kullanılan akrilik veya polikarbonat malzemelerin craze resistance özellikleri titizlikle değerlendirilmelidir. Çatlak oluşumu, sadece malzemenin yapısal bütünlüğünü tehdit etmekle kalmaz, aynı zamanda optik berraklığını da etkileyerek pilotların görüşünü sınırlandırabilir. Bu durum, uçuş güvenliğini tehlikeye atabilecek bir risk faktörü olarak karşımıza çıkar.

Havacılık saydamlarında kullanılan malzemelerin çatlama direncini, tasarım ve malzeme mühendisliğinde önemli bir araştırma ve geliştirme alanıdır. Malzemelerin çeşitli kimyasal modifikasyonlarla güçlendirilmesi, çatlama direncini artırabilir ve bu sayede daha güvenli ve uzun ömürlü kullanım imkânı sağlayabilir[Kay, 1979]. Ayrıca, bu tür malzemelerin bakım ve denetim süreçleri de, olası çatlakların erken tespiti ve giderilmesi açısından büyük önem taşır. Bu nedenle, çatlama direncinin artırılması, yalnızca malzeme seçimi ve tasarımı açısından değil, aynı zamanda havacılıkta operasyonel güvenlik ve maliyet etkinliği sağlamak adına da kritik bir rol oynar.

Özetle, çatlama direnci havacılık saydamlarında, güvenilirlik ve emniyet açısından vazgeçilmez bir parametredir. Havacılık sektörü, bu konuda sürekli yenilikler ve gelişmelerle, daha güvenli ve dayanıklı uçak tasarımlarına katkıda bulunmaya devam etmektedir.

Dökme akrilik, standart akrilik ürünlerinden biridir. Bu malzeme, darbelere karşı dirençli olması ve yüksek optik berraklık sağlamasıyla bilinir. Bununla birlikte, çatlama direnci söz konusu olduğunda, kimyasal ve çevresel etkilere maruz kaldığında yüzeyinde çatlamlar meydana gelebilir. Çatlama, özellikle gerilim altındaki bölgelerde daha yaygın olarak görülebilmekte ve bu durum malzemenin dayanıklılığını olumsuz etkilemektedir.

Streç akrilik ise, çatlama direnci konusunda geliştirilmiş özellikler sunar. Bu tür akrilikler, genellikle kimyasal katkıları veya modifikasyonlar ile güçlendirilmiş olup, çevresel stres çatlamasına karşı daha dayanıklıdır[Titterton, 1968]. Özellikle lamine hava araçları saydamlarının dış katmanlarında yaygın kullanılmaktadır.

Genel olarak, streç akriliğin çatlama direncinin daha yüksek olması, onun daha zorlu çevresel koşullarda veya daha uzun süreli uygulamalarda tercih edilmesini sağlar. Bununla birlikte, her iki malzemenin de belirli avantajları ve kullanım alanları bulunmaktadır; seçim, uygulamanın gereksinimlerine ve çevresel koşullara bağlı olarak yapılmalıdır. Çatlama direnci gibi özelliklerin değerlendirilmesi, malzeme seçiminin temel bir parçasıdır ve uygulama sırasında uzun ömürlülüğü ve performansı doğrudan etkiler.

3.7 Craze resistance. Craze resistance shall be determined as specified in 4.5.15. Stress to craze results shall be not less than the values specified below:

	<u>Isopropyl Alcohol</u>		<u>Toluene/Isobutyl Acetate</u>	
	<u>Dry</u>	<u>Wet</u>	<u>Dry</u>	<u>Wet</u>
Class 1, psi	2500	1500	2000	1500
Class 2, psi	2500	2000	2000	1600

Şekil 1. Dökme Akrilik Malzemelerin Çatlama Direnci Özellikleri[MIL-P-8184. 1998]

3.7 Craze resistance. Stress to craze values when tested as specified in 4.6.10 shall be as follows:

	Isopropanol (TT-I-735)		Toluene/Isobutylacetate (TT-T-548/ASTM D1718)	
	Dry	Wet	Dry	Wet
Class 1, psi, min	3000	2000	2500	1750
Class 2, psi, min	3000	2500	2500	2000

Şekil 2. Streç Akriklik Malzemelerin Çatlama Direnci Özellikleri[MIL-P-25690, 1993]

Şekil 1 ve Şekil 2’de, dökme ve streç akriliklerin çatlama dirençleri verilmiştir. Tablolar incelendiğinde streç akrilik için verilen limit değerlerin dökme akriliğe göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum streç akriliği çatlama direncine bağlı risklere karşı daha dayanıklı ve güvenilir yapmaktadır. Mikro çatlaklar çıplak gözle görülmesi kolay olmayan, ancak çatlaklar ilerlediğinde gözlemlenebilen kusurlardır. Yüzeylerde oluşabilecek mikro çatlakların tespiti rutin muayenelerin sıklaştırılması ile mümkün olabilir. Uçuş güvenliği açısından özellikle dış atmosferle temas eden saydam yüzeyi için streç akrilik seçimi kritik olmaktadır.

0,006 inç derinliğindeki çatlaklar bir araştırmada dökme akriliğin (MIL-P-5425) çekme dayanımında %30'luk bir kayba neden olmuştur. Buna karşılık, streç akrilik 0,030 inç derinliğe kadar ciddi şekilde çatladığında orijinal dayanımında yalnızca %10'luk bir kayıp yaşamıştır.[Kay, 1979]

Hava Araçları Örnekleri

Northrop F-5A

F-5A, F-5E						
Windshield	Northrop Corp.	Curved Conical	Monolithic Acrylic	1	Stretched Acrylic	0.710
Canopy	Northrop Corp.	Compound Curved	Monolithic Acrylic	1	Stretched Acrylic	0.250

Şekil 3. Nortrop F-5A, F-5E Serisi Savaş Uçağı Saydam Konfigürasyonu [DSIAC TI Response Report]

Grumman F-14A Tomcat

F-14A						
Windshield	PPG	Flat	Glass Laminate	1	Semitemper Glass	0.187
				IL	Polyvinyl Butyral	0.060
				2	Full-Temper Glass	0.500
				IL	Polyvinyl Butyral	0.080
				3	Full-Temper Glass	0.250
Canopy, Fwd	Swedlow	Curved Conical	Acrylic Laminate	IL	Polyvinyl Butyral	0.060
				4	Annealed Glass	0.500
				IL	Polyvinyl Butyral	0.020
				5	Annealed Glass	0.250
				1	Cast Acrylic	0.125
Canopy, Aft	Swedlow	Compound Curved	Acrylic Laminate	IL	Silicone	0.100
				2	Stretched Acrylic	0.200
				1	Cast Acrylic	0.100
Side Quarter Panels	Swedlow	Compound Curved	Acrylic Laminate	1	Cast Acrylic	0.125
				IL	Silicone	0.100
				2	Stretched Acrylic	0.300

Şekil 4. Grumman F-14A Serisi Savaş Uçağı Saydam Konfigürasyonu [DSIAC TI Response Report]

McDonnell Douglas F-15

F-15						
Windshield	Swedlow	Curved Conical	Monolithic Acrylic	1	Stretched Acrylic	0.900
Canopy, Fwd	Swedlow	Compound Curved	Monolithic Acrylic	1	Stretched Acrylic	0.300

Şekil 5. McDonnell Douglas F-15 Serisi Savaş Uçağı Saydam Konfigürasyonu [DSIAC T1 Response Report]

McDonnell Douglas F/A-18L

F/A-18L						
Windshield	Swedlow	Curved Conical	Monolithic Acrylic	1	Stretched Acrylic	0.600
Canopy, Single-Seat	Swedlow	Compound Curved	Monolithic Acrylic	1	Stretched Acrylic	0.250
Canopy, 2-Seat, Fwd Piece	Swedlow	Compound Curved	Monolithic Acrylic	1	Stretched Acrylic	0.350
Canopy, 2-Seat, Aft Piece	Swedlow	Compound Curved	Monolithic Acrylic	1	Stretched Acrylic	0.350

Şekil 6. McDonnell Douglas F/A-18L Serisi Savaş Uçağı Saydam Konfigürasyonu [DSIAC T1 Response Report]

Yukarıda verilen şekillerde bazı savaş uçaklarının saydam konfigürasyonları, üretici firmalar, saydamların şekilleri, tekli veya katmanlı yapı olması, malzeme cinsi ve kalınlıkları listelenmiştir.

Özellikle askeri savaş uçaklarında streç akrilik kullanımının yaygınlığı ve kullanım alanları gösterilmek istenmiştir.

Şekil 4'te verilen Grumman F-14A Tomcat uçağının saydam konfigürasyonu incelendiğinde düz yapılarda cam(glass) katmanlardan oluşan lamine saydam kullanıldığı görülmektedir. F-14A uçağı 1974'te hizmete girmiş olan eski tip bir savaş uçağıdır. Uçaklarda kuş çarpmasının en riskli olacağı, pilotların hayatlarının söz konusu olduğu kısımlar windshield kısımlarıdır. Şekil 7'de F-14 uçağına ait bir görsel verilmiştir. Windshield bölgesinde düz cam kullanıldığı görülebilmektedir.



Şekil 7. Grumman F-14 [Airandspace, n.d.]

Son yıllarda üretilen savaş uçaklarında tüm saydam yapının oval geometrilerde olduğu görülmektedir. Şekil 8'de en güncel örneklerden biri olan F-35 savaş uçağı gösterilmektedir. Yüksek aerodinamik performans avantajından[EAA, 1992] dolayı yeni nesil savaş uçakları saydam tasarımlarında düz yapılardan vazgeçmektedir. Bu durumda da temperli cama en iyi muadil yapılardan birinin streç akrilik olduğu görülmektedir.



Şekil 8. Lockheed Martin F-35 [Defenceturk, 2022]

F-35 saydamları streç akrilikten yapılmış çerçeveli bir ön cam(windshield) ve yine streç akrilikten yapılmış arka kanopi saydamından oluşmaktadır. [GKN Aerospace]

SONUÇ

Sonuç olarak, dökme akrilik ve streç akrilik malzemeler arasında yapılan karşılaştırma, streç akriliğin mekanik dayanım açısından belirgin avantajlar sunduğunu göstermektedir. Bu çalışmada elde edilen veriler, streç akriliğin özellikle çekme mukavemeti ve çatlama direnci özellikleri bakımından üstün olduğunu ortaya koymaktadır.

Öncelikle, streç akriliğin çekme mukavemeti, malzemenin yüksek gerilim altında deformasyona karşı daha dirençli olmasını sağlamaktadır. Bu özellik, özellikle yapısal bütünlüğün kritik olduğu uygulamalarda büyük bir avantaj sunmaktadır. dökme akrilik de çekme mukavemeti açısından iyi performans göstermesine rağmen, streç akrilik bu parametrede daha üstün bir profil çizmektedir. Daha yüksek çekme mukavemeti, malzemenin uzun süreli yüklemelere ve ani darbelere karşı dayanıklılığını artırarak, kullanım ömrünü uzatır ve güvenilirliği artırır.

Çatlama direnci (craze resistance) açısından da streç akrilik, dökme akriliğe kıyasla önemli bir avantaj sunmaktadır. Streç akriliğin geliştirilmiş çatlama direnci, malzemenin çevresel stres faktörlerine ve kimyasal etkilere karşı daha dayanıklı olmasını sağlamaktadır. Bu özellik, özellikle uçak camları gibi yüksek stres altındaki uygulamalar için kritik öneme sahiptir. Çatlama direncinin yüksek olması, malzemenin optik berraklığını ve yapısal bütünlüğünü korumasına yardımcı olarak, güvenliği ve performansı artırır.

Sonuç olarak, streç akrilik malzemenin mekanik dayanım ve çatlama direnci açısından sunduğu üstünlükler, bu malzemenin daha zorlu koşullarda ve yüksek performans gerektiren uygulamalarda tercih edilmesini sağlamaktadır. Bu nedenle, streç akriliğin kullanımının, uzun vadede daha güvenilir ve dayanıklı çözümler sunacağı öngörülmektedir. Bu çalışma, streç akriliğin sektörel uygulamalarda sağladığı avantajların altını çizirken, bu malzemenin gelecekteki mühendislik projelerinde daha geniş bir kullanım alanı bulacağına dair önemli bir dayanak oluşturmaktadır.

Kaynaklar

Aircraft Transparency Construction, materials, and ... (n.d.). https://www.dsiac.org/wp-content/uploads/2018/02/2175747_STI_Document.pdf

GKN Aerospace on the Lockheed Martin F-35 Lightning II. (n.d.-b). <https://www.gknaerospace.com/>

media/rw0j51hc/f-35.pdf

Grumman F-14. (n.d.). https://airandspace.si.edu/collection-objects/grumman-f-14dr-tomcat/nasm_A20040156000.

Kay, B. F. (1979). *Helicopter transparent enclosures*.

Lockheed Martin F-35. (2022, July 21). <https://www.defenceturk.net/cekya-abdden-f-35-savas-ucagi-tedarik-edecek>.

MIL-HDBK-17A (1973), Plastics for Aerospace Vehicles Part II Transparent Glazing Materials

MIL-P-25690B (1998), Military Specification for Testing Plastic, Sheets and Parts, Modified Acrylic Base, Crack Propagation Resistant.

MIL-P-8184F, Military Specification for Testing Plastic Acrylic Sheet, Modified, Sept 1998

Titterton, G. F. (1968). *Aircraft Materials and Processes*. English Book Store.

What you should know about canopies. EAA. (1992, Ekim). <https://www.eaa.org/ea/aircraft-building/builderresources/while-youre-building/building-articles/canopies-and-windshields/what-you-should-know-about-canopies>