



New trend in aerospace industry: Al-Li based alloys

Süleyman Kılıç^{1*}, İlyas Kacar², Fahrettin Öztürk^{3,4}

¹Kırşehir Ahi Evran University, Faculty of Engineering and Architecture, Mechanical Engineering Department, Kırşehir, Turkey

²Niğde Ömer Halisdemir University, Faculty of Engineering, Mechatronics Engineering Department, Niğde, Turkey

³Turkish Aerospace Industries Inc., Ankara, Turkey

⁴Ankara Yıldırım Beyazıt University, Department of Mechanical Engineering, Ankara, Turkey

Highlights:

- Aluminum alloys in the aviation industry from past to present
- The lightning efforts in the aviation industry
- Problems and solutions in the lightning

Keywords:

- Aluminum-Lithium based alloys,
- aerospace industry,
- lightning,
- welding ability

Article Info:

Review Article

Received: 12.06.2017

Accepted: 17.10.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416490

Graphical/Tabular Abstract

With lithium, aluminium alloys have become the focus of the aerospace industry due to their low density and high elasticity modulus, excellent corrosion resistance, high hardness, high fatigue crack growth resistance, and low fracture toughness. So, lithium gives unique characteristics to aluminium alloys and parts made of them.

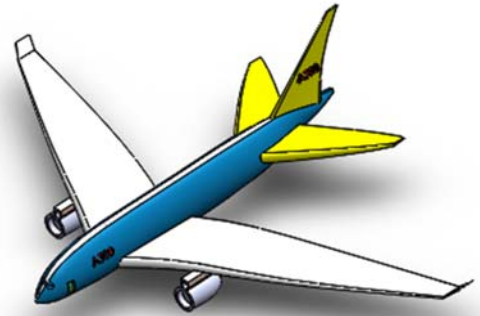
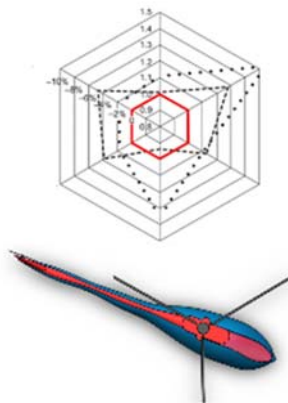


Figure A. Al-Li based alloys are used for designs in the aviation industry due to their unique mechanical and chemical advantages

Acknowledgement:

Purpose: In this study, the use of Al-Li based alloys in the aerospace industry, the problems encountered, and the proposal of solutions have been examined.

Correspondence:

Author: Süleyman Kılıç
e-mail: suleymankilic@ahievran.edu.tr
phone: +90 386 280 3812

Theory and Methods: The types and usages of Al-Li based alloys on structural parts are listed and mechanical properties are given detailed. Microstructure and welding ability are investigated.

Results: Instead of high strength 2XXX and 7XXX alloys, Al-Li alloys are started to be used in aerospace industry. The most challenging property is their weight reduction ability without sacrificing strength and corrosion resistance.

Conclusion: Al-Li based alloys have been continuing to be developed. Nowadays, static and dynamic corrosion resistance are getting increased by the third generation Al-Li alloys. In addition, 2055 Al-Li alloys has 5% lower density than 7055 alloys.



Havacılık endüstrisinde yeni trend: Al-Li esaslı alaşımlar

Süleyman Kılıç^{1*}, İlyas Kacar², Fahrettin Öztürk^{3,4}

¹Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği, Kırşehir, Türkiye

²Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Niğde, Türkiye

³Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş., Ankara, Türkiye

⁴Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Geçmişten günümüze havacılık endüstrisinde alüminyum alaşımları
- Havacılık endüstrisinde hafifletme çabaları
- Hafifletmede problemler ve çözüm önerileri

Makale Bilgileri

Tarama Makalesi

Geliş: 12.06.2017

Kabul: 17.10.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416490

Anahtar Kelimeler:

Alüminyum -Lityum esaslı
alaşımlar,
havacılık endüstrisi,
hafifletme,
kaynak kabiliyeti

ÖZET

Al-Li (Alüminyum-Lityum) alaşımları; düşük yoğunluk, yüksek elastisite modülü, mükemmel korozyon direnci, yüksek sertlik, yüksek yorulma çatlak büyüme direnci, düşük kırılma tokluğu ile havacılık endüstrisinin ilgi odağı haline gelmiştir. Bu alaşımların kullanımı, uçakların koltuk rayları, zemin kirişleri ve direkleri, kanat içi kirişler, kızak çerçeveleri gibi yapısal parçalarında devam ederken, gelecekte başka parçaların imalatında da kullanılmasına yönelik araştırma çalışmaları yoğun bir şekilde devam etmektedir. Her malzemede olduğu gibi bu alaşımlarda da çeşitli problemlerle karşılaşmaktadır. Bu çalışmada Al-Li alaşımlarının havacılık alanında kullanımı, karşılaşılan problemler ve çözüm önerileri incelenmiştir.

New trend in aerospace industry: Al-Li based alloys

H I G H L I G H T S

- Aluminum alloys in the aviation industry from past to present
- The lightening efforts in the aviation industry
- Problems and solutions in the lightening

Article Info

Review Article

Received: 12.06.2017

Accepted: 17.10.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416490

Keywords:

Aluminum-Lithium based
alloys,
aerospace industry,
lightening,
welding ability

ABSTRACT

Al-Li (Aluminum-Lithium) alloys have become the focus of the aerospace industry due to their low density and high elasticity modulus, excellent corrosion resistance, high hardness, high fatigue crack growth resistance, and low fracture toughness. Alloys continue to be used in various structural parts of the aircrafts such as seat beams, floor beams and columns, wing beams, cradle frames, and research studies are intensively going on about its future use for other structural parts. As with all materials, there are various problems in these alloys. In this study, the use of Al-Li based alloys in the aerospace industry, the problems encountered, and the proposal of solutions have been examined.

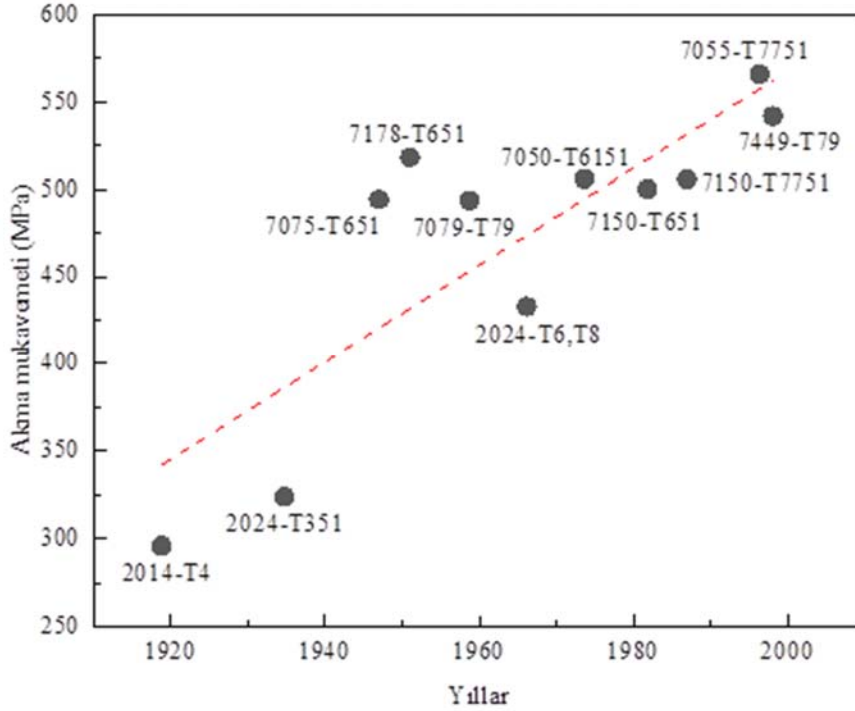
1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bütün imalat sektörlerinde olduğu gibi, havacılık endüstrisinde sürekli gelişmeler yaşanmakta, araştırma-geliştirme faaliyetleri artırılmakta ve bu doğrultuda sürekli olarak hafifletme çalışmaları yapılmaktadır. Üretilen hava araçlarının daha güvenli, korozyona ve yorulmaya daha dayanıklı olması ve en önemlisi de daha az yakıt tüketerek daha fazla menzile ulaşması bu çalışmaların hedeflerindedir. Uygulanacak hafiflik sağlama stratejileri, parçanın mukavemetinde azalmaya yol açmamalıdır. Havacılık endüstrisinde ilk kullanılan malzeme ahşap olup [1], sonrasında da 1900'lerde düşük maliyeti, uygulanan ısıl işlemlerle yüksek mukavemet kazanabilmesi, hafiflik ve şekillendirilme kabiliyetlerinden dolayı alüminyum alaşımları olmuşlardır [2]. Bu sayede de mukavemetten ödün vermeden yarı yarıya bir hafiflik sağlanmıştır. Bu avantajlara rağmen korozyon ve düşük elastisite başlıca dezavantajlardır.

Havacılıkta ilk yıllarda 2014 serisi alüminyum alaşımları kullanılmaktayken, günümüzde ise akma dayanımlarının daha yüksek olduğu 7XXX serisinin kullanıldığı Şekil 1'den görülmektedir [3]. Hava aracının çeşitli kısımlarında, farklı üretim yöntemleriyle üretilmiş yapısal parçalar kullanılmaktadır. Aynı alaşım hem sac olarak hem de ekstrüzyon ile üretilmektedir. Örneğin 2024 alaşımı, sac olarak gövde yüzeyinde kullanılmaktayken, ekstrüzyon ürünü olarak ta kanat/gövde kirişlerinde kullanılmaktadır. Genel olarak 2024 serisi, hasar toleransı yüksek olmasından dolayı tercih edilen bir alaşımdır.

Tablo 1'de havacılık endüstrisinde kullanılan alüminyum alaşımları ve kullanıldıkları bölgeler gösterilmektedir. Tablodaki "hasar toleranslı" ifadesi, yapının hem "mukavemet" hem de "kırılma tokluğu" değerlerinin aynı anda yüksek olduğunu ifade etmek için kullanılmıştır. Birçok malzemede, özellikle metalik alaşımlarda, yüksek tokluk değeri, beraberinde mukavemet azalmasını getirmektedir. Bir yapısal malzemenin uygulama alanında her zaman en önemli özelliği, hasar toleranslı olmasıdır [5]. Hasar toleranslı bir alaşım, kusurların kaçınılmaz olması halinde hasara karşı da yüksek direnç gösterebilecektir. Tablodaki "orta" ve "yüksek" mukavemet ifadeleri ise alaşımların birbirlerine göre durumunu göstermektedir. Değerler sıcaklığa göre değişmektedir ancak genel olarak Al alaşımlarında mukavemet değerlerinin, 100°C'nin daha üzerinde ve -200°C'nin daha altında çok büyük oranda değiştiği bilinmektedir. Tabloda "T" ile gösterilen kısaltmalar, uygulanmış olan ısıl işlem türünü sembolize etmektedir.

Al alaşımları esasen dört haneli bir numaralandırma sistemi ile gösterilirler. En baştaki hane asıl alaşımlama elementini gösterir. Örneğin 2xxx serisi bakır esaslı alüminyum alaşımlarıdır. Numaraların sonlarına yazılan harfler ise, alaşıma uygulanmış olan ısıl işlemi göstermektedir. Örneğin T ifadesi temperlenmiş olduğunu O ifadesi tavlınmış olduğunu gösterir. Benzer şekilde F, H, W harfleri de kullanılır, alt semboller de vardır. Bu harflerden sonra iki üç haneli numaralar gelir. Li alaşımı için ayrı bir gruplandırma yoktur ve genellikle 2xxx, 5xxx ve 8xxx serilerinde lityum görülür. 8090, 2090, 2099 örneklerinde olduğu gibi eğer bu



Şekil 1. Geçmişten günümüze havacılık endüstrisinde kullanılan alüminyum alaşımları ve akma mukavemetleri [3]
(Aluminum alloys and their yield strengths in aerospace industry from past to now)

Tablo 1. Havacılık endüstrisinde kullanılan alüminyum alaşımlarının mukavemet seviyeleri [4]
(Strength levels of aluminum alloys in aerospace industry)

Ürün	Mukavemet seviyesi	Alaşım-Temper	Uygulama
Sac	Hasar toleranslı	2024-T3, 2524-T3/351, 2024-T351, 2324-T39, 2624-T351, 2624-T39.	Gövde/ Basınç kabin yüzeyi
	Hasar toleranslı	2024-T62 2124-T851	Kanat alt kaplaması
Levha	Orta mukavemet	7050-T7451, 7X75-T7XXX	Taktik uçakların gövde panelleri
	Orta mukavemet	7150-T7751, 7055-T7751, 7055-T7951, 7255-T7951,	Taktik uçakların bölmeleri
Dövme	Yüksek mukavemet	7050-T7451	İç gövde yapısı
	Orta mukavemet	7175-T7351, 7050-T7452, 2024-T3511, 2026-T3511, 2024-T4312, 6110-T6511, 7075-T73511, 7075-T79511,	Kanat üst kaplaması
Ekstrüzyon	Yüksek mukavemet	7050-T7451	Direk, kiriş ve iç gövde yapısı
	Hasar toleranslı	7175-T7351, 7050-T7452, 2024-T3511, 2026-T3511, 2024-T4312, 6110-T6511, 7075-T73511, 7075-T79511,	Kanat/ Gövde parçaları
Ekstrüzyon	Orta-Yüksek mukavemet	7150-T6511, 7175-T79511, 7055-T77511, 7055-T79511	Kanat, gövde kirişleri
	Orta-Yüksek mukavemet	7150-T6511, 7175-T79511, 7055-T77511, 7055-T79511	Gövde, kanat kirişleri, zemin kirişleri, koltuk rayları

serilerin üçüncü haneleri 9 ise, alaşım elementinin lityum olduğu anlaşılır. Mekanik özelliklerin tayininde ise çekme (B 557-84), basma (E 9-89), kayma (B 565-87), kırılma tokluğu (E 399-92), yorulma (E 466-82) için ASTM (American Society for Testing and Materials) standartları kullanılmaktadır [6].

1.1. Malzeme Gereksinimleri (Material Requirements)

Bir uçağın çeşitli parçaları farklı tip yüklemelere, yorulmalara ve korozyon şartlarına maruz kalabilmektedir. Bu nedenle parçaların bulunduğu ortam/çalışacağı koşulları göz önüne alınarak malzeme seçimi yapılmaktadır. Şekil 2'de bir uçağın farklı bölümlerinde, istenilen malzeme ve mukavemet özellikleri gösterilmiştir [7]. Mesela kanat üstü yapıların basma mukavemetinin yüksek, burulmaya karşı dirençli ve kırılma tokluğunun yüksek olması gerekirken, kanat altı malzemelerin yüksek çekme mukavemetine ve hasar toleransına sahip malzemeler olması gerekmektedir.

1.2. Hafifletme Stratejileri (Lightening Strategies)

Şekil 3'ten de görüleceği üzere ağırlık azalımı konusunda, yoğunluk en önemli parametredir [8]. Lityum gibi düşük yoğunluklu malzemelerin alüminyum elementiyile alaşım

oluşturmasıyla, alaşımın yoğunluğu düşürülmektedir. Bunun yanı sıra malzemenin mukavemeti, elastisite modülü ve hasar toleransı ise şekillendirilebilmeyi etkileyen parametrelerdendir.

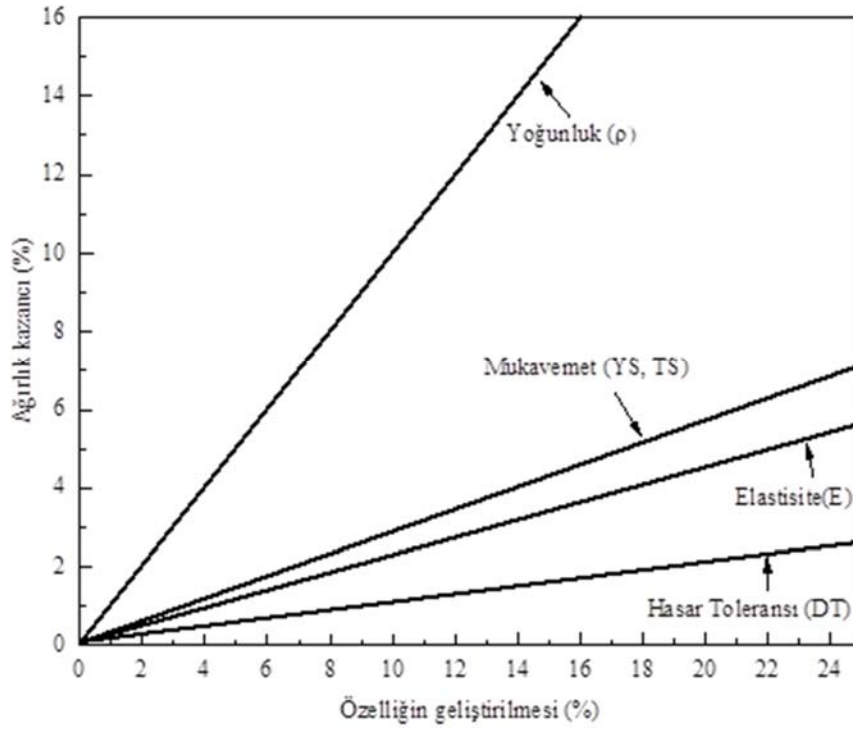
Günümüz şartlarında bir uçağın üretilme/geliştirme amacına bakıldığında ekonomiklik ve rekabet ön plandadır. Bir sefer ile en fazla sayıda yolcu taşıma ve buna bağlı olarak giderleri (yakıt, maaş, vergi) en aza düşürme eğilimleri doğrultusunda üretim/geliştirme yapılmaktadır. Geçmişten günümüze bu çalışmalar devam ederken, günümüzdeki uçakların kalkış ağırlığı 600 ton civarına yaklaşmıştır. Örneğin, dünyanın en büyük iki katlı geniş gövdeli, 853 yolcu kapasiteli ve 15200 km menzile sahip yolcu uçağı Airbus A380 modelinde, yeni geliştirilen/kullanılan malzemeler ile yaklaşık %25 daha hafiflik sağlanmıştır [9].

2. ALÜMİNYUM-LİTYUM ESASLI ALAŞIMLARI (ALUMINUM-LITHIUM BASED ALLOYS)

Lityum en az yoğunluğa sahip metal elementtir (0,534 g/cm³). Alüminyumun, Li esaslı alaşımlarına genellikle bakır ve zirkonyum ilave edilir. Lityum elementi, alaşımın hafiflemesini sağlarken aynı zamanda da sertliği artırmaktadır. Lityumun alaşımdaki ağırlığının %1 oranında artması, alaşımda %3 yoğunluk azalışı ve elastisite



Şekil 2. Bir taşıma/nakliye uçağında istenilen malzeme ve mukavemet özellikleri [7].
 (Desired material and strength properties for a transportation aircraft)

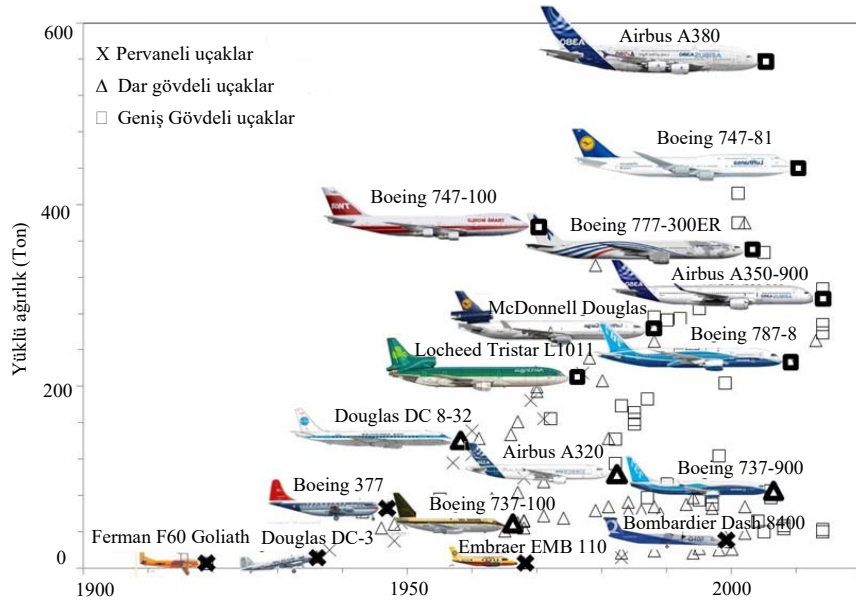


Şekil 3. Mekanik özelliklerin geliştirilmesi neticesinde elde edilen ağırlık kazancı [8].
 (Lightening achieved as a result of improved mechanical properties)

modülünde %6 oranında artış sağladığı bilinmektedir [11]. Eğer bir A350'nin tüm gövdesinde Al-Li esaslı alaşım, yeni üretim yöntemleriyle birlikte kullanılmış olsaydı, yaklaşık 700 kg'lık bir ağırlık kazancı elde edilmiş olacaktı [12]. Düşük yoğunluğu, yüksek elastisite modülü ve mükemmel yorulma direnci dolayısıyla ABD savunma bakanlığının hafifletme listesinde yer almaktadır. Uçakların kanat ve birçok iç parça uygulamasında kullanılması üzerine çalışmalar devam etmektedir. Aynı zamanda şu anki Boeing

787 uçağında 2099 serisi Al-Li esaslı alaşım kullanılmaktadır (Şekil 4) [11]. Rus havacılık endüstrisinde de Al-Li esaslı alaşım kullanılmakta olup, bu modeller Şekil 5'de verilmiştir [13].

Al-Li esaslı alaşımın genel özelliklerine bakıldığında; düşük yoğunluk, yüksek elastisite modülü, mükemmel korozyon direnci, yüksek sertlik, yüksek yorulma çatlak büyüme direnci, düşük kırılma tokluğu görülecektir.



Şekil 4. Uçakların yüz yıllık değişim periyodu [10] (A century period of aircraft development)



Şekil 5. Rus havacılık sanayinde Al-Li esaslı alaşım kullanılan hava araçları [13]
(The use of Al-Li based alloys in Russian aerospace industry)

2.1. Alüminyum- Lityum Esaslı Alaşımlarının Tarihsel Gelişimi

(Historical Development of Aluminum-Lithium Based Alloys)

Al-Li alaşımları 1920'li yılların başında geliştirilmeye başlanmış olup ilk ticari alaşım olarak AA2020 (Al-1.1Li-4.5Cu-0.5Mn-0.2Cd) 1958 yılında piyasaya sürüldü (Cu: Bakır, Mn: Mangan, Cd: Kadmiyum). İlk olarak RA-5C Vigilante savaş uçağının kanat yüzeyinde ve kuyruğunda kullanılmıştır (Şekil 6). Fakat 1960'lı yıllarda meydana gelen çatlak oluşumundan dolayı kullanımından vazgeçilmiştir [7].



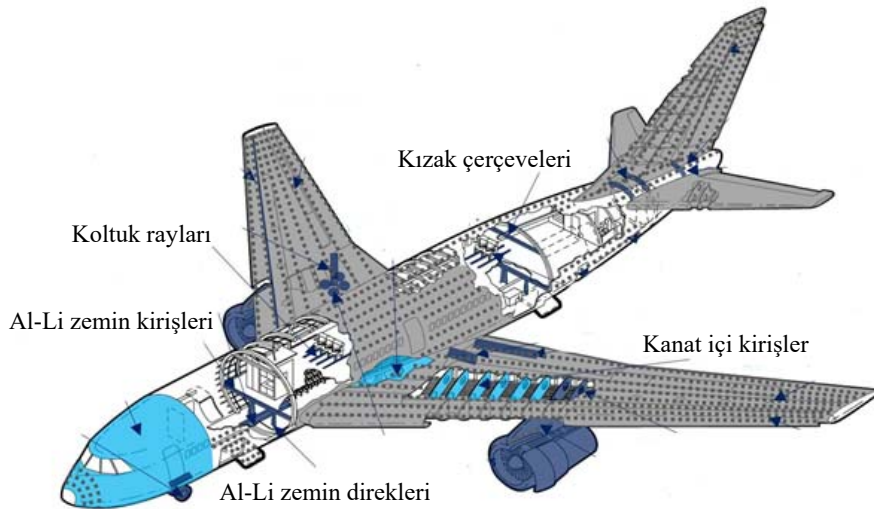
Şekil 6. RA-5C Vigilante [21]

Daha sonra 1980'li yıllarda alüminyum alaşımına %2,5 oranında lityum katılmasıyla geliştirilen birinci nesil Al-Li esaslı alaşımlar, her ne kadar %8-10 hafiflik sağlamış ise de, yüksek üretim maliyetleri ve çatlak sorunu nedeniyle araştırmalar askıya alınmıştır. Boeing firması 1990'lı yıllarda birinci nesil Al-Li esaslı alaşımları incelemeye başlamış fakat parçalarda meydana gelen küçük çatlaklar

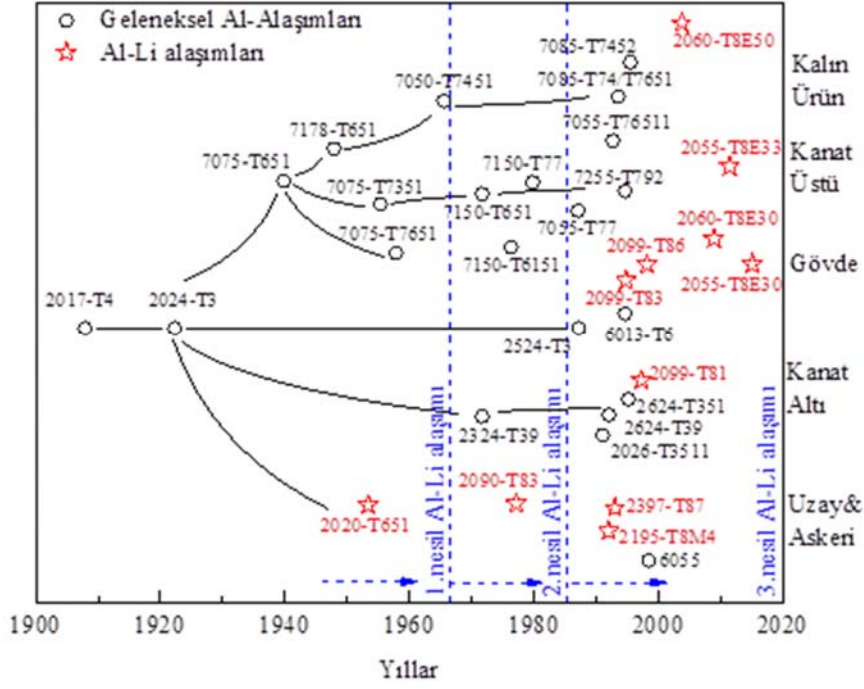
dolayısıyla araştırmalarına devam etmemiştir. Airbus firması daha sonra ikinci nesil Al-Li esaslı alaşımı geliştirmiş fakat %3,5'lik tuz çözeltisinde yorulma çatlak büyümesi oluşturduğu için çalışmalarından vazgeçmiştir. 2000'li yıllarda ise A380 modelinde üçüncü nesil Al-Li kullanılmaya başlanmıştır. Geliştirilen üçüncü nesil Al-Li (2010 yılları-Alcoa firması) alaşımlarında korozyon direnci de neredeyse iki kat artırılmıştır. Örneğin 7150-T775'e göre 2099-T86 2 kat, 2024'e göre 2099-T86 beş kat daha korozyona karşı dayanıklı hale gelmiştir [22]. Şekil 7'de Alcoa firması tarafından, halen kullanılan ve gelecekte de kullanılması planlanan Al-Li alaşımlı bölgeler gösterilmiştir. Zemin kirişlerinde, zemin direklerinde, koltuk raylarında kullanımı devam ederken, kanat içi kirişlerde, desteklerde vb... Al-Li alaşımının kullanılması üzerine çalışmalar devam etmektedir.

1900'lü yıllarda tek tip alüminyum alaşımı kullanılırken bugünlerde birçok çeşit alüminyum alaşımı kullanılmaktadır [24]. Al-Li esaslı alaşımlar, karşılaşılan problemlerden dolayı birçok geliştirilme evresine sahip olmuştur. 1970'li yıllara kadar olan çalışmalar birinci nesil, 1985'li yıllara kadar olan ikinci nesil ve ondan sonraki süreç ise üçüncü nesil alüminyum lityum alaşımları olarak ifade edilmektedirler. Şekil 8'de geçmişten günümüze kullanılan alüminyum alaşımları ve kullanım alanı örnekleri verilmiştir. Tablo 2'de ise yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımları ve kimyasal içerikleri gösterilmiştir. Tablo 3'te de geliştirilen farklı nesil alüminyum-lityum alaşımlarının kimyasal içerikleri ve üretici firmaları verilmiştir. Tablo 2 de kullanılan kısaltmaların anlamları şu şekildedir: Mg: Magnezyum, Si: Silisyum, Zr: Zirkonyum, Ti: Titanyum, V: Vanadyum, Ni: Nikel, Fe: Demir, Cr: Krom, Zn: Çinko, Ag: Gümüş, Sc: Skandiyum.

Tablo 3'ten de görüleceği üzere ikinci nesil Al-Li esaslı alaşımlarda, lityum içeriğinin %2'den fazla olmasından dolayı bazı dezavantajlar oluşmuştur. Hadde yönüne dik yöndeki sünekliğin düşük olması, kırılma tokluğunun ve ısı



Şekil 7. Halen kullanılan ve gelecekte de kullanılması planlanan Al-Li alaşımlı parçalar [23]
(Al-Li based alloys currently in use and planned for future use)



Şekil 8. Geçmişten günümüze alüminyum alaşımlarının kullanımı [24]
(The use of aluminum alloys from past to now)

Tablo 2. Havacılık endüstrisinde kullanılan alüminyum alaşımlarının içerikleri [25]
(Chemical composition of aluminum alloys in aerospace industry)

Alaşım	Kimyasal Bileşimi (ağırlıkça yüzde)												Avantajı	
	Li	Cu	Mg	Si	Mn	Zr	Ag	V	Ti	Ni	Fe	Zn		Cr
2014		4,4	0,7	0,7	0,6									Orta mukavemet
2024		4,4	1,5		0,6									Hasar toleransı
2090		2,2	2,7			0,1								Yüksek mukavemetli <u>Al-Li alaşımı</u>
2195		1	4	0,5		0,12	0,4							Kaynaklanabilirliği iyi olan <u>Al-Li alaşımı</u>
2219			6,3		0,3	0,18		0,1	0,06					Kaynaklanabilirliği iyi
2618		2,3	1,6	0,2					0,1	1,1	1,1			Yüksek sıcaklık dayanımı
6013		0,8	1	0,8	0,5									Korozyona dirençli
7010		1,8	2,5			0,13						6,3		Yüksek mukavemetli
7050		2,3	2,2			0,12						6,2		Yüksek mukavemetli
7055		2,3	2,05									8,1		Yüksek mukavemetli
7075		1,5	2,3									5,7	0,2	Yüksek mukavemet ve tokluk
8009				2,4				1,3			8,5			Yüksek sıcaklık dayanımı
8090		2,4	1,3	0,9		0,1								Hasar toleranslı <u>Al-Li</u>

çok direncinin düşük olması bunlardan bazılarıdır [26-28]. Üçüncü nesil Al-Li esaslı alaşımlarda çinkonun etkisiyle statik ve dinamik korozyon dayanımı artırılmıştır [29]. Mevcut durumda F16 savaş uçağında (2297 serisi), Airbus A380 (2196 serisi), Boeing 787 (2099-2199 serileri), Airbus A350 (2098-2198 serileri) uçaklarında yaygın olarak kullanılmaktadır [4].

8090 serisi ikinci nesil Al-Li esaslı alaşımın yoğunluğu, yerine kullanılmakta olduğu 7XXX serisine göre yaklaşık

%10 daha az ve sertliği ise daha yüksektir. ABD, uzay mekiğinin harici yakıt deposunda 2195 serisi Al-Li esaslı alaşım kullanmıştır. Bu harici yakıt deposu daha önceleri 2219 seriden yapılmakta iken, üçüncü nesil 2195 Al-Li esaslı alaşımıyla yapılmaya başlamasıyla beraber 3600 kg'lık bir hafifletme sağlanmıştır [30]. Avrupa'da ise Anglo-Italian EH 101 helikopterlerinde 8090 serisi Al-Li esaslı alaşımın kullanılmasıyla 180 kg'lık bir hafifletme sağlandığı görülmektedir (Şekil 9). EH 101 helikopterlerinin ilk tasarımlarında ve şimdiki tasarımlarında birbirleri yerine

Tablo 3. Ticari Al-Li esaslı alaşımların kimyasal bileşim ve yoğunlukları [4]
(Chemical compositions and densities of commercial Al-Li based alloys)

Alaşım	Kimyasal bileşimi (%)								Yoğunluk (g/cm ³)	Referans
	Li	Cu	Mg	Ag	Zr	Sc	Mn	Zn		
1.nesil										
2020	1,2	4,5					0,5		2,71	Alcoa (1958) (U.S)
1420	2,1		5,2		0,11				2,47	Rusya (1965)
1421	2,1		5,2		0,11	0,17			2,47	Rusya (1965)
2.nesil (Li ≥ %2)										
2090	2,1	2,7			0,11				2,59	Alcoa (1984)
2091	2	2	1,3		0,11				2,58	Pechiney (1985) (FR)
8090	2,4	1,2	0,8		0,11				2,54	EAA (1984)
8091	2,4- 2,8	1,8- 2,2	0,5- 1,2		0,08- 0,16				2,54	
8092	2,1- 2,7	0,5- 0,8	0,9- 1,4		0,08- 0,15				2,53	
8192	2,3- 2,9	0,4- 0,7	0,9- 1,4		0,08- 0,15				0,51	
1440	2,4	1,5	0,8		0,11				2,55	Rusya (1980)
1441	1,95	1,65	0,9		0,11				2,59	Rusya (1980)
1450	2,1	2,9			0,11				2,60	Rusya (1980)
1460	2,25	2,9			0,11	0,0 9			2,60	Rusya (1980)
3.nesil (Li < %2)										
2195	1,0	4,0	0,4	0,4	0,11				2,71	Reynolds (1992)
2196	1,75	2,9	0,5	0,4	0,11	0,35	0,35		2,63	Reynolds (2000)
2297	1,4	2,8	0,25		0,11	0,3	0,5		2,65	Reynolds (1997)
2397	1,4	2,8	0,25		0,11	0,3	0,1		2,65	Alcoa (1993)
2098	1,05	3,5	0,53	0,43	0,11	0,35	0,35		2,69	McCook Metals (2000)
2198	1,0	3,2	0,5	0,4	0,11	0,5	0,35		2,69	Reynolds (2005)
2099	1,8	2,7	0,3		0,09	0,3	0,7		2,63	Alcoa (2003)
2199	1,6	2,6	0,2		0,09	0,3	0,6		2,64	Alcoa (2005)
2050	1,0	3,6	0,4	0,4	0,11	0,35	0,25		2,70	Pechiney (2004)
2296	1,6	2,45	0,6	0,43	0,11	0,28	0,25		2,63	Constellium (2010)
2060	0,75	3,95	0,85	0,25	0,11	0,3	0,4		2,72	Alcoa (2011)
2055	1,15	3,7	0,4	0,4	0,11	0,3	0,5		2,70	Alcoa (2011)
2065	1,2	4,2	0,5	0,3	0,11	0,4	0,2		2,70	Constellium (2012)
2076	1,5	2,35	0,5	0,28	0,11	0,33	0,3		2,64	Constellium (2012)

kullanılan Al alaşımları Tablo 4'te verilmiştir. Ancak servis deneyimlerine göre, kırılma tokluğu ve yorulma özelliklerinden dolayı endişe verici bir durumda olduğu

belirtilmiştir [31]. Şekil 10'da, hava araçlarında mevcut durumda kullanılan Al-Li esaslı alaşımlardan yapılmış parçalar verilmiştir.

Tablo 4. EH 101 helikopterlerinin ilk ve son tasarımda kullanılan malzemeler [4]
(Materials used in the first and final designs of EH 101 helicopters)

İlk üretim hali [32]	Son üretim hali [31]		Kullanım yeri		
	Alaşım	Yerine geçeceği alaşım		Alaşım	Yerine geçeceği alaşım
Sac	8090	2014-T6	8090-T3	2014-T6	Zemin döşeme, dirsek, güçlendirici, çerçeveler, direkler, kirişler, bölmeler
	2091/8090	2014-T6	8090C-T8	2014-T6	Uçuş kontrol sistemleri, burun kapağı, kabin tavan yapıları
	2091/8090	2024-T3	8090C-T81	2024-T3	Uçuş kontrol yapıları, gövde panelleri (alt), kabin tavan çerçeveleri, tavan panelleri
			8090-T84	2024-T42	Z-güçlendirici
Dövme	8090	7010-T7452	8090-T852	7010-T7451	Kabin tavan ve yan çerçeveleri
		7010-T736			
Ekstrüzyon	8090	7010-T7451	8090-T8511	7075-T73511	Çerçeveler, kirişler, bölmeler, kapı rayları, koltuk rayları
		7075-T7411			

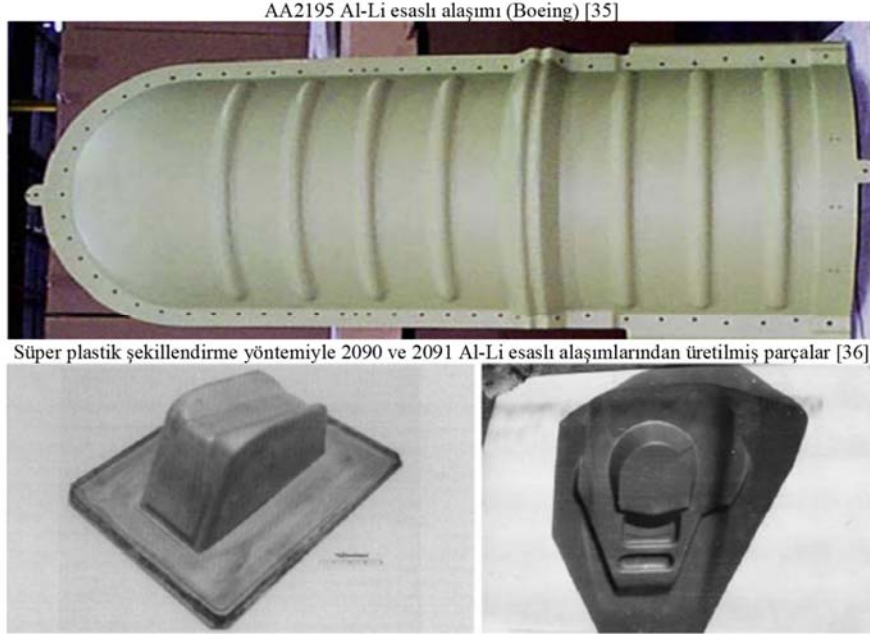
**Şekil 9.** EH 101 helikopteri gövde kısmında Al-Li esaslı alaşım kullanılan bölgeler [33, 34]
(The areas where the Al-Li based alloy are used in the body of the EH 101 helicopter)

Al-Li esaslı alaşımın kullanımına günümüzdeki son örnek ise Comac C919 (China, 2010) dur. Comac C919, Çin Halk Cumhuriyeti tarafından üretilen 158-174 kişilik ilk yolcu uçağıdır. Al-Li esaslı alaşım bu uçağın gövdesinde kullanılmıştır. Şekil 11 de Comac C919 ve Şekil 12 de de Airbus A380 uçaklarına ait Al-Li esaslı alaşımdan imal edilen yapısal parçalar gösterilmektedir.

Tablo 5'te ise hâlihazırda kullanılmakta olan alüminyum alaşımları ve yerlerine geçmesi planlanan üçüncü nesil Al-Li esaslı alaşımlar verilmiştir. Üçüncü nesil Al-Li esaslı alaşımlar yolcu uçaklarının birçok bölgesinde kullanılarak hafiflik sağlaması beklenmektedir. Bu doğrultuda yolcu uçaklarında Al-Li esaslı alaşımlardan üretilen parçaların kullanılması önerilen bölmeler ve alaşım serileri Şekil 13'te gösterilmiştir [4].

2.2. Mekanik Özelliklerin Karşılaştırılması (Comparison of Mechanical Properties)

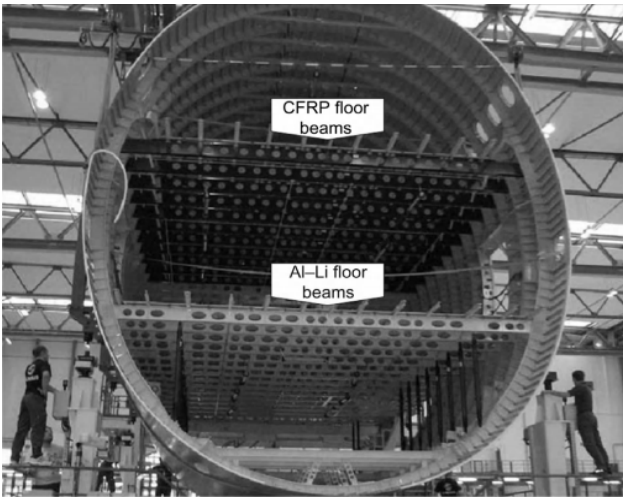
Alüminyum alaşımlarına lityumun eklenmesi farklı süneklik-mukavemet kombinasyonlarını da beraberinde getirmektedir. Farklı kimyasal bileşime sahip Al-Li esaslı alaşımların mekanik özelliklerindeki değişim, Şekil 14'te görülmektedir [39]. Şekilden de görüleceği üzere en iyi mekanik özelliklere Al-Li-Cu-Mg-Zr alaşımının sahip olduğu görülmektedir. Bunlar genellikle ikinci nesil Al-Li esaslı alaşımlardır. Üçüncü nesil Al-Li esaslı alaşımlar da aynı bileşime sahiptir (Al-Li-Cu-Mg-Zr) fakat lityum içeriği düşüktür. İkinci nesil Al-Li esaslı alaşımların incelendiği bir çalışmada elde edilen sonuçlar Tablo 6'da verilmiştir. Hafifliğine ilaveten çoğu çelikten bile daha fazla çekme mukavemetine sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 10. Al-Li esaslı alaşımdan üretilmiş çeşitli uçak parçaları [35, 36] (Various aircraft parts made of Al-Li based alloys)



Şekil 11. Al-Li esaslı alaşım ile gövdesi üretilen Comac C919 uçağı [37, 38]
(The body of Comac C919 aircraft manufactured from Al-Li based alloy)



Şekil 12. Airbus A380 uçağında 3.nesil Al-Li esaslı alaşımın kullanımı [4]
(The use of 3rd generation Al-Li based alloy on Airbus A380)

2090 alaşımı, 7075-T6 (yüksek mukavemet) alaşımının yerine geçmesi için üretilmiş bir alaşımdır. 7075-T6 alaşımından %8 daha az yoğunluğa ve %10 daha fazla sertliğe sahiptir. Aynı zamanda deniz ortamında 7075-T6 alaşımından daha fazla korozyon direncine sahiptir [40]. 2091 alaşımı, 2024-T3 (hasar toleransı iyi) yerine geçmesi için üretilmiş bir alaşımdır. 2024-T3 alaşımından %8 daha az yoğunluğa, %7 daha fazla elastisite modülüne ve yüksek hasar toleransına sahiptir [40]. 8090 ticari Al-Li esaslı alaşım ise 2014-T6 (Orta/Yüksek mukavemet) serisi alaşımların yerine kullanılması planlanan bir alaşımdır. 2014-T6 alaşımından %10 daha az yoğunluğa ve %11 daha fazla elastisite modülüne sahiptir [40]. 8092 Al-Li esaslı alaşım ise yüksek korozyon direncine sahip olan 7075-T73 alaşımı yerine kullanılması için üretilmiştir [4]. 8090-T3 Al-Li esaslı alaşımda kaynaklanabilirliğin araştırıldığı bir çalışmada birleştirme verimi (kaynak mukavemetinin ana metalin mukavemetine oranı) 0,67 olarak hesaplanmıştır. İlaveeten, kaynak çevresinde oluşan ısıdan etkilenmiş bölge, istenmeyen metalürjik değişimlere sebep olmuştur [41].

Tablo 5. Geleneksel alüminyum alaşımları ve yerlerine geçmesi planlanan üçüncü nesil Al-Li esaslı alaşımlar [4].
(Traditional aluminum alloys and 3rd generation Al-Li based alloys are planed to replace them)

Ürün	Eski kullanım	Yeni kullanım	Kullanım yeri
Sac	2024-T3	2098-T851	Gövde, kabin yüzeyi
	2524-T3	2198-T8	
	2524-T351	2199-T8E74	
		2060-T8E30	
	2024-T351	2199-T86	Kanat altı kaplaması
	2324-T39	2050-T84	
	2624-T351	2060-T8E86	
	2624-T39		F-16 gövde paneli
	2024-T62	2098-T82P	
	2124-T851	2297-T87	F-16 gövde bölmeleri
	2397-T87		
Levha	7050-T7451		İç gövde yapıları
	7X75-T7XXX	2099-T86	
	7150-T7751	2050-T84	Kanat üstü kaplaması
	7055-T7751	2055-T8X	
	7055-T7951	2195-T82	
	7255-T7951		İç kiriş ve direkler
	7050-T7451	2050-T84	
	2219-T87	2195-T82/T84	Kriyojenik tankları
Dövme	7175-T7351	2050-T852	Kanat kabin birleştirme parçaları, pencere çerçeveleri
	7050-T7452	2060-T8511	
	2024-T3511		Kanat altı kirişleri ve gövde kirişleri
	2026-T3511	2099-T81	
	2024-T4312	2076-T8511	
	6110-T6511		
Ekstrüzyon	7075-T73511		Gövde/Kabin kirişleri, çerçeveleri, A380 zemin kirişleri ve koltuk rayları
	7075-T79511	2099-T83	
	7150-T6511	2099-T81	
	7175-T79511	2196-T8511	
	7055-T77511	2055-T8E83	
	7055-T79511	2065-T8511	

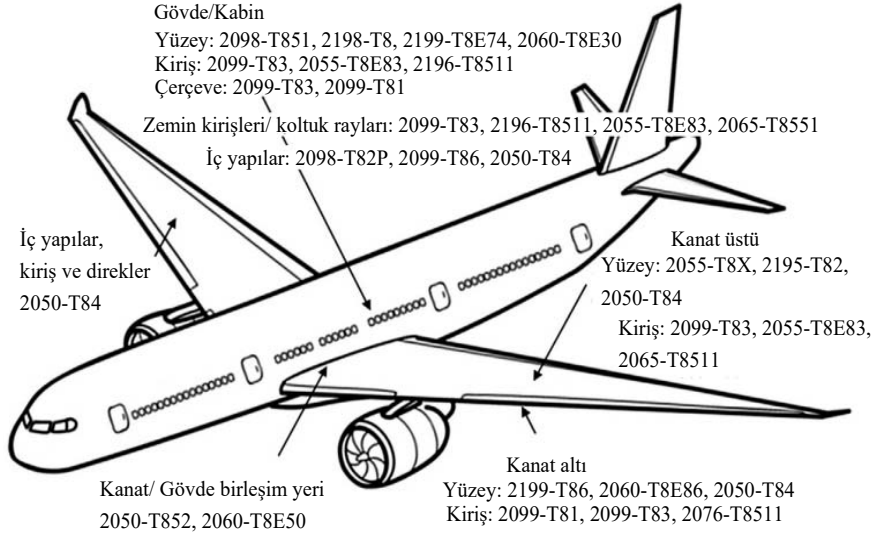
Ancak bazı uygulamalarda da kullanılan dolgu teline göre, kaynak edilecek parçalara göre, kaynak metoduna göre mekanik özelliklerin arttığı da görülmektedir. Kaynağın farklı Al-Li esaslı alaşımlarda mekanik özellikler üzerine etkisi Tablo 7’de verilmiştir. Kaynaksız değerler, ana malzemelerin kaynak yapılmadan önceki ortalama değerleridir.

Şekil 15’te özgül mukavemet (mukavemet/yoğunluk) ve özgül tokluk (tokluk/yoğunluk) değerlerine bakıldığı zaman, bu değerlerin yıllara göre giderek artış gösterdiği anlaşılmaktadır. Son olarak Al-Li esaslı alaşımın kullanıldığı Comac C919 yolcu uçağıyla birlikte bu artış miktarının da arttığı görülmektedir. Bunun sonucunda hafifleme miktarı da artmaktadır.

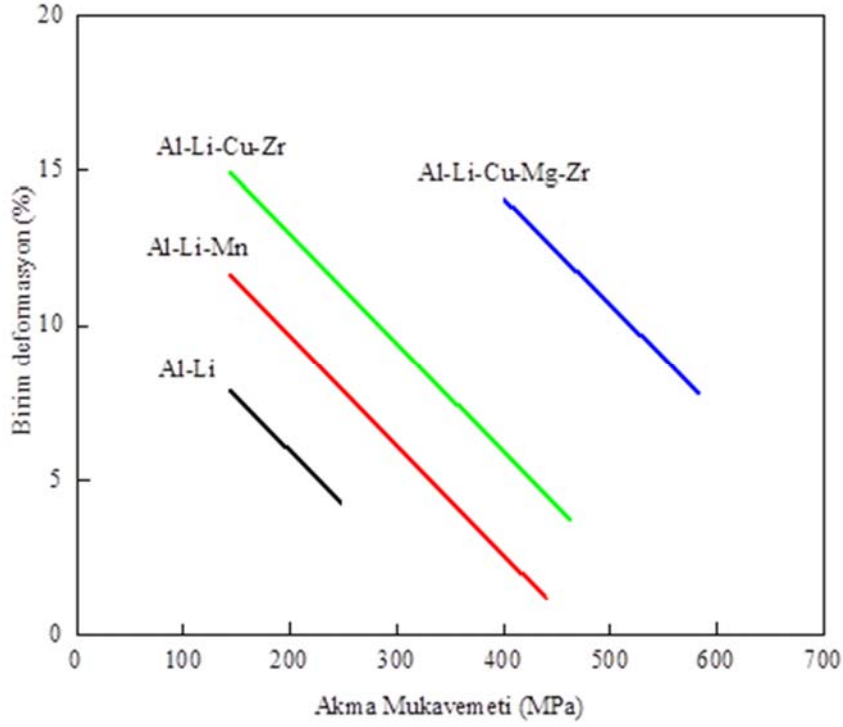
Havacılık alanında kullanım potansiyellerini ifade ettiğimiz alaşımın mekanik özellikleri aşağıda her biri farklı yapısal parçalar olmak üzere dört farklı alt başlık altında karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

2.2.1. Gövde (Body)

Al-Li esaslı alaşımlardan olan 2199-2060 alaşımları, uçak gövdesinde kullanım alanı bulmaktadır zira gövde tasarımlarında yüksek mukavemet özelliklerinin yanı sıra yorulma çatlak direncinin de çok yüksek olması gerekmektedir. Kullanılmakta olan geleneksel alaşımlara göre en başta daha yüksek yorulma dayanımı olmak üzere mukavemet ve hafiflik açısından da büyük kazançlar sunmaktadır. Şekil 16’da AL-Li esaslı alaşımlar (2199-2060)



Şekil 13. Yolcu taşımacılığında kullanılması önerilen Al-Li esaslı alaşımlardan üretilmiş parçalar [4]
(Recommended Al-Li based alloys for parts of passenger aircraft)



Şekil 14. Çeşitli Al-Li esaslı alaşımların akma mukavemeti-birim deformasyon değerlerindeki değişimler [39]
(Changes in yield strength-elongation values of various Al-Li based alloys)

ile geleneksel alüminyum alaşımının (2523-T3); yoğunluk, çekme, akma mukavemeti, elastik modülü, kırılma tokluğu ve yorulma çatlak büyüme direnci bakımından karşılaştırması verilmiştir [44]. Bu grafiğe göre:

- 2199 serisi Al-Li esaslı alaşım %5 yoğunluğu daha az ve yorulma çatlak büyüme direnci yüksek bir malzemedir.
- 2060 serisi Al-Li esaslı alaşımın yoğunlukta %2 azalma ve daha fazla mukavemet, kırılma tokluğu sağladığı görülmektedir.

- Her iki Al-Li esaslı alaşım da geleneksel alüminyum alaşımına göre daha iyi mekanik özellik sunmaktadır.

2.2.2. Gövde kirişleri ve çerçeveleri (Body beams and frames)

2055-2099 alaşımları, uçak gövdesinin destekleme elemanları olarak kullanılmaktadır. Kullanım alanı gereğince yüksek basma-çekme mukavemet özellikleri sağlaması gerektiğinden dolayı günümüze kadar 7055 ve 2024 serileri kullanılmamıştır. Şekil 17'de ekstrüzyon

Tablo 6. Ticari Al-Li esaslı alaşımların mekanik özellikleri [40] (Mechanical properties of commercial Al-Li based alloys)

Alaşım	Yoğunluk (g/cm ³)	Toplam uzama (%)	Elastik Modülü (GPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Hadde yönünde K _{1c} (MPa√m)
2090	2,59	3-6	76	500	44
2091	2,58	6	75	550	>130
8090	2,55	4-5	77	480	75

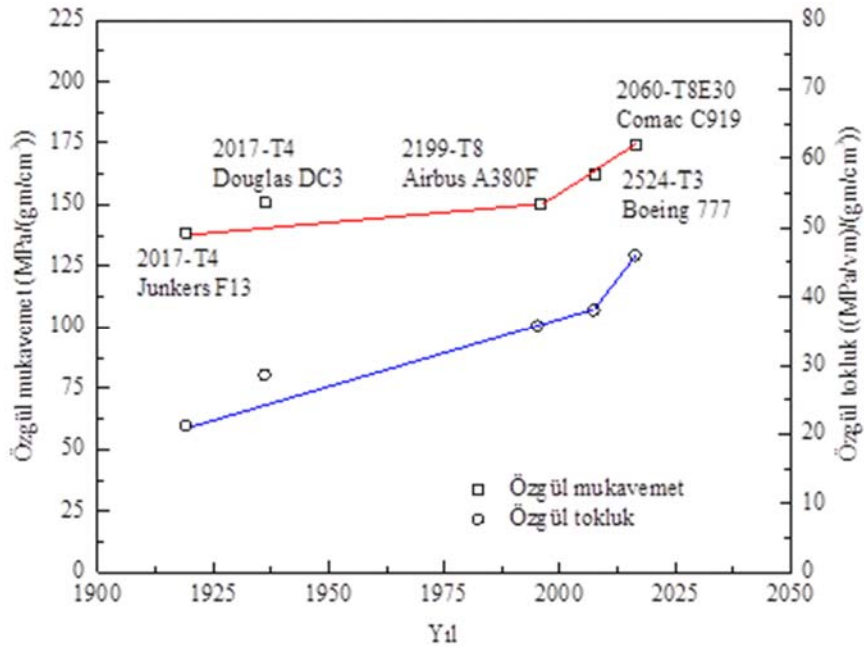
Tablo 7. Al-Li esaslı alaşımlarda kaynakların mekanik özelliklere etkileri (The effects of weldings on the mechanical properties of Al-Li based alloys.)

Kaynaklanacak malzemeler	% Uzama		Akma Muk. (MPa)		Çekme Muk. (MPa)	
	Kyn.'lı	Kyn.'sız	Kyn.'lı	Kyn.'sız	Kyn.'lı	Kyn.'sız
8090-T3/8090-T3 [41] (*)	4,72	18,86	140,2	209,93	229,8	334,4
2060-T8/2099-T83 [42] (**)	3,8	1,7	388,5	304,5	411,5	391,7
2060-T8/2099-T83[43] (***)	4,8	2,1	70,0	62,1	179,8	89,4

(*) Tungsten asal gaz (TIG), dolgu teli %5Mg

(**) Nd:YAG (neodim doped yttrium aluminum garnet) lazer ile 2000 W 350 A elektrik ark hibrit kaynak, dolgu teli CW3 (Al-6.2Cu-5.4Si)

(***) Nd:YAG lazer ile 2000 W 350 A elektrik ark hibrit kaynak, dolgu teli AA4047 (Al-12Si)



Şekil 15. Gövde yapımında kullanılan 2XXX seri alüminyum alaşımlarının özgül mukavemet ile tokluklarının yıllara göre değişimi [44] (Variation of specific strength and toughness of 2XXX series aluminum alloys used in body construction with respect to years)

yapılmış Al-Li esaslı alaşımlar ile geleneksel alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin karşılaştırması verilmiştir [44].

Geleneksel 7055 serisi yerine 2055 serisi Al-Li esaslı alaşım kullanıldığında, mukavemet değerlerinin aynı olmasına rağmen %5 yoğunluk azalımı olduğu görülmektedir. Geleneksel 7055 serisi yerine 2099 kullanıldığında, %7 yoğunluk azalımı sağlanırken dayanım ise düşmektedir. Her iki Al-Li esaslı alaşımın basmadaki elastisite değeri geleneksel alüminyum alaşımınınkinden fazladır. Her iki Al-Li esaslı alaşımda korozyon direnci 7055 serisinden daha fazladır.

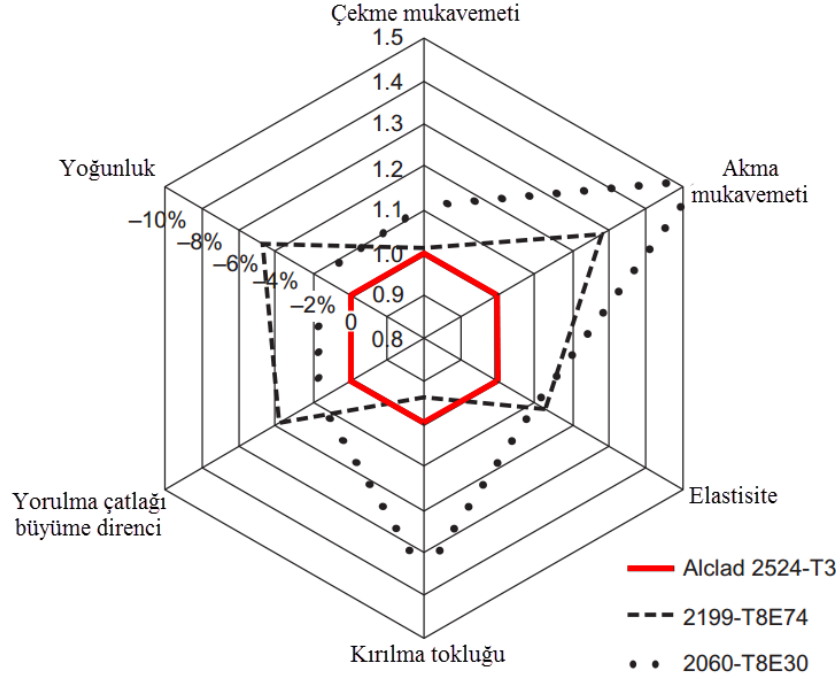
288

Çerçevede kullanılan 2024-T42 alaşımı yerine farklı ısı işlem uygulanmış 2099-T83/81 karşılaştırıldığında her ikisi de %5,4 oranında yoğunluk azalımı sağladığı görülmektedir. Buna rağmen mukavemet değerleri daha iyi durumdadır.

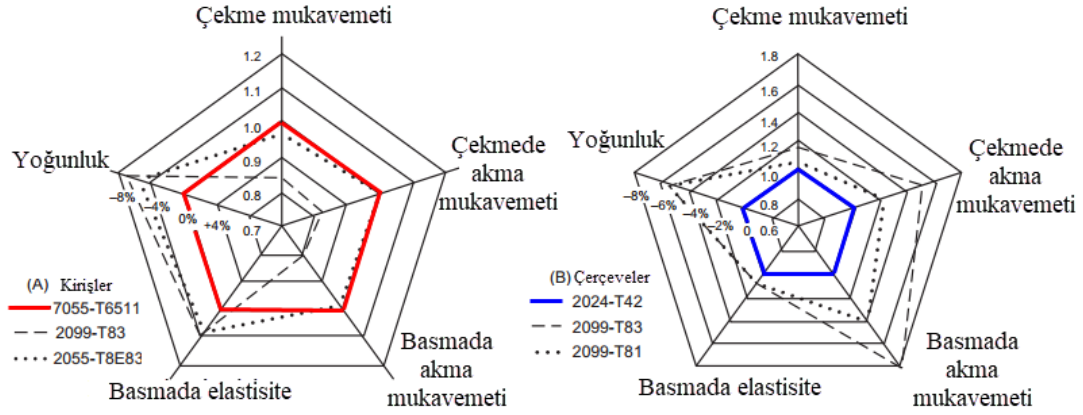
Şekil 18 ve 19'da kanat ve bir gövde de Al-Li esaslı alaşımdan üretilmesi mümkün olan elemanlar gösterilmiştir.

2.2.3. Kanat üstü yapılar (Upperside constructions of the wing)

Kanat üstü yapıların basma mukavemetinin yüksek, burulmaya karşı dirençli ve kırılma tokluğunun yüksek



Şekil 16. Gövdede kullanılan AL-Li esaslı alaşımlarla geleneksel alüminyum alaşımının özellik karşılaştırması [44]
(Comparison of characteristics of conventional aluminum alloy with AL-Li based alloys used on the body)



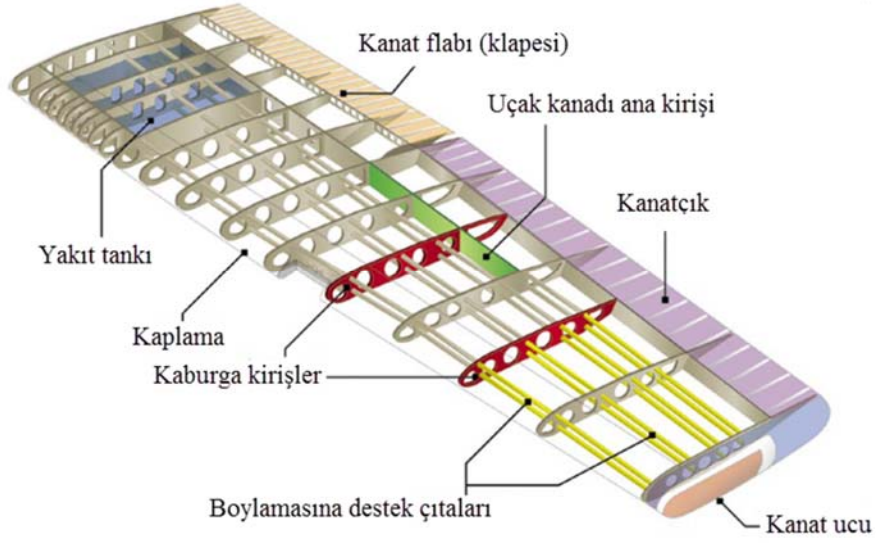
Şekil 17. Ekstrüzyon ile üretilmiş Al-Li esaslı alaşımlarıyla (2099-T83, 2055-T8E83) geleneksel alüminyum alaşımının (7055-T6511) karşılaştırması [44]
(Comparison of conventional aluminum alloy (7055-T6511) with extruded Al-Li based alloys (2099-T83, 2055-T8E83))

olması gereklidir [47]. Şekil 20'de 7XXX seri geleneksel alüminyum alaşımı ile yerine geçmesi planlanan Al-Li esaslı alaşımların özgül akma mukavemetiyle elastisite modülünün yıllara göre değişimi verilmiştir. Burada yıllara göre genel bir artış trendi var iken Al-Li esaslı alaşımın kullanılmasıyla beraber bu trend daha çok artmıştır. 7055-T7751 ve 7255-T7751 yaklaşık benzer özellikler gösterirken, 7075-T7651'e göre çekme, basmadaki akma mukavemeti ve kırılma tokluğu büyük ölçüde (%25-30) daha yüksektir (Yoğunluğu yaklaşık %2 fazladır). Şekil 21'e bakıldığında, yeni nesil Al-Li esaslı alaşımlardan olan 2055'in hemen hemen bütün özellikleri aynı iken yoğunluğunun yaklaşık %6 daha az olduğu görülmektedir. Bu da önemli bir orandır. Şekil 22'de

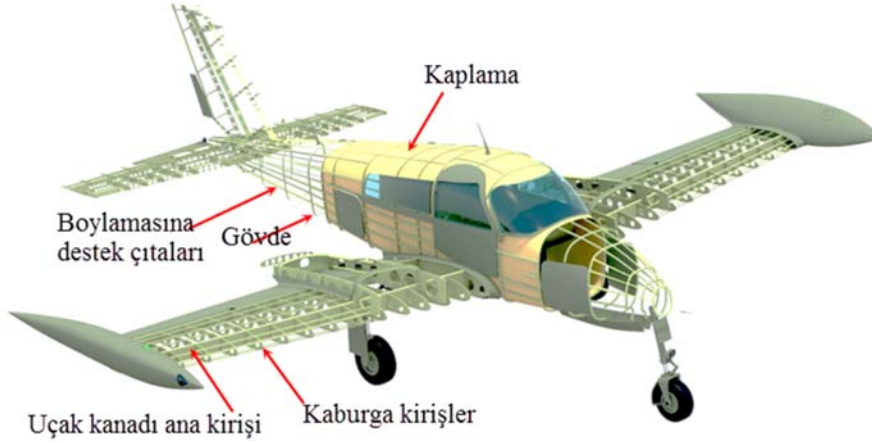
geleneksel ekstrüzyon ile üretilmiş 7XXX serisi ile Al-Li esaslı alaşımların karşılaştırması yapılmıştır. 2055 Al-Li esaslı alaşımın, 7XXX serisine göre yoğunluğu yaklaşık %6 daha az ve kırılma tokluğu ile basmadaki elastisite modülü daha fazladır.

2.2.4. Kanat altı yapılar (Structures under a wing)

Yolcu uçakları kanat altı kaplamalarının malzemeleri optimum mukavemet ve hasar toleransına sahip malzemeler olması gerekmektedir. Burada geleneksel 2X24 serisi alaşımlar doğal yaşlandırılmış (T3XX) durumda kullanılırlar. Ancak şu anda üç adet Al-Li esaslı alaşım bu



Şekil 18. Bir uçağın kanadını oluşturan alt parçalar [45] (Parts of the wing of a plane)



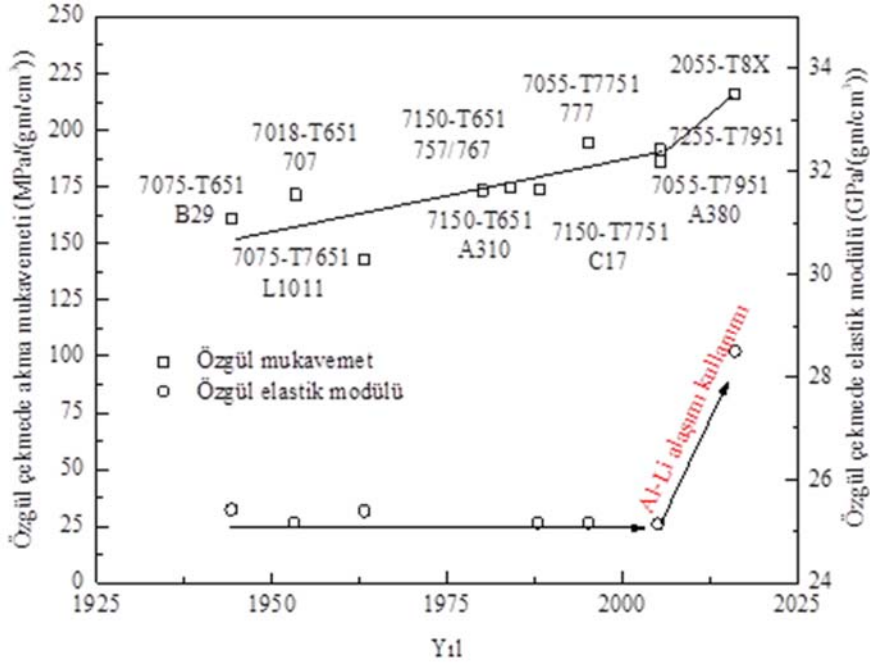
Şekil 19. Bir uçak gövdesindeki yapısal parçalar [46] (Structural parts of an aircraft body)

malzemelerin yerine adaydır (2199-T86, 2060-T8E86, 2050-T84). 2199 ve 2060 serisi levha Al-Li esaslı alaşımlar bu iş için özel olarak geliştirilmiştir [48]. 2050 serisi ise 7050-T7451 alaşımının yerine kullanılmak için geliştirilmiştir [49, 50]. Şekil 23'te 2199-T86 Al-Li esaslı alaşımın geleneksel 2024 ve 2624 serisi alaşımlarla kıyaslaması verilmiştir. Yaklaşık %5 oranında yoğunluk azalması sağlanırken daha fazla mukavemet, kırılma tokluğu ve yoruma çatlak direnci sağladığı görülmektedir. Aynı şekilde 2060-T8E86 Al-Li esaslı alaşımın geleneksel 2324 ve 2624 yerine kullanılmasıyla yaklaşık %2 yoğunluk azalımı, daha fazla mukavemet, kırılma tokluğu ve yoruma çatlak direnci sağlandığı görülmektedir [48].

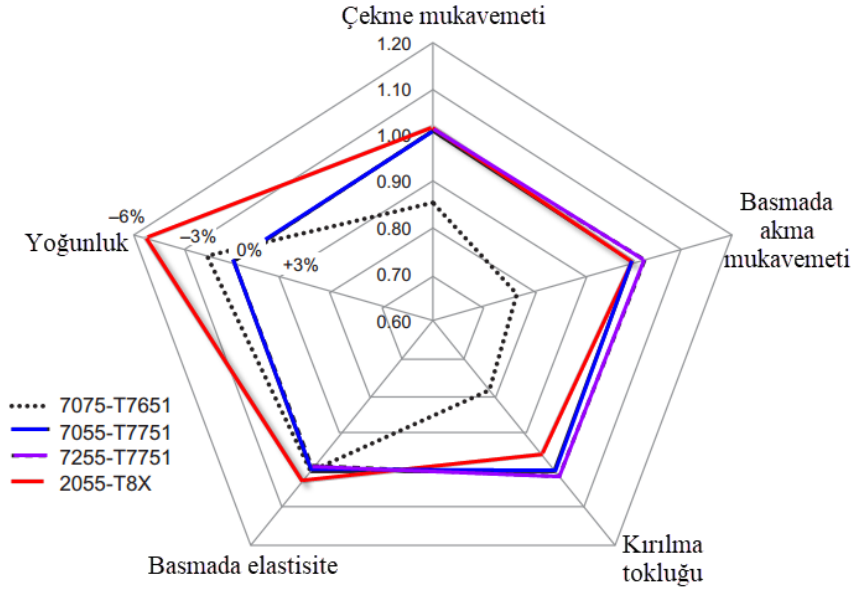
Uçuş sayısına (simülasyon sonucu) bağlı olarak parçalarda oluşan çatlak uzunluğunun araştırıldığı bir çalışmada geleneksel 2X24 serisi ile yerine geçmesi planlanan 2199 ve 2060 serisi Al-Li esaslı alaşım kullanıldığında aynı çatlak uzunluğuna daha fazla sayıda uçuşun yol açacağı tahmin edilmektedir (Şekil 24) [48].

3. İÇYAPI VE KAYNAK KABİLİYETİ (MICROSTRUCTURE AND WELDING ABILITY)

İçyapı incelemelerinde sıklıkla kullanılan optik mikroskoplar, tane sınırındaki yanlış yönlendirmeleri açığa çıkarmadığı için yeterli olamayabilmektedir. Bu nedenle elektron geri saçılım kırınımı (EBSD) tekniğinin kullanılması daha uygun olmaktadır. Alaşımların faz diyagramları, içerik değişikliklerinin nihai mikro yapı üzerindeki etkilerini görselleştirmek için önemli bir araçtır. Al-Li esaslı alaşımlarda, Li içeriği alaşımın sünekliğini düşüren temel faktördür. Bunun ana nedeni de δ' (Al_3Li) fazıdır. Bu fazdaki taneciklerin düzlemsel biçimde kayması nedeni ile gerilme yığılmaları oluşur, süneklik düşer. Şekil 25'te fazların adlandırılmaları bir Al-Li ikili denge diyagramında gösterilmiştir. İkili alaşımda α -Al, δ (AlLi), δ' (Al_3Li), α -Li gibi fazların oluştuğu görülmektedir. Li elementi alaşımın mukavemetini artırmak, yoğunluğunu azaltmak için ilave edilir [51]. Sünekliği iyileştirmek için Al-Li esaslı alaşımların içerisine döküm esnasında bazı alaşım



Şekil 20. 7XXX serisi ile 2055-T8X Al-Li esaslı alaşımların yıllara göre kıyaslaması [47]
(Comparison of 7XXX series and 2055-T8X Al-Li based alloy)

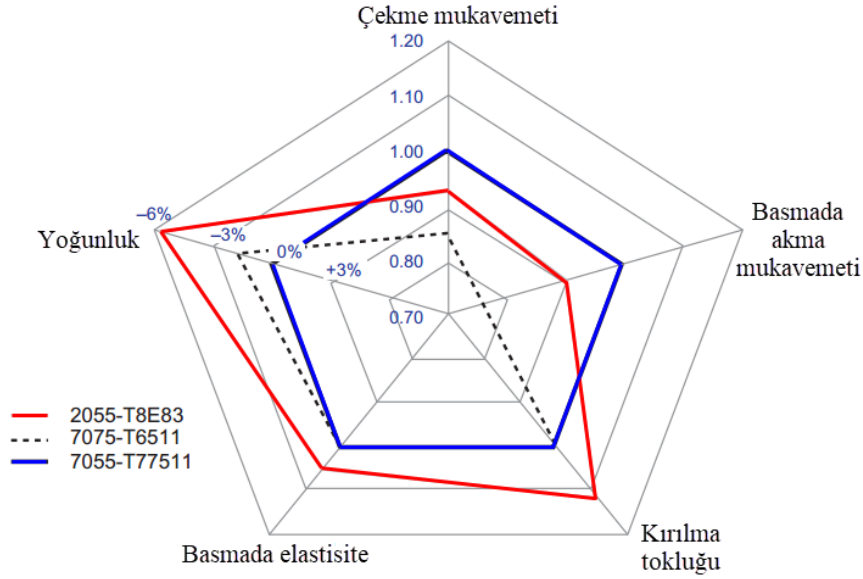


Şekil 21. Kanat üstü yapılarında levha biçiminde kullanılan geleneksel ve Al-Li esaslı alaşımların mekanik özellikleri [47]
(Mechanical properties of conventional and Al-Li based alloys used in the sheet form on the upper side structures of a wing)

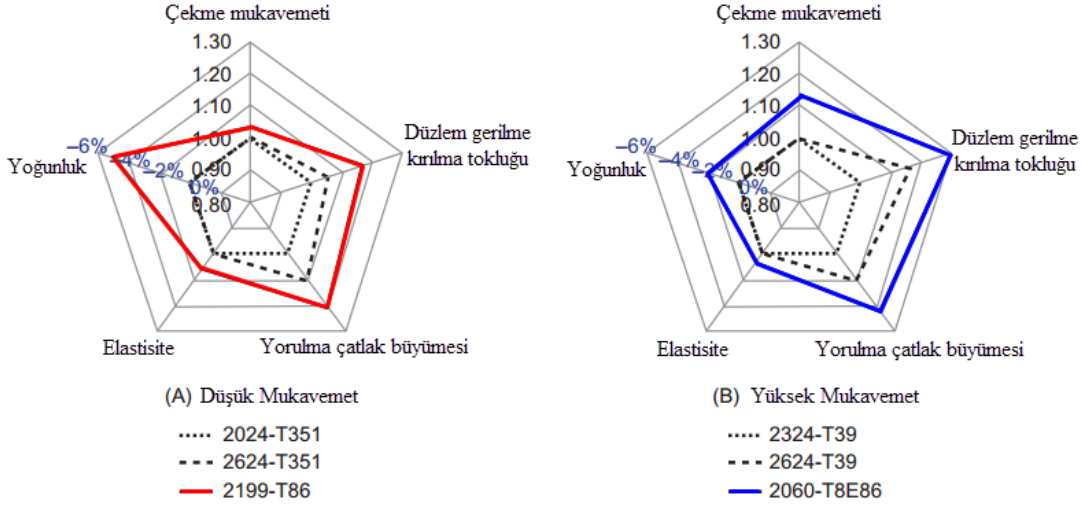
elementleri katılmaktadır. Bakır ilavesi mukavim olan θ' ($\sim\text{Al}_2\text{Cu}$) ve T_1 (Al_2CuLi) çökeltileri oluşturmak için, tokluğu artırıcı T_2 (Al_6CuLi_3) çökeltileri oluşturmak için yapılır. T_1 fazı; tane sınırında, tane altı sınırlarında ve dislokasyonların üzerinde heterojen bir şekilde çekirdeklenir. T_2 fazı ise tane sınırlarında şekillenir ancak tane sınırlarında fazlaca çökelme olması, tokluğu azaltır. Ancak bu faz T_1 fazına göre daha iyi yapışma ve plastik özelliklere sahiptir. Örneğin, Al-3Li-2Cu-0,2Zr alaşımı içerisinde klasik θ (Al_2Cu) ve T_2 (Al_6CuLi_3) fazları

bulunmaktadır [53]. Dengesiz katılaşma neticesinde az miktarda T_1 (Al_2CuLi) metaller arası fazı da oluşur.

Al-Li esaslı alaşımlara Zr ve Sc katkıları, hem tane boyutunu incelten hem de tane sınırlarında Al-Zr-Sc-Li içerikli çökeltiler oluşturarak, tane çekirdeği ile tane sınırının birbirlerine tutunmalarını daha da kuvvetlendiren bir uygulamadır. Bu durum, plastik deformasyon sırasında dislokasyonların ilerlemesi sureti ile kayma oluşumuna dirençli bir yapı oluşturur. Oluşan β' (Al_3Zr) fazı, yeniden



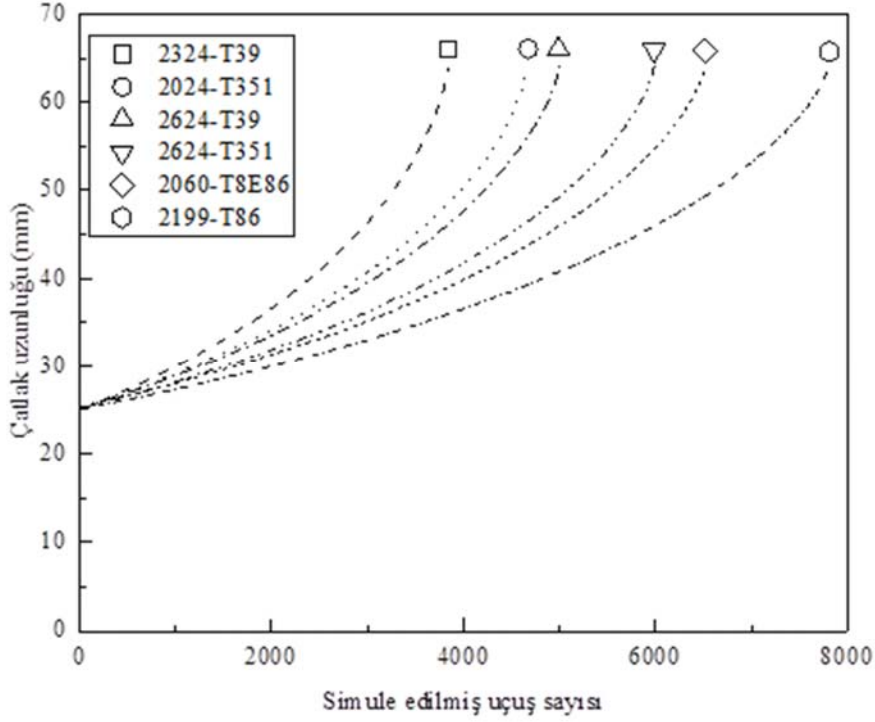
Şekil 22. Ekstrüzyon ile üretilmiş geleneksel ve Al-Li esaslı alaşımlarının özellikleri [47]
(Properties of conventional and Al-Li based alloys produced by extrusion)



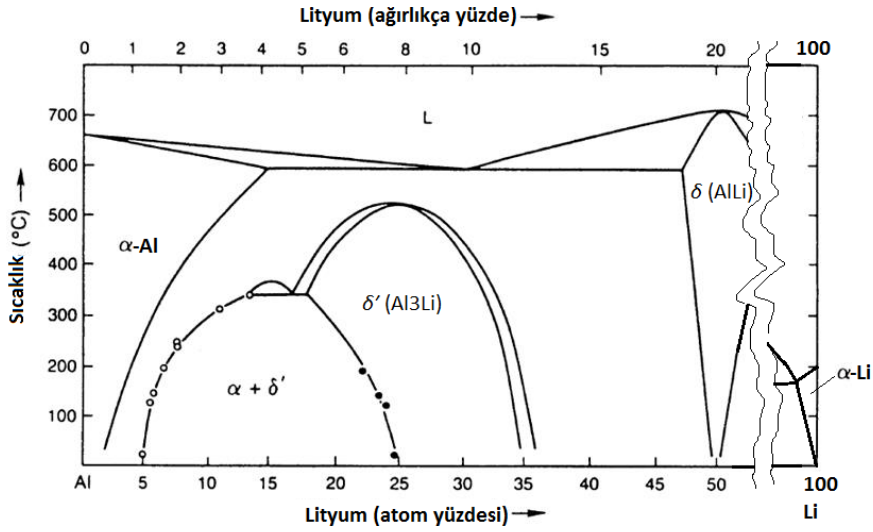
Şekil 23. 2X24-T3XX alaşımları ile Al-Li esaslı alaşımların karşılaştırması [48]
(Comparison of Al-Li based alloys with 2X24-T3XX alloys)

kristallenmeye direnç gösterir [54]. Düşük sünekliği nedeni ile Al-Li esaslı alaşımlar diğer alaşımlara kıyasla Fe elementine daha duyarlıdır. Bu nedenle, Al-Li-Cu alaşımlarına mangan (Mn) ilavesi, sünekliği arttırmada, demirin zararlı etkisini nötrlemede ve tane büyümesine engel olmada kullanılan bir yöntemdir. Mn, bakırlı alaşımlarda $Al_{20}Cu_2Mn_3$ fazı oluşturur ki bu katı çökeltiler, dislokasyonlar tarafından oluşturulacak kaymaya karşı dirençlidir ve çökeltme esnasında tane büyümesini de büyük oranda engeller. Böylece de homojenize kayma ve dolayısıyla da yüksek hasar toleranslı yapı elde edilmesinde rol oynar. Mn içerikli çökeltiler, soğutma-ısıtma işlemi esnasında tane büyüklüğünü kontrol etmede ve mikroyapı değişiklikleri oluşturmada faydalıdır. Ancak belirli bir

seviyenin üzerinde mangan ilavesi ise bakır miktarını azaltmakta (çökelti oluşturarak), yaşlanmayı olumsuz etkilemektedir [55]. Alaşımın içerisinde Mn ilave edildiğinde fazlardan T_B ($Al_{7.5}Cu_4Li$) fazı oluşur. T_B fazı peritektik reaksiyonlar sonucunda oluştuğu için, miktarı oldukça düşüktür. Mn ilavesi; birincil katı çökelti fazlarını oluşturduğu için ve bu faz oluşumları da çökeltme esnasında tane büyümesine engel olabildiğinden dolayı, içyapıdaki tane boyutunu küçültmektedir. Mn ilavesinin akma mukavemeti üzerinde büyük etkisi yokken, sünekliği azaltıcı etkisi olmaktadır. Ancak yaşlandırma işlemi uygulanırsa, Mn artığında akma mukavemeti de artmaktadır. Ancak mangan bakırı bağladığından dolayı, çökelti içerisinde bakırca zengin katı çökeltilerin yoğunluklarını arttırmakta ve



Şekil 24. 2X24-T3XX ile 2199 ve 2060 Al-Li esaslı alaşımlarda uçuş sayısına bağlı çatlak uzunluğu [48]
(The crack length of 2X24-T3XX and 2199 and 2060 Al-Li based alloys based on the number of flights)

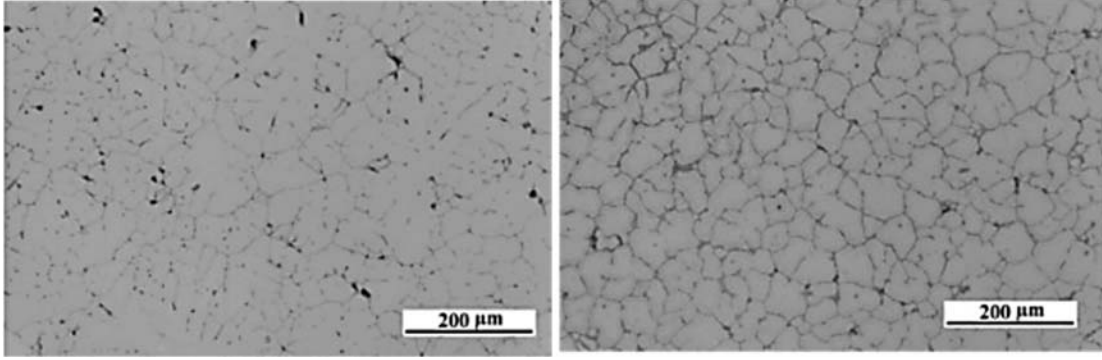


Şekil 25. Al-Li ikili denge diyagramı (An Al-Li phase diagram) [52]

bu da diğer kısımlarda çökelti için gereken bakır konsantrasyonu azalmakta, yaşlanmayı geciktirmektedir. Şekil 26'da Mn katılan dökme Al-3Li-2Cu-0,2Zr alaşımının optik mikro yapılarının kıyaslaması bir örnek olarak verilmiştir. Mn içermeyen alaşımla karşılaştırıldığında, Mn ihtiva eden alaşımın tane boyutunun daha ince olduğu görülmektedir. Bunun sebebi $Al_{20}Mn_3Cu_2$ katı çökeltilerinin yapısal olarak katılma noktasını bir miktar aşağıya çekmesi ve çökeltme esnasında tane büyümesini engellemesidir. İmal usulleri açısından değerlendirildiğinde, esasen dövülmüş Al-Li esaslı alaşımlar, döküm muadillerine göre üstün mekanik özelliklere sahiptir. Ancak döküm ise

karmaşık şekillere sahip ürünler üretmenin sadece düşük maliyetli bir yolu değil aynı zamanda mekanik özelliklerin anizotropisini azaltmak için de etkili bir yoldur [4].

Sertlik açısından değerlendirildiğinde ise T_1 nano çökeltilerin Al alaşımlarının sertleşmesinde büyük katkı sağladığı görülmektedir. Ayrıca yaşlanma süresinin artması da sertliği artırmaktadır. Havacılık alanında perçinleme yerine Al-Li alaşımlı parçaların kaynak yoluyla birleştirilmesi, nispeten düşük maliyetle ağırlığı önemli ölçüde azalttığı için ve daha az gerilme konsantrasyonuna sahip bağlantılar sağladığı için önem arz etmektedir. Al-Li



Şekil 26. Manganez ilavesinin mikro yapıya etkisi [55] a) %0; b) %1,2 (Effect of manganese addition on microstructure)

esaslı alaşımlar, kaynak dikişinde metalürjik çatlaklara meyilli olduğundan dolayı, çatlak oluşumunu önlemek için ilave bir dolgu teliyle kaynak yapılmalıdır. Çift taraflı lazer ışını kaynağı, uçak gövdesi panelleri üzerine *T*-mafsalları kaynatmak için kullanılan bir yöntemdir. Ancak yüksek sıcaklıkta kırılma hassasiyeti oluşması ve kaynak içindeki düzensiz dağılımlar gibi nedenlerle, kaynak parametrelerinin ve dolgu teli içindeki alaşım elementlerinin dikkatli seçilmesi gereklidir. Dolgu telleri, çatlak oluşumunu önlemek için yüksek Si içeriğine sahiptirler. Bunlardan biri AA4047 (Al-12Si) dolgu telidir. AA4047 kullanıldığında sıradan kaynak bölgelerine ilaveten EQZ (dentritik olmayan eş eksenli bölge) oluşmaktadır. Özellikle çevresel çekme yüklemeleri durumunda bu tür mikro yapılarda taneler arasında çatlaklar oluşmakta ve bu çatlaklar büyümektedir. Bu nedenle eş eksenli tane bölgesi çatlak ve kırılmaların en çok başladığı yerdir. Eş eksenli tane tipi mikro yapı, füzyon bölgesi ve kısmi ergime bölgesi arasında kalan yapılardır. Ancak dolgu teli olarak CW3 (Al-6.2Cu-5.4Si) un kullanılması ile düşük eş eksenli tane ve çatlaksız bir kaynak bölgesi elde edilmiştir. Her iki kaynak telinin kullanımında da mekanik özelliklerin (kaynak mukavemeti, akma sınırı, uzama miktarı) arttığı görülmektedir. CW3 kullanıldığında eş eksenli tane bölgesi içerisindeki taneler arası ana çökelti *T* (Al-Li-Si) fazından *T*₂ (Al₆CuLi₃) fazına dönüşmektedir. Bu faz *T* fazına göre daha iyi yapışma ve plastik özelliklere sahiptir [43]. Otojen (dolgu teli kullanılmayan) lazer kaynağında, kaynak bölgesinde hem genişlik ve hem de kalınlık yönünde mikro yapısal homojenlik elde edilebilmektedir [56]. Otojen kaynakta mukavemet artışı, dolgu teli kullanılabildiğine göre daha yüksektir. Dolgu telli kaynaklarda kabarcıklar, çatlaklar için bir başlangıç noktası olmaktadır, otojende ise çatlaklar, füzyon bölgesinde başlayıp eş eksenli tane bölgesine doğru yayılmaktadır.

Gaz altı ark sistemi ile birlikte kullanılan hibrit lazer kaynaklarında, lazer enerjisinin yüksek ve ark enerjisinin düşük olduğu uygulama, daha derin nüfuziyet ve daha dar ısıdan etkilenen bölge (ITAB) oluşturmaktadır.

Füzyon kaynakları ile Al-Li alaşımları kaynatmak, sıcak çatlama ve gözeneklilik gibi katılaşma kusurları nedeniyle zordur. Bu nedenle, sürtünmeli karıştırma kaynağı (FSW) daha tercih edilen bir yöntemdir. Çünkü erime ve katılaşma işlemleri esnasında yüksek ısı girdisinin bulunmaması

nedeniyle, gaz boşlukları ve katılaşma çatlakları ortadan kalkmakta ve mekanik özellik kaybı, füzyon kaynak tekniklerinden çok daha az olmaktadır. Bu nedenle FSW yöntemi, Al-Li esaslı alaşımların bağlantılarını yapmada önde gelen uçak üreticileri tarafından gövde ve kanat imalatı için kilit bir teknoloji olarak tanımlanmaktadır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Azaltılmış yoğunluk, artan elastik modülü ve aynı zamanda özgül dayanım ve sertliğin önemli ölçüde iyileştirilmesi gibi dikkate değer avantajları olan Al-Li esaslı alaşımlar, geleneksel 2XXX ve 7XXX serisi yüksek mukavemetli Al alaşımlarının yerine kullanılmaya başlanmıştır. Havacılık alanında AL-Li esaslı alaşımların kullanımı ile ilgili dikkate değer hususlar aşağıda verilmiştir.

Al-Li esaslı alaşımı cazip hale getiren temel özellikler; düşük yoğunluk, yüksek elastik modülü, mükemmel korozyon direnci, yüksek yorulma çatlak büyüme direnci, düşük kırılma tokluğu ve yüksek sertlik olarak ifade edilebilir. Sertliği artıran, mikro yapıdaki *T*₁ nano çökeltileridir. Örneğin geleneksel 7055 serisi yerine 2055 serisi Al-Li esaslı alaşım kullanıldığında, mukavemet değerlerinin aynı olmasına rağmen %5 yoğunluk azalımı olduğu, elastiklik modülünün ve korozyon direncinin daha yüksek olduğu görülmektedir.

Al-Li esaslı alaşımlar, karşılaşılan problemlerden dolayı birçok geliştirilme evresine sahip olmuştur. Birinci ve ikinci nesil Al-Li esaslı alaşımlarda bazı dezavantajlar oluşmuştur. Üçüncü nesil Al-Li esaslı alaşımlarda statik ve dinamik korozyon dayanımı artırılmıştır. Al-Li esaslı alaşımlarda, Li içeriği alaşımın sünekliğini düşürmektedir. Bunun ana nedeni, δ' (Al 3 Li) fazıdır. Bu fazların kayması nedeni ile düzlemsel kayma ve gerilme yığılmaları oluşur, süneklik düşer. Bununla birlikte element ilavesi, taneleri küçültür, süneklik artar.

Uçaklarda farklı parçalar farklı gereksinimlere sahiptir. Mesela kanat üstü yapıların basma mukavemetinin yüksek, burulmaya karşı dirençli ve kırılma tokluğunun yüksek olması gereklidir. Bu ihtiyaçların hepsini Al-Li esaslı alaşımlar karşılayabilmektedir. *T*-mafsallarda, zemin kirişlerinde, zemin direklerinde, koltuk raylarında kullanımı

devam ederken, kanat içi kirişlerde, desteklerde vb... parçalarda Al-Li alaşımının kullanılması üzerine çalışmalar devam etmektedir. Mevcut durumda üçüncü nesil Al-Li esaslı alaşımlar; F16, Airbus A380, Boeing 787 ve Airbus A350 uçaklarında yaygın olarak kullanılmaya devam etmektedir. Kaynak işlemlerinde, kullanılan dolgu teline göre, kaynak edilecek parçalara göre, kaynak metoduna göre mekanik özelliklerin azaldığı veya arttığı görülmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Kanematsu H. ve Barry D.M., *Amazing airplanes*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 65-73, 2016.
2. Tang Z.T., Yu T., Xu L.Q.Liu Z.Q., *Machining deformation prediction for frame components considering multifactor coupling effects*, *Int J Adv Manuf Technol*, 68 (1-4), 187-196, 2013.
3. Williams J.C. ve Starke Jr E.A., *Progress in structural materials for aerospace systems*, *Acta Mater.*, 51 (19), 5775-5799, 2003.
4. Prasad N.E., Gokhale A.Wanhill R.J.H., *Aluminum-Lithium Alloys - Processing, Properties, and Applications*, 1st ed., Butterworth-Heinemann, 2013.
5. Wanhill R.J.H., *Fatigue Requirements for Aircraft Structures*, in *Aerospace Materials and Material Technologies: Aerospace Material Technologies*, Editör: Prasad N.E. ve Wanhill R.J.H., Springer, Singapore, 2, 331-352, 2017.
6. Holmes T.M., Chin E.S.C., Huang P.J.Pasternak R.E., *Evaluation of 8090 and weldalite-049 aluminum-lithium alloys*, *U.S. Army Materials Technology Laboratory, Watertown, Massachusetts*, 39, 1992.
7. Prasad N.E. ve Wanhill R., *Aerospace Materials and Material Technologies - Aerospace Materials*, Springer, 2016.
8. Ekvall J., Rhodes J.Wald G., *Methodology for evaluating weight savings from basic material properties*, in *Design of Fatigue and Fracture Resistant Structures*, STP28867S, Editör: Abelkis P. ve Hudson C., ASTM International, West Conshohocken, PA, 328-341, 1982.
9. Airbus, *A380 specifications*. <http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a380family/innovation/>, Yayın tarihi Şubat 2016. Güncellenme tarihi Mart 11, 2016. Erişim tarihi Haziran 2017.
10. Bejan A., Charles J.Lorente S., *The evolution of airplanes*, *J Appl Phys*, 116 (4), 044901, 2014.
11. Media A.M., *Production ramps up for Aluminum-Lithium Alloys*. <http://advancedmanufacturing.org/production-ramps-aluminum-lithium-alloys/>, Yayın tarihi Şubat 2015. Güncellenme tarihi Mart 11, 2016. Erişim tarihi Haziran 2017.
12. Pacchione M. ve Telgkamp J., *Challenges of the metallic fuselage*, 25th International Congress of the Aeronautical Sciences, Hamburg, Germany, 2006.
13. Engineering S., *Al-Li alloys*. <http://www.smw.com/en/projects/view/7/AlLi-alloys.html>, Yayın tarihi Haziran 2016. Güncellenme tarihi Mart 11, 2016. Erişim tarihi Haziran 2017.
14. Wilkins T., *Sea Harrier FRS.1 vs. Yak-38 'Forger'*. <https://defenceoftherealm.wordpress.com/2014/07/07/sea-harrier-frs-1-vs-yak-38-forger/>, Yayın tarihi Temmuz 2015. Güncellenme tarihi Mart 11, 2016. Erişim tarihi Haziran 2016.
15. Wikipedia, *Yakovlev Yak-42*. https://en.wikipedia.org/wiki/Yakovlev_Yak-42, Yayın tarihi Şubat 2000. Güncellenme tarihi Mart 11, 2016. Erişim tarihi Şubat 2017.
16. Wikipedia, *Tupolev Tu-204*. https://pt.wikipedia.org/wiki/Tupolev_Tu-204, Yayın tarihi Mart 2007. Güncellenme tarihi Mart 11, 2016. Erişim tarihi Şubat 2017.
17. Wikipedia, *Mil Mi-26*. https://tr.wikipedia.org/wiki/Mil_Mi-26, Yayın tarihi Nisan 2012. Güncellenme tarihi Mart 11, 2016. Erişim tarihi Şubat 2017.
18. Wikipedia, *Sukhoi Su-27*. https://tr.wikipedia.org/wiki/Sukhoi_Su-27, Yayın tarihi Mayıs 2012. Güncellenme tarihi Mart 11, 2016. Erişim tarihi Şubat 2017.
19. Militarypower, *MIG-29 FULCRUM, RUSSIA* <http://www.militarypower.com.br/english-frame4-mig29.htm>, Yayın tarihi Mart 2014. Güncellenme tarihi Mart 11, 2016. Erişim tarihi Haziran 2017.
20. Pinterest, *Beriev Be-200 Sea Plane*. <https://tr.pinterest.com/demetrisplastou/beriev-be-200-sea-plane/>, Yayın tarihi Mayıs 2012. Güncellenme tarihi Mart 11, 2016. Erişim tarihi Haziran 2017.
21. Wikipedia, *North American A-5 Vigilante*. https://en.wikipedia.org/wiki/North_American_A-5_Vigilante, Yayın tarihi Ocak 2016. Güncellenme tarihi Mart 11, 2016. Erişim tarihi Şubat 2017.
22. Tsang D., *Boeing chooses largest wingspan for 777X*. <http://www.aspireaviation.com/2012/07/26/boeing-chooses-largest-wingspan-for-777x/>, Yayın tarihi Ocak 2017. Güncellenme tarihi Mart 11, 2016. Erişim tarihi Haziran 2017.
23. Alcoa, *Alcoa technology*. <https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/4281/000119312513288275/d566884dex992.htm>, Yayın tarihi Mart 2016. Güncellenme tarihi Mart 11, 2016. Erişim tarihi Haziran 2017.
24. Jarrault O., *Advanced each generation*, in *Cowen and Company's 34 th annual aerospace/ Defense Conference*, 2013.
25. Peters M. ve Leyens C., *Aerospace and space materials*, *Mater. Sci. Eng.*, 3, 1-11, 2009.
26. Prasad N.E., Gokhale A.Rao P.R., *Mechanical behaviour of aluminium-lithium alloys*, *Sadhana*, 28 (1-2), 209-246, 2003.
27. Lynch S., Shekhter A., Moutsos S.Winkelman G., *Challenges in developing high performance Al-Li alloys*, in *The 3rd international conference on light*

- materials for transportation systems, LiMAT-2003, Honolulu, 2003.
28. Rioja R.J. ve Liu J., The evolution of Al-Li base products for aerospace and space applications, *Metall. Mater. Trans. A*, 43 (9), 3325-3337, 2012.
 29. Kobayashi K., Ohsaki S., Kamio A., Sato T.Tsuji Y., Effect of Zn addition on corrosion resistance of 2090 and 2091 alloys, *Aluminium-Lithium*, 2, 673-678, 1992.
 30. Cantor B., Assender H.Grant P., *Aerospace Materials*, CRC Press, 2015.
 31. Merati A., *Materials replacement for aging aircraft*, Research and Technology Organisation (NATO), Neuilly-sur-Seine, France, 1-24, 2011.
 32. Smith A.F., Uses and properties of Al-Li on the new EH101 helicopter - New Light Alloys, in *AGARD Conference Proceedings No. 444*, Neuilly-sur-Seine, France, Advisory Group for Aerospace Research and Development, 1984.
 33. Mouritz A.P., *Introduction to Aerospace Materials*, Woodhead Publishing Limited, 2012.
 34. Worldwide - Military, EH-101 Utility (United-Kingdom, Italy). http://www.worldwide-military.com/Military%20Heli's/Middel-groote%20helicopters/EH101_general_info_english.htm, Yayın tarihi Eylül 2015. Güncellenme tarihi Mart 11, 2016. Erişim tarihi Haziran 2017.
 35. Babel H., Al-Li in Boeing products, in 16th annual Aeromat advanced aerospace materials and processes conference and exposition, Aeromat, 2005.
 36. Yuwei X., Yiyuan Z., Wenfeng M.Jainzhong C., Superplastic forming technology of aircraft structures for Al-Li alloy and high-strength Al alloy, *J Mater Process Technol.*, 72 (2), 183-187, 1997.
 37. Comac, Sample of Al-Li Alloy barrel section of the fuselage for C919. http://english.comac.cc/news/latest/201409/03/t201409_03_1895735.shtml, Yayın tarihi Nisan 2016. Güncellenme tarihi Mart 11, 2016. Erişim tarihi Haziran 2017.
 38. Perrett B., C919 May Be Largely Limited To Chinese Market. <http://aviationweek.com/awin/c919-may-be-largely-limited-chinese-market>, Yayın tarihi Nisan 2013. Güncellenme tarihi Mart 11, 2016. Erişim tarihi Haziran 2017.
 39. Starke E., Sanders T.Palmer I., New approaches to alloy development in the Al-Li system, *JOM*, 33 (8), 24-33, 1981.
 40. University S., H491 MEng Aeronautics & Astronautics / Airvehicle Systems Design lecture notes, *Engineering and the Environment*, 10-15, 2017.
 41. Missori S. ve Sili A., Mechanical and microstructural properties of 8090 AL-LI alloy welded joints, *Metall. Sci. Technol.*, 20 (2), 2013.
 42. Han B., Tao W.Chen Y., New technique of skin embedded wire double-sided laser beam welding, *Opt Laser Eng*, 91, 185-192, 2017.
 43. Han B., Tao W., Chen Y.Li H., Double-sided laser beam welded T-joints for aluminum-lithium alloy aircraft fuselage panels: Effects of filler elements on microstructure and mechanical properties, *Opt Laser Eng*, 93, 99-108, 2017.
 44. Magnusen P., Mooy D., Yocum L.Rioja R., Development of high toughness sheet and extruded products for airplane fuselage structures, in *ICAA13: 13th International Conference on Aluminum Alloys*, Wiley Online Library, 2012.
 45. Engineering A., *A Brief History of Aircraft Structures*. <http://aerospaceengineeringblog.com/aircraft-structures/>, Yayın tarihi Mayıs 2015. Güncellenme tarihi Mart 11, 2016. Erişim tarihi Haziran 2017.
 46. James M., Cessna 310K Internal Structure. http://www.mikejamesmedia.com/cessna_310k_07.htm l, Yayın tarihi Ocak 2016. Güncellenme tarihi Mart 11, 2016. Erişim tarihi Haziran 2017.
 47. Denzer D., Rioja R., Bray G., Venema G.Colvin E., The evolution of plate and extruded products with high strength and fracture toughness, in *ICAA13: 13th International Conference on Aluminum Alloys*, Wiley Online Library, 2012.
 48. Karabin L., Bray G., Rioja R.Venema G., Al-Li-Cu-Mg-(Ag) products for lower wing skin applications, *ICAA13: 13th International Conference on Aluminum Alloys*, Pennsylvania, 2012.
 49. Lequeu P., *Advances in Aerospace Aluminum-Summaries of presentations by Alcan Aerospace personnel during ASM's AeroMat 2007 Conference*. Al-Li alloys are highlighted, *Adv Mater Processes*, 166 (2), 47, 2008.
 50. Lequeu P., Smith K.Daniélou A., Aluminum-copper-lithium alloy 2050 developed for medium to thick plate, *J Mater Eng Perform*, 19 (6), 841-847, 2010.
 51. Wendelin J Wright D.R.A., D.K. Bhattacharya, Raj P. Chhabra, *The Science and Engineering of Materials*, 7th ed., United States of America, Cengage Learning, 2014.
 52. Khushaim M.S., *Investigation of the Precipitation Behavior in Aluminum Based Alloys*, Doktora Tezi, King Abdullah University of Science and Technology, Materials Science and Engineering, Thuwal, Kingdom of Saudi Arabia, 2015.
 53. Hu L., Zhan L., Shen R., Liu Z., Ma Z., Liu J.Yang Y., Effects of uniaxial creep ageing on the mechanical properties and micro precipitates of Al-Li-S4 alloy, *J Mater Sci Eng A*, 688, 272-279, 2017.
 54. Cindie Giummarra B.T., Roberto J. Rioja, *New aluminum lithium alloys for aerospace applications*, in *Proceedings of the 3rd International Conference on Light Metals Technology*, Saint-Saveur, Québec, Canada, NRC, 2007.
 55. Chen A., Zhang L., Wu G., Sun M.Liu W., Influences of Mn content on the microstructures and mechanical properties of cast Al-3Li-2Cu-0.2Zr alloy, *J Alloy Compd*, 715, 421-431, 2017.
 56. Ning J., Zhang L.J., Bai Q.L., Yin X.Q., Niu J.Zhang J.X., Comparison of the microstructure and mechanical performance of 2A97 Al-Li alloy joints between autogenous and non-autogenous laser welding, *Mater. Des.*, 120, 144-156, 2017.