



Gündüz nişangâhı oküler gövdesinin ağırlığını azaltmak için tasarımının değiştirilmesi ve AlSi10Mg alaşımı ile eklemeli imalatı

Changing the design of the day sight ocular body to reduce its weight and additive manufacturing with AlSi10Mg alloy

Cem ERTEK^{1*}, Ramazan EVRENSEL²

¹Department of Manufacturing Engineering, Faculty of Technology, Sivas Cumhuriyet University, Sivas, Türkiye.

cemertek@cumhuriyet.edu.tr

²Institute of Science and Technology, Sivas Cumhuriyet University, Sivas, Türkiye.

ramazanevensel@hotmail.com

Received/Geliş Tarihi: 05.08.2024

Revision/Düzeltilme Tarihi: 16.01.2025

doi: 10.5505/pajes.2025.76709

Accepted/Kabul Tarihi: 14.04.2024

Research Article/Araştırma Makalesi

Öz

Bu çalışmada, eklemeli imalat yöntemleri ile alüminyum alaşımlarının savunma sanayiindeki kullanımına odaklanılmış ve ASELSAN envanterindeki bir gündüz nişangâhı oküler gövdesinin tasarımı değiştirilerek ağırlığı azaltılmıştır. Mevcut oküler gövde Al7075-T6 malzemeden geleneksel talaş kaldırma yöntemleri ile imal edilmiştir. Eklemeli imalat yöntemi kullanılarak yeni bir oküler gövde üretmek için oküler gövdenin dış ölçülerini koruyarak tasarımında ve malzemesinde değişiklikler yapılmıştır. Tasarımı değiştirilen ve LPBF yöntemi ile imal edilen yeni oküler gövde için Al7075 malzemeye göre daha iyi kaynak edilebilir özellik gösteren AlSi10Mg malzemesi tercih edilmiştir. Mevcut ve yeni tasarım oküler gövdeler, aynı sınır şartları ve yüklemeler altında sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Ağırlık azaltmaya yönelik çalışmalar sonucunda, yeni oküler gövde mevcut oküler gövdeye göre %16 daha hafiftir. Yeni oküler gövdeye yapılan zamana bağlı sıcaklık analizi sonucunda, pim çevresindeki toplam deformasyon değeri mevcut oküler gövdeye kıyasla %18 artmış; eşdeğer gerilme değeri malzemelerin akma dayanımlarındaki farktan dolayı %62 oranında azalmıştır. Titreşim altında hasar analizi sonuçları incelendiğinde, yeni oküler gövdenin hasar oranı (1.447×10^{-32}), mevcut oküler gövdeninkine (2.061×10^{-8}) kıyasla çok daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçlar, yeni tasarıma sahip oküler gövdede güvenlik faktörü değerinde iyileşme olduğunu, ancak deformasyon değerinde bir artış görüldüğünü ortaya koymuştur.

Anahtar kelimeler: Eklemeli imalat, alüminyum alaşımları, sonlu elemanlar analizi, lazer toz yatak füzyonu.

Abstract

In this study focuses on the use of aluminum alloys in the defense industry using additive manufacturing methods, and the design of a day sight ocular body in ASELSAN's inventory was changed to reduce its weight. The existing ocular body was manufactured from Al7075-T6 material using conventional machining methods. In order to produce a new ocular body using the additive manufacturing method, changes were made to the design and material of the ocular body while preserving its external dimensions. For the new ocular body, which was redesigned, and manufactured using the LPBF method, AlSi10Mg material, which has better weldability than Al7075 material, was preferred. The existing and new design ocular bodies were analyzed using the finite element method under the same boundary conditions and loadings. As a result of weight reduction studies, the new ocular body is ~% 16 lighter than the existing ocular body. As a result of the time-dependent temperature analysis performed on the new ocular body, the total deformation value around the pin increased by ~% 18 compared to the existing ocular body; The equivalent stress value decreased by ~62% due to the difference in yield strength of the materials. When the results of the damage analysis under vibration were examined, it was observed that the damage rate of the new ocular body (1.447×10^{-32}) was much lower than that of the existing ocular body (2.061×10^{-8}). The results showed that there was an improvement in the safety factor value in the new designed ocular body, but an increase in the deformation value.

Keywords: Additive manufacturing, aluminum alloys, finite element analysis, laser powder bed fusion.

1 Giriş

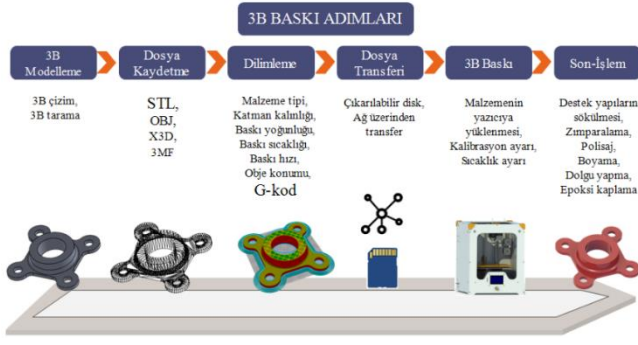
Nesnelerin, bilgisayar ortamında hazırlanan üç boyutlu (3B) dijital modellerinden elde edilen verilerine göre metal, seramik ve plastik malzemeler kullanılarak katman katman imalat edilmesi prensibine dayanan yöntemler, eklemeli imalat teknolojilerini oluşturur. Günümüzde bu yöntemler, enerji, yapı sektörü, sanat, medikal, otomotiv, havacılık ve uzay endüstrilerinde giderek daha fazla kullanılmaktadır. Bu teknolojiler, parçaların bir bütün halinde karmaşık geometri ile imalatını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda kaynak veya montaj gibi ek işlemlere gerek kalmadan iç boşluklu yapılar oluşturarak ağırlığı azaltma gibi avantajlar da sunar.

Otomotiv, savunma, havacılık ve uzay endüstrilerinde hafiflikleri nedeniyle sıkça tercih edilen alüminyum ve alüminyum alaşımları, eklemeli imalatla kullanılan toz malzemeler arasında yer alır.

Herhangi bir parçanın eklemeli imal (Eİ) edilmesinde ana unsur, bilgisayar destekli tasarımın ardından modelin parametrelerine uygun olarak ürünün katman katman oluşturulmasıdır. Bu süreçte taramanın mesafesi, yönü, hızı, lazerin gücü, katmanın kalınlığı, kullanılan malzemeler ve imalat şekli gibi faktörler, üretilen parçanın yüzey kalitesini, imalat maliyetini, imalat hızını ve mekanik özelliklerini etkiler [1], [2].

Eklemeli imalat uygulamalarının genel işlem adımları, Şekil 1.'de gösterilen akışa benzer şekilde uygulanmaktadır [1], [2].

*Corresponding author/Yazışılan Yazar



Şekil 1. Eklemeli imalatta işlem adımları.

Figure 1. Process steps in additive manufacturing.

2 Eklemeli imalatla kullanılan alüminyum alaşımları

Son on yılda, eklemeli imalat ile ilgili bilimsel yayınların sayısında önemli bir artış olmuştur. Metal eklemeli imalat alanında genel olarak; paslanmaz çelik, Ti6Al4V, Inconel 625, Inconel 718 ve AlSi10Mg en çok incelenen malzemelerdir. Alüminyum alaşımları, eklemeli imalatın ana türlerinden biri olan, seçici lazer ergitme (SLM) veya toz yatak füzyonu - lazer ışını (PBF-LB) olarak da bilinen lazerle toz yatağında ergitme yönteminde (LPBF) kullanılırlar [3], [4].

Havacılık ve otomotiv endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan Al alaşımları arasında, daha yüksek süneklik sunan yüksek mukavemetli 2xxx, 5xxx, 6xxx ve 7xxx serileri yer alır. Ancak, bu alaşımların LPBF ile işlenebilirlikleri henüz istenilen seviyede değildir. İşleme ilgili yüksek soğuma hızları söz konusudur. Parçaların imalat sürecinde maruz kaldığı karmaşık termal değişimler, kendi kendini dengeleyen yüksek bir kalıntı gerilime yol açar. Alaşımın mukavemeti kalıntı gerilmeden daha az olduğunda, çatlakların oluşması ve yayılması yoluyla parçadaki kalıntı gerilim serbest bırakılır. Sonuç olarak imalat sırasında mikro çatlak oluşma eğilimi görülür, bu da parçalarda yapısal bütünlüğün zayıflamasına neden olur [5]-[7].

Literatürde, LPBF için yeni alaşımlara yönelik çalışmalar yürütülmektedir. Örneğin, Airbus grubu, E1 için özel bir Al-Mg-Sc alaşımı (SCALMALLOY®) geliştirmiştir. Bu alaşım, yüksek korozyon direnci, yüksek özgül mukavemet, olağanüstü yorulma ve tokluk özellikleriyle bilinmektedir. Addalloy™ gibi yeni bileşimler geliştirmek için Al-Mg alaşımına Sc ve Zr eklenmesi, mikro yapıyı iyileştirmiş ve malzemeyi güçlendirmiştir. Ayrıca Sc, sıcak çatlama olasılığını azaltarak kaynak kabiliyetini geliştirmiştir [5]. Alüminyum Derneği ise eklemeli imalatla kullanılan alüminyum tozu miktarındaki büyümeyi göz önünde bulundurarak, özellikle alüminyum alaşım tozları için Purple Sheets olarak bilinen bir alaşım kayıt sistemi geliştirmiştir. 2019 yılında Purple Sheets kapsamında kayıt altına alınan ilk alüminyum tozları, HRL Laboratuvarları tarafından LPBF için geliştirilen ve 7A75.50, 7A75.51, 7A77.50 ve 7A77.51 olarak adlandırılan yüksek dayanımlı birkaç 7xxx alaşımıydı. Günümüzde Purple Sheets kapsamında bulunan ve imalatla kullanılan alaşımların artan sayısı, eklemeli imalat için çok çeşitli alüminyum alaşımlarına olan talebin kanıtıdır [3].

Alüminyum tozları, doğaları gereği hafiftir, yüksek yansıtıcılığı, yüksek ısı iletkenliğe sahiptir. Yapılan araştırmalarda tozun akış özelliklerinin yüksek sıcaklık ve düşük nem koşullarında korunduğu görülmüştür [8]. AlSi10Mg alaşımı yüksek ısı yansıtıcılığı nedeniyle yüksek yoğunluklu parçalar imal etmek

için diğer malzemelere göre daha fazla enerji girdisi gerektirir [9]. Alüminyum ve alaşımları ısıl gerilmeleri azaltan ve yüksek ısı iletkenliğe sahiptir. Günümüzde en yaygın kullanılan alaşımlar AlSi10 Mg ve AlSi12Mg bulunmaktadır [10]. LPBF'de geleneksel olarak kullanılan fiber lazerlerin (sürekli veya modüle edilmiş) dalga boyu aralığında (1.06 μm) düşük lazer emiciliği sergilediği görülmüştür. Dolayısıyla Al alaşımlarını, LPBF ile işlemek kolay değildir. LPBF ile işlenebilirlik açısından ümit verici olanlar genellikle alüminyum döküm alaşımlarıdır. Bunların arasında en çok ilgi gören AlSi10Mg'dur ve ardından AlSi12 gelir. Al-Si alaşımları içerdikleri Si oranına göre adlandırılır ve 577 °C'de %12.5-12.6 silisyum içeriği ile bir ötektik alaşım meydana getirir. Silisyum, ergimiş alüminyumun akışkanlığını artırırken soğuma sırasında büzülmesini de azaltır. Al-Si alaşımının dökülebilirliği, silisyum içeriği ile doğru orantılıdır ve yaklaşık %17 Si değerinde en iyi seviyeye gelir. Al-Si alaşımlarının çekme mukavemetleri 140-260 MPa aralığındadır ve süneklikleri düşüktür (~%4) [5]. Alaşımdaki Si ağırlıkça %11-13 arasında ise ötektik, %11'den az ise hipoötektik ve %13'ten fazla olduğunda hiperötektik alaşım kabul edilir [14]. AlSi10Mg alaşımı ise hipoötektik alüminyum alaşımları grubuna dahildir.

2.1 Al7075

7075 en çok, uçak parçaları gibi yüksek gerilmeli yapısal parçalarda kullanılır ve yaygın kullanılan bazı yapısal çeliklerden daha güçlüdür [11]. Örneğin, ASTM standardı B209-14'e göre işlenmiş Al7075-T6 için çekme dayanımı 530 MPa'yi aşarken, uzama değeri %9'u geçer. Ancak Al7075, LPBF için zayıf işlenebilirlik gösterir çünkü düşük kaynak edilebilirliğe ve katılma çatlamaına karşı yüksek hassasiyete sahiptir.

Yapılan birçok araştırma, eklemeli imalat ile çatlaksız Al7075 parçaların üretiminin mümkün olduğunu ve alüminyum alaşımlarına bileşen eklendiğinde Al7075'teki katılma çatlaklarının önüne geçildiğini göstermiştir [12]. Al7075-T6'nın yoğunluk değeri 2.81 g/cm³tür.

Tablo 1'de Al7075 alaşımına ait kimyasal bileşim verilmiştir [13].

Tablo 1. Al7075 alaşımının kimyasal bileşimi.

Table 1. Chemical composition of Al7075 alloy.

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Ağırlık bileşimi	0.4	0.5	2.0	0.3	2.9	0.28	6.1	0.2	Geri kalan
maks (%)									

Al7075-T6 malzemesi mükemmel mekanik özelliklere sahiptir. Yüksek mukavemet, tokluk ve yorulmaya karşı iyi direnç sağlamaktadır. Tipik uygulamaları arasında havacılık, otomotiv, kalıplar, dişliler, şaftlar ve yapısal çerçeve bileşenleri bulunur.

2.2 AlSi10Mg

AlSi10Mg alaşımın farklı ortamlardaki korozyon direnci üzerinde birkaç çalışma yürütülmüş, özellikle tuzlu suda korozyon direnci incelenmiştir. Isıl işlem yapılmadığında, Si ile Al arasında mikrogalvanik çiftlerin oluştuğu belirlenmiştir. Bu oluşum, bileşen yüzeyinde korozyonun yayılmasını engelleyen koruyucu bir oksit film meydana getirir [14]. AlSi10Mg'un, otomotiv ve havacılık endüstrilerinde tercih edilmesinin nedeni, çok iyi dökülebilirliği, korozyon direncinin yüksekliği, hafiflik, dinamik yük taşıma kapasitesinin yüksekliği, iyi ısıl nitelikler ve sertliğinin AlMnCu, AlMg3 ve AlFeSi alaşımlara

göre daha yüksek olması gibi çeşitli özellikler sergilemesidir [15]. Bu alaşım, genellikle yüksek yük taşıyacak ince duvarlı ve karmaşık geometrili döküm parçaların imalatında tercih edilir [16].

AlSi10Mg alaşımı tozlar kullanılarak LPBF ile yapılan imalat, yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarının talaşlı işlenmesi ile yapılabildiği gibi daha kolaydır. Havacılık ve otomotiv endüstrilerinde ihtiyaç duyulan parçaların eklemeli imalatında, gaz atomizasyonu yöntemi ile elde edilen 20 ila 63 µm boyutlarındaki AlSi10Mg alaşımı tozu kullanılarak, başarılı sonuçlara ulaşılmaktadır.

AlSi10Mg alaşımıyla imal edilen parçalara, ısıtma işlemi uygulanarak mikro yapıları ve çekme özellikleri iyileştirilebilir [17]. Parçanın mekanik özelliklerini etkileyen önemli faktörler arasında, AlSi10Mg alaşımındaki ötektik Silisyumun şekli ve boyutu da yer almaktadır. Al-Si alaşımındaki magnezyum, mukavemet ve süneklik sağlayan Mg2Si fazının çökeltmesine olanak tanır [18].

AlSi10Mg alaşımının sertleştirilmesi için çözeltiye alma ısıtma işlemi yapay yaşlandırma ile uygulanır. Mamullerin mekanik özelliklerini daha da iyileştirmek için platform ısıtma stratejisi, yaşlandırma sertleştirilmesi etkilerine katkı sağlayabileceği düşünülmektedir [19]. Eklemeli imalat ile elde edilen AlSi10Mg alaşımı parçanın mekanik özelliklerinin döküm AlSi10Mg alaşımı parçasından daha iyi değerler sergilediği gözlemlenmiştir [20], [21]. AlSi10Mg alaşımının kimyasal bileşimi ve mekanik test sonuçları Tablo 2 ve Tablo 3'te verilmiştir [22]. AlSi10Mg'un yoğunluk değeri 2.68 g/cm³'tür.

Tablo 2. AlSi10Mg tozu (% ağırlık) kimyasal bileşimi.

Table 2. Chemical composition of AlSi10Mg powder (weight %).

Element	Si	Mg	Cu	Ni	Fe	Mn	Ti	Al
Ağırlık bileşimi (%)	10	0.4	0.25	0.05	0.25	0.1	0.15	Geri kalan

Tablo 3. Çekme testleri ve Vickers sertlik ölçümlerinin sonuçları.

Table 3. Results of tensile tests and Vickers hardness measurements.

	Çekme mukavemeti (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HV)
AlSi10Mg (yatay)	451	4.8	127

AlSi10Mg, Eİ yöntemlerinde kullanılan en yaygın alüminyum alaşımıdır. Yüksek mukavemet, sertlik ve dinamik özelliklere sahiptir [11].

AlSi10Mg, nispeten yüksek sıcaklıklarda kullanım için uygun ve iyi korozyon direncine sahiptir. Bu özelliklerden dolayı ısı transferi gerektiren uygulamalarda kullanılmak için ideal bir malzemedir. Alüminyum malzemeden imal edilen mamullerin işlenmesi kolaydır ve iyi yüzey kalitesi elde etmek mümkündür [23], [24].

Yapısındaki silisyumun varlığı, alüminyum alaşımını saf alüminyuma göre hem daha sert hem de daha dirençli hale getirir [25], [18].

Yüksek mukavemet-ağırlık oranı sayesinde otomotiv, havacılık ve otomasyon uygulamaları, dişli kutuları, motor parçaları, ısı eşanjörleri, yüksek basınçlı borular, manifoldlar, gövdeler ve yüksek yüke maruz kalan braketler için iyi bir seçimdir.

3 Oküler gövdenin eklemeli imalata uyarlanmış tasarımı ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizi

Savunma sanayiinde uzun namlulu silahlarda kullanılan gündüz nişangâhı iç aksamının eklemeli imalata uyarlanarak ağırlığını azaltmaya yönelik yapılacak çalışma için oküler gövde seçilmiştir. Oküler gövde, Şekil 2' de verilen dürbüne montaj edilmektedir [26].

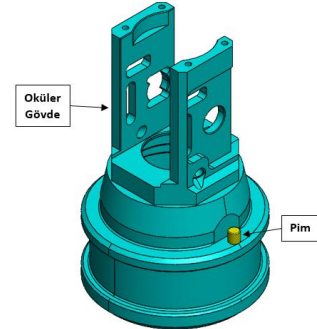


Şekil 2. A940 1x - 4x gündüz nişangâhı.

Figure 2. A940 1x - 4x day sight.

3.1 Mevcut parça ve yeni tasarım

Şekil 3' te verilen oküler gövde Sivas ASELSAN Hassas Optik A.Ş. firmasında geleneksel talaşlı imalat yöntemleri (tornalama, frezeleme) ile imal edilmiştir. Oküler gövde, Al-7075-T6 alüminyum alaşımı gövde ve sonradan montajı gerçekleştirilen 303 paslanmaz çelik pim olmak üzere iki ayrı malzemeden oluşmaktadır. Oküler gövde ve gövdeye monte edilen pimin toplam ağırlığı 41.15 g'dır.

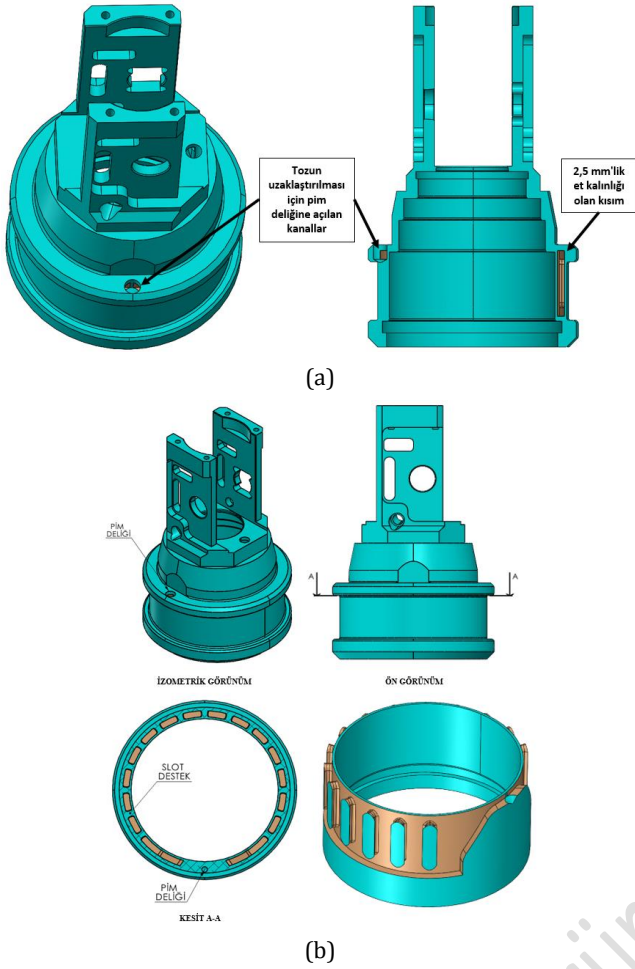


Şekil 3. Mevcut oküler gövde ve pim.

Figure 3. Existing ocular body and pin.

Bilindiği üzere Eİ yöntemlerinden LPBF ile imalat, tıpkı kaynak işleminde parçaların ergitilip katılaştırılarak birleştirilmesinde olduğu gibi metal tozlarının da ergimesi ve katılaşması söz konusudur. Dolayısıyla LPBF ile imalat işleminde kullanılacak malzemenin de kaynak edilebilirliğinin iyi olması parça mukavemeti için gereklidir. Mevcut gövdenin malzemesi Al7075'nin kaynak edilebilirliği iyi olmadığından, parçanın eklemeli olarak imal edilmesinin uygun olmadığı görülmüştür. Bu nedenle LPBF ile imal edilecek yeni parça için kaynak edilebilirliği daha iyi olan AlSi10Mg malzemesi seçilmiştir.

Çalışmada, mevcut oküler gövdenin ağırlığını %10-20 oranında azaltmak hedeflenmiştir. Bu amaçla parça tasarımında değişiklik yapılmış ve yeni tasarım Şekil 4'te verilmiştir. Yeni parçanın tasarımında SolidWorks 2023 SP4 programı kullanılmıştır.



Şekil 4. (a) Yeni tasarım oküler gövde, (b) Yeni tasarım oküler gövdenin iç kanal detayı.

Figure 4. (a) New design ocular body, (b) Internal channel detail of the new design ocular body.

Oküler gövdenin dış formu değiştirilmeden 2.5 mm'lik et kalınlığı olan kısımdan 1.5 mm genişliğinde kanal açılmış ve her 18 derecede bir slot destekler eklenmiştir. El sonrası gövde içerisinde kalan tozun uzaklaştırılması için de pim deliğine yönelik kanal açılmıştır.

Monte edildiği gündüz nişangâhına pimden yataklama yapıldığından pim deliği çevresinin $\pm 15^\circ$ lik bölümünde ağırlık azaltımı yapılmamıştır. Yapılan değişiklik sonrası Şekil 4'te verilen yeni tasarım oküler gövde ve pimin toplam ağırlığı 34.66 g'a düşürülmüş böylece hedeflenen %10–20'lik ağırlık azaltımı gerçekleştirilmiştir.

3.2 Sonlu elemanlar yöntemi

Gerilmelere ve deformasyonlara neden olan yüklerin sonlu elemanlar yöntemi ile analizinde ağ örgüsü kalitesi önemli rol oynamaktadır. Eleman kalitesi, ortogonal kalite ve çarpıklık, sonlu elemanlar analizinde öncelikle incelenen büyüklüklerdir. Eleman kalitesi ve ortogonal kalite büyüklüklerinin 1 (bir); çarpıklık büyüklüğünün ise 0 (sıfır) kritik değerine yakın olması istenir.

Sonlu elemanlar analizinde ANSYS 2023 R1, yapısal analiz (static structural) ve yapısal analiz altında ısısal koşul (thermal condition) modülleri kullanıldı. İdeal ağ örgüsü değerlerine ulaşmak amacıyla mevcut ve yeni tasarım oküler gövdeleri ve

pim ile çevresinin analizinde yararlanılan küresel bölge için lokal ağ örgüsü ayarları Tablo 4'te verilmiştir.

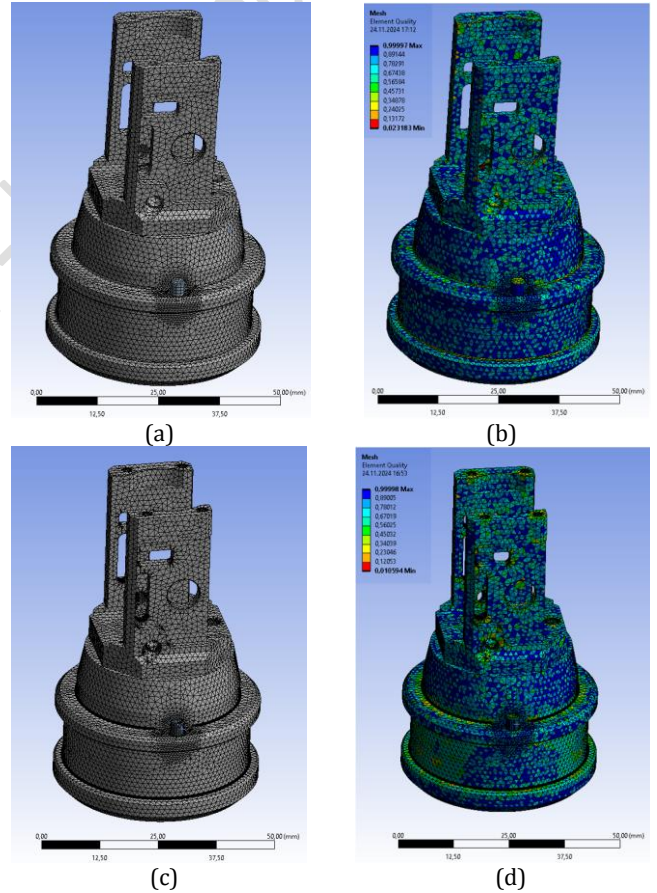
Tablo 4. Lokal ağ örgüsü ayarları.

Table 4. Local mesh settings.

Parça	Eleman sayısı	Düğüm sayısı	Eleman boyutu (mm)	
			Oküler gövde için	Pim ve çevresi için (alınan küre Ø10 mm)
Mevcut	96179	156672	1.2	0.5
Yeni tasarım	93247	158701	1.2	0.5

Yapılan çalışmada eleman kalitesinin 0.86; ortogonal kalitenin 0.75 ve çarpıklığın da 0.25 değerlerinde yoğunlaşarak istenilen 1(bir) ve 0 (sıfır) kritik değerlerine yakın oldukları görülmüştür.

Şekil 5'te mevcut ve yeni tasarım oküler gövdelere ait lokal ağ örgüsü dağılımı ile eleman kalitesi görselleri verilmiştir.



Şekil 5. (a) Mevcut Oküler gövdenin lokal ağ örgüsü dağılımı, (b) Mevcut oküler gövdenin eleman kalitesi, (c) Yeni tasarım oküler gövdenin lokal ağ örgüsü, (d) Yeni tasarım oküler gövdenin eleman kalitesi.

Figure 5. (a) Local meshwork distribution of the existing ocular body, (b) Element quality of the existing ocular body, (c) Local mesh of the new design ocular body, (d) Element quality of the new design ocular body.

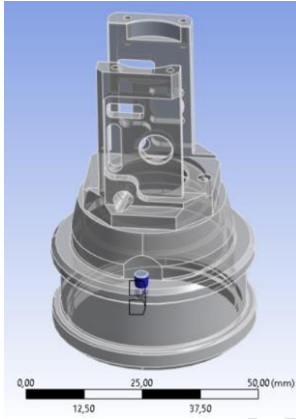
Lokal ağ örgüsü ayarları uygulandıktan sonra hem mevcut oküler gövdenin hem de yeni tasarım oküler gövdenin eleman kalitesi grafiği incelendiğinde ağ örgüsü yoğunluğunun çoğunluğu 1'e yakın, çarpıklık grafiği incelendiğinde ise ağ örgüsünün yoğunluğunun çoğunluğu 0'a yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum ideal ağ örgüsü kalitesine yaklaşıldığı anlamına gelmektedir. Ayrıca lokal ağ örgüsü ayarları sonucu düğüm ve element sayısının global ağ örgüsü ayarlarına kıyasla az olması analizin daha hızlı sonuçlanmasını sağlayacaktır.

3.3 Sıcaklık ve titreşim analizleri

Mevcut ve yeni tasarım oküler gövdeye sıcaklık ve titreşim analizleri yapılmış olup, kritik olarak belirlenen bölgede gerilme ve deformasyonlar sonlu elemanlar yöntemi aracılığıyla hesaplanmış ve uygunluğu kontrol edilmiştir.

3.3.1 Çalışma ve depolama sıcaklığı analizi

Zamana bağlı çalışma sıcaklığı analizi, oküler gövde için ASELSAN Hassas Optik A.Ş tarafından test laboratuvarlarında uygulanan koşullar dikkate alınarak, yüksek sıcaklıkta ve düşük sıcaklıkta tanımlanan süreler boyunca uygulanmıştır. Şekil 6'da sıcaklık analizi için sabitleme bölgesi verilmiştir.



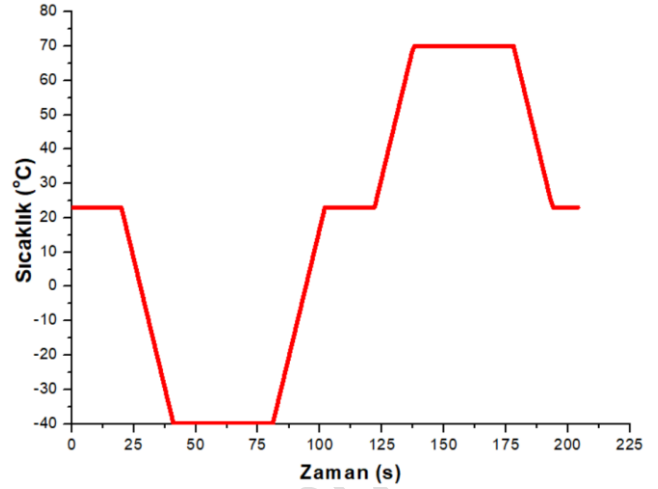
Şekil 6. Sıcaklık analizi için pimden yataklama.

Figure 6. Pin bearing for temperature analysis.

Gündüz nişangâhına pimden yataklanarak montajı gerçekleştirilen oküler gövdenin sıcaklığa maruz kalma adımları sırasıyla;

- Oküler gövde 23°C'de 1 saat bekletildi.
- Sıcaklık dakikada 3°C'lik adımlarla düşürülür ve sıcaklığın -40°C'ye gelmesi beklendi.
- Sıcaklık -40°C'ye geldikten sonra 2 saat bekletildi.
- Sıcaklık dakikada 3°C'lik adımlarla arttırılır ve sıcaklığın 23°C'ye gelmesi beklendi.
- Sıcaklık 23°C'ye geldikten sonra 1 saat bekletildi.
- Sıcaklık dakikada 3°C'lik adımlarla arttırılır ve sıcaklığın 70°C'ye gelmesi beklendi.
- Sıcaklık 70°C'ye geldikten sonra 2 saat bekletildi.
- Sıcaklık dakikada 3°C'lik adımlarla düşürülür ve sıcaklığın 23°C'ye gelmesi beklendi.
- Sıcaklık 23°C'ye geldikten sonra 20-40 dakika bekletildi.

belirtilen adımlar Şekil 7'de gösterilmiştir. Yukarıda verilen zamana bağlı sıcaklık değişimleri, ANSYS - Workbench programında 3 dakikalık periyot 1 saniye kabul edilmiştir.



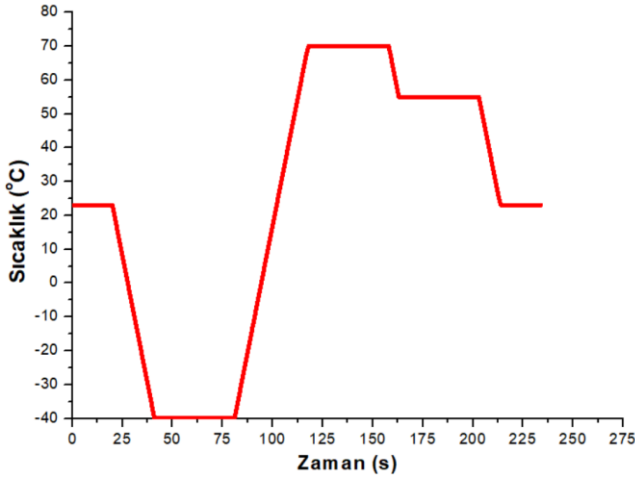
Şekil 7. Mevcut ve yeni tasarım oküler gövdenin zamana bağlı çalışma sıcaklık dağılım profili.

Figure 7. Time-dependent operating temperature distribution profile of the existing and new design ocular body.

Zamana bağlı depolama sıcaklığı analizinde oküler gövde MIL-STD-810H standardına göre yüksek sıcaklıkta ve düşük sıcaklıkta tanımlanan süre boyunca bekletilir. Gündüz nişangâhına pimden yataklanarak montajı gerçekleşen oküler gövdenin sıcaklığa maruz kalma adımları sırasıyla;

- Oküler gövde 23°C'de 1 saat bekletildi.
- Sıcaklık dakikada 3°C'lik adımlarla düşürülür ve sıcaklığın -40°C'ye gelmesi beklendi.
- Sıcaklık -40°C'ye geldikten sonra 2 saat bekletildi.
- Sıcaklık dakikada 3°C'lik adımlarla arttırılır ve sıcaklığın 70°C'ye gelmesi beklendi.
- Sıcaklık 70°C'ye geldikten sonra 2 saat bekletildi.
- Sıcaklık dakikada 3°C'lik adımlarla arttırılır ve sıcaklığın 55°C'ye gelmesi beklendi.
- Sıcaklık 55°C'ye geldikten sonra 2 saat bekletildi.
- Sıcaklık dakikada 3°C'lik adımlarla düşürülür ve sıcaklığın 23°C'ye gelmesi beklendi.
- Sıcaklık 23°C'ye geldikten sonra 1 saat bekletildi.

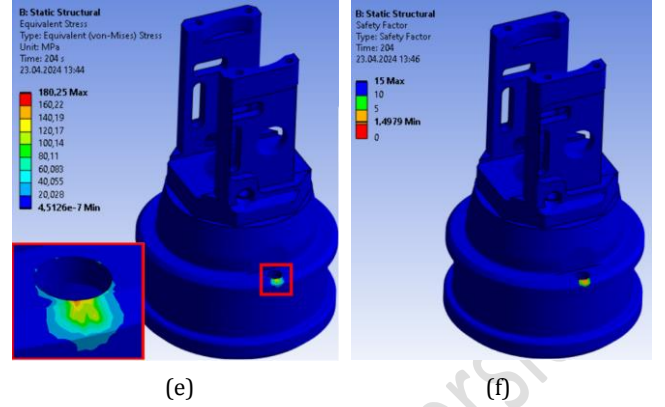
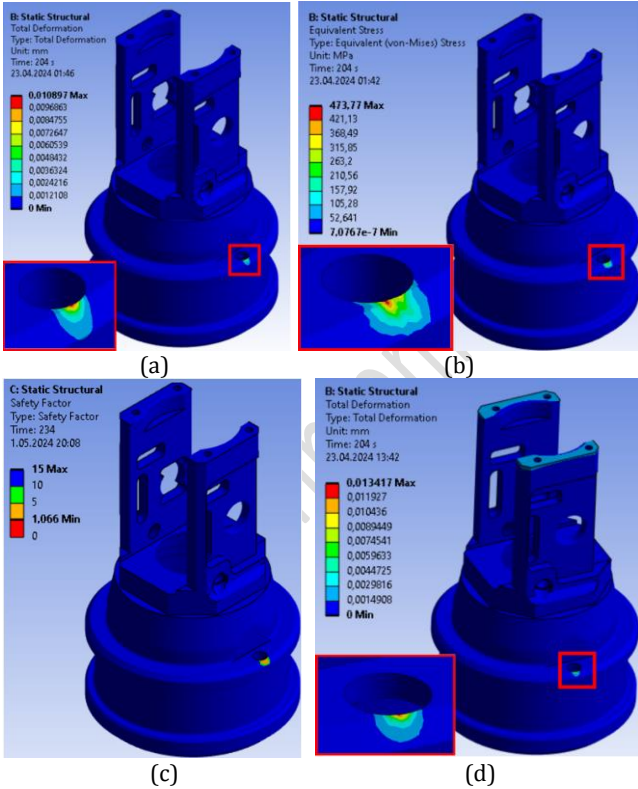
Yukarıda belirtilen adımlar Şekil 8'de gösterilmiştir. Yukarıda verilen zamana bağlı depolama sıcaklık değişimleri ANSYS programında 3 dakikalık periyot 1 saniye kabul edilmiştir.



Şekil 8. Mevcut ve yeni tasarım oküler gövdenin zamana bağlı depolama sıcaklık dağılım profili.

Figure 8. Time-dependent storage temperature distribution profile of the existing and new design ocular body.

Yapılan zamana bağlı çalışma ve depolama sıcaklığı analizleri sonucunda minimum ve maksimum sıcaklıkların aynı değerde olmasından dolayı pim deliği ve çevresine gelen gerilme ve gerilmelere bağlı deformasyon değerlerinin de aynı olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 9. (a) Mevcut oküler gövdenin pim çevresindeki toplam deformasyon değeri, (b) Mevcut oküler gövdenin zamana bağlı eşdeğer gerilme dağılımı, (c) Mevcut oküler gövdenin çevre koşullarında güvenlik faktörü, (d) Yeni tasarım oküler gövdenin pim çevresindeki toplam deformasyon değeri, (e) Yeni tasarım oküler gövdenin zamana bağlı eşdeğer gerilme dağılımı, (f) Yeni tasarım oküler gövdenin çevre koşullarında güvenlik faktörü.

Figure 9. (a) Total deformation value of the existing ocular body around the pin, (b) Time-dependent equivalent stress distribution of the existing ocular body, (c) Safety factor of the existing ocular body under environmental conditions, (d) Total deformation value of the new design ocular body around the pin, (e) Time-dependent equivalent stress distribution of the new design ocular body, (f) Safety factor of the new design ocular body under environmental conditions.

Mevcut oküler gövdenin, Şekil 9 (a) pim çevresinde toplam deformasyon değeri ~0.011 mm, Şekil 9 (b) pim çevresindeki zamana bağlı eşdeğer gerilme değeri 473.77 MPa ve Şekil 9 (c) çevre koşulları analizinde güvenlik faktörü ~1.1 olarak hesaplanmıştır. Yeni tasarım oküler gövdenin, Şekil 9 (d) pim çevresindeki toplam deformasyon değeri ~0.013 mm, Şekil 9 (e) pim çevresindeki zamana bağlı eşdeğer gerilme değeri 180.25 MPa ve Şekil 9 (f) çevre koşulları analizinde güvenlik faktörü ~1.5 olarak hesaplanmıştır.

Mevcut ve yeni oküler gövdeye ANSYS – Workbench programında yapılan analizlerin sonuçları Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Oküler gövdelerin analiz sonuçları.

Table 5. Analysis results of ocular bodies.

	Toplam deformasyon değeri (mm)	Eşdeğer gerilme değeri (MPa)	Güvenlik Faktörü
Mevcut	0.011	473.77	1.1
Yeni	0.013	180.25	1.5
Fark	%18 (↑)	%62 (↓)	%36 (↑)

3.3.2 Rastgele titreşim analizi

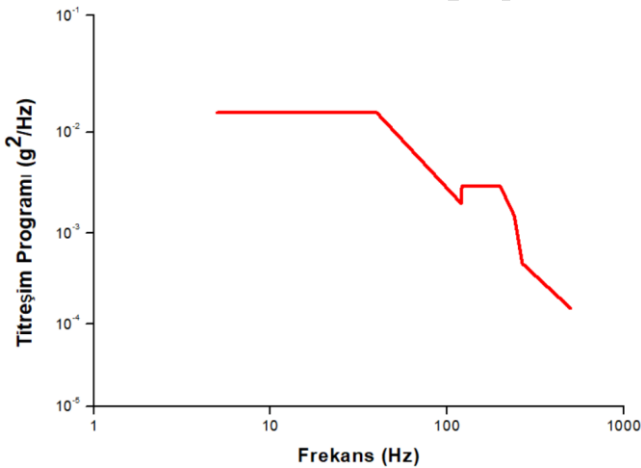
Savunma sanayi alanında çalışan firmaların test düzeneklerinde uygulamış olduğu MIL-STD-810H'ye (ABD Savunma Bakanlığı Test Yönetim Standardı) göre gündüz nişangâhının nakliyesi sırasında oküler gövdenin maruz kaldığı titreşimlerin etkilerini incelemek için Tablo 6'da verilen metot

514.8 - prosedür 1'e göre kamyon ile güvenli kargo yöntemi seçilmiştir [27].

Tablo 6. Titreşim ortamı kategorileri.
Table 6. Vibration environment categories.

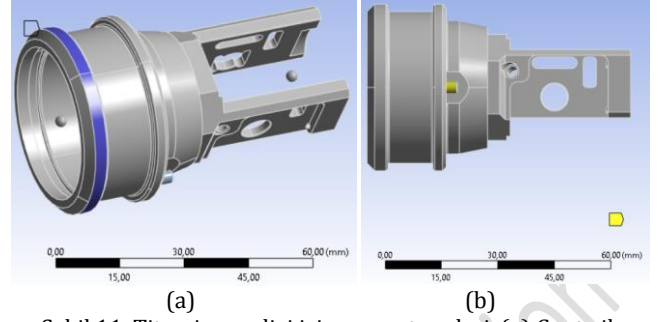
Ömür Aşaması	Platform	Kategori	Malzeme Açıklaması
İmalat / Bakım	Fabrika tesisi / Bakım tesisi	1. İmalat/Bakım süreçleri	Malzeme / Montaj / Parça
		2. Nakliye/taşıma	
		3. Çevresel stres taraması	
Taşıma	Kamyon ve römorklar	4. Güvenli kargo	Güvenli kargo olarak malzeme
		5. Gelişigüzel kargo	Gelişigüzel kargo olarak malzeme
		6. Büyük montaj taşımacılığı	Büyük montaj grupları, sığınaklar, van ve römorklar
	Uçak	7. Jet	Kargo olarak malzeme
		8. Pervane	
		9. Helikopter	
	Deniz taşıtları	10. Deniz araçları	
		11. Tren	
	Demiryolu		
Operasyonel	Uçak	12. Jet	Kurulu malzeme
		13. Pervane	
		14. Helikopter	
	Uçak gereçleri	15. Jet	Depoda monte edilmiş
		16. Jet	Depoda kurulmuş
		17. Pervane	Depoda kurulmuş
	18. Helikopter		
	Füzeler	19. Taktik füzeler	Füzeler monte edilmiş (Serbest uçuş)
	Arazi	20. Arazi araçları	Tekerlekli/palaetli/ vanlara monte edilmiş malzeme
	Deniz taşıtları	21. Deniz araçları	Kurulu malzeme
	Motorlar	22. Türbin motorları	Motorlara monte edilmiş malzeme
Personel	23. Personel	Personelce taşınan malzeme	
Tamamlayıcı	Tüm	24. En küçük bütünlük	İzolatorlerle kurulmuş/ömür döngüsü tamamlanmış
	Tüm araçlar	25. Dış konsollu	Antenler, kanat profilleri, kuleler vb.

Taşıma esnasında oküler gövdenin yönü bilinmediği için ANSYS programında Şekil 10 (MIL-STD-810H – Şekil 514.8C-3 Kategori 4) ve Tablo 7'de (MIL-STD-810H – Şekil 514.8C-II Kategori 4) verilen frekansa bağlı ASD (g^2/Hz) eğrisinin değerleri oküler gövdeye uygulanmıştır [27]. Şekil 11'de titreşim analizi için sabitleme bölgesi verilmiştir.



Şekil 10. Bilinmeyen yön için ortak taşıyıcı (ABD otayol kamyonu titreşimine maruz kalma).

Figure 10. Common carrier for unknown direction (exposure to US highway truck vibration).



Şekil 11. Titreşim analizi için mesnet yerleri. (a) Conta ile sabitleme yüzeyi, (b) Pimden yataklama.

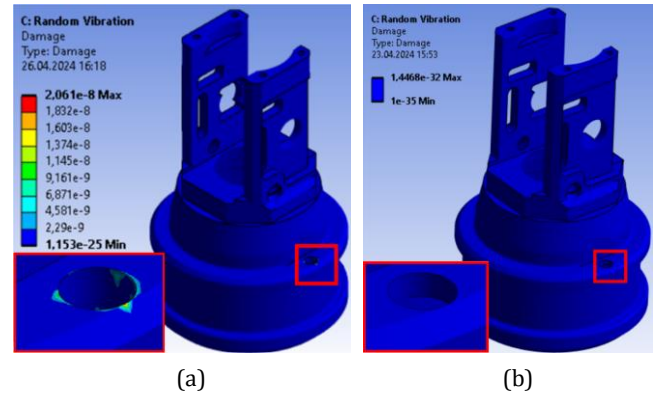
Figure 11. Support locations for vibration analysis. (a) Fixing surface with gasket. (b) Bearing from pin.

Tablo 7. Bilinmeyen yön için ortak taşıyıcı (Şekil 10' da verilen eğriler için kırılma noktaları).

Table 7. Common carrier for unknown direction (breaking points for the curves given in Figure 10).

Sınır Değerleri	
Frekans (Hz)	Otomatik spektral yoğunluk (g^2/Hz)
5	0.015
40	0.015
120	0.002025
121	0.003
200	0.003
240	0.0015
266	0.000475
500	0.00015
rms = 1.17g	

MIL-STD-810H standardında (Metot 514.8 Ek-C) belirtildiği gibi oküler gövde 60 dakika boyunca titreşime maruz bırakılmıştır [27]. Yapılan titreşim analizi sonucunda pim deliği ve çevresine gelen hasar oranı değerlerinin 1' den küçük olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 12 (a)'da verilen mevcut oküler gövdenin pim çevresindeki toplam hasar oranı değeri $\sim 2.061 \times 10^{-8}$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 12. (a) Mevcut oküler gövdenin hasar analizi, (b) Yeni tasarım oküler gövdenin hasar analizi.

Figure 12. (a) Damage analysis of the existing ocular body, (b) Damage analysis of the new design ocular body.

Şekil 12’de verilen hasar analizlerine göre pim çevresindeki toplam hasar oranı değerleri; mevcut oküler gövdede $\sim 2.061 \times 10^{-8}$ iken, yeni tasarım oküler gövdede $\sim 1.447 \times 10^{-32}$ olarak ölçülmüştür.

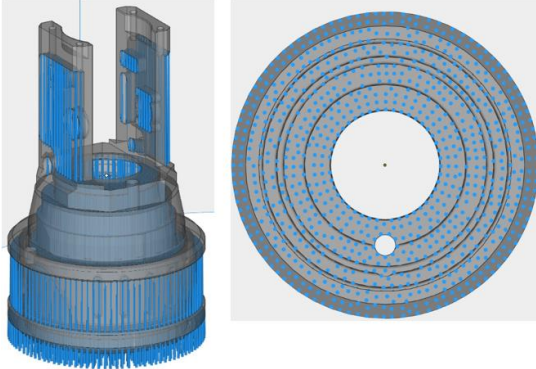
Yapılan titreşim analizi sonucunda gözlemlenen pim çevresindeki toplam hasar oranı değerinin yeni tasarımda, mevcut tasarıma göre azalmış olması, yeni tasarımda pim çevresinin titreşime daha dayanıklı olduğunu göstermektedir.

4 Yeni oküler gövdenin eklemeli imalatı

4.1 Parçanın tasarımı ve eklemeli imalatı

Şekil 13’te verilen yeni oküler gövde SolidWorks 2023 SP4 programında tasarımı tamamlandıktan sonra Metarialise Magic 25.02 programında baskı ayarları (eklemeli imalat platformunda konumlandırılması, destek yapıları ve katman kalınlığı vs.) yapılmıştır.

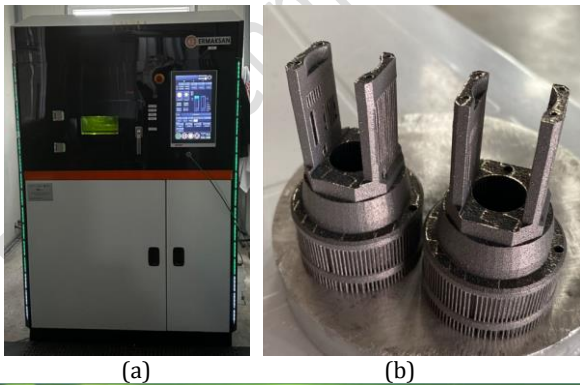
Eİ platformunda imalatı yapılacak oküler gövdenin ölçü hassasiyetinin yüksek olması hedeflendiğinden Şekil 13’te görüldüğü üzere parçanın dikey ile $45^\circ \leq$ açığı sahip yüzeylerinin tamamına destek yapı eklenmiştir.



Şekil 13. Yeni oküler gövdenin destek yapıları.

Figure 13. Support structures of the new ocular body.

Şekil 14’te verilen yeni oküler gövdenin imalatı, Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi İleri Alışım Üretim Merkezi bünyesinde yer alan ERMAKSAN Enavision 130 model lazer toz yatak füzyonu sisteminde AlSi10Mg alaşım tozu ($\leq 53 \mu\text{m}$) kullanılarak, 2433 katman olarak 20 saatte (ilk 1 saat ortamın şartlanması) gerçekleştirilmiştir.



(a)

(b)



(c)

Şekil 14. Yeni tasarım oküler gövdelerin lazer toz yatağında imalatı. (a) Lazer toz yatak füzyonu sistemi, (b) İmal edilmiş yeni tasarım oküler gövdeler, (c) İmalat platformu detayı.

Figure 14. Laser powder bed fabrication of new design ocular bodies. (a) Laser powder bed fusion system, (b) Fabricated new design ocular bodies, (c) Detail of the manufacturing platform.

Yeni oküler gövdenin, lazer toz yatak füzyonu sisteminde imalatı için kullanılan parametreler Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. İşlem parametreleri.

Table 8. Process parameters.

Lazer gücü (W)	Lazer hızı (mm/s)	Lazer çapı (μm)	Tarama mesafesi (μm)	Tarama stratejisi	Katman kalınlığı (μm)
320	800	85	110	Chess	30

4.2 İmalat sonrası parçaya uygulanan ikincil işlemler

Parça, spiral kesici aracılığıyla eklemeli imalat platformundan ayrılmıştır. Ayrılma işleminden sonra yüksek sıcaklık kapasiteli kül fırınında atmosferik basınç altında 2 saat süre ile 300°C ’de gerilim giderme tavlama uygulanmıştır. Isıl işlem sonrası parçanın yüzeyinin temizlenmesi için kumlama işlemi yapılmıştır (Şekil 15).



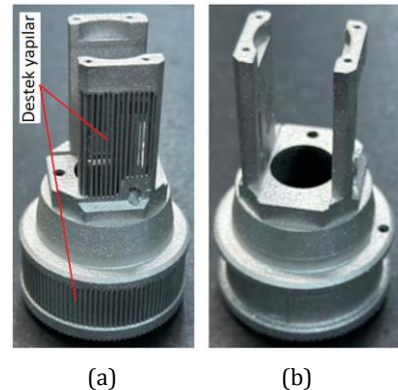
(a)

(b)

Şekil 15. (a) Kül fırını (b) tezgâh üstü kumlama makinesi.

Figure 15. (a) Muffle furnace (b) bench top shot blasting machine.

Parçanın gerilim giderme tavlama ve kumlama işlemi bittikten sonra destek yapıları, mini dişli ince kargaburun el aleti ile parçadan uzaklaştırılmıştır (Şekil 16). Eİ ile imal edilen oküler gövdenin yüzey pürüzlülüğünün giderilmesi, el ile temizlenen destek yapılarından kalan pürüzlerin parçadan tamamen temizlenmesi ve nihai geometrinin elde edilmesi için parça CNC torna ve freze makinelerinde işlenmiştir (Şekil 17).

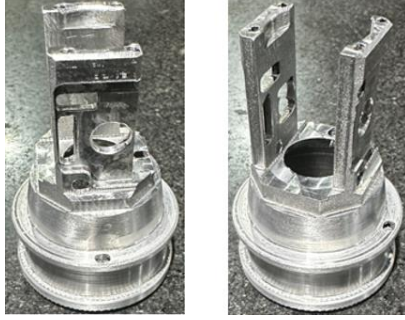


(a)

(b)

Şekil 16. (a) LPBF ile yapılan imalatla yeni oküler gövde üzerinde oluşan destek yapılar, (b) Yeni oküler gövdenin destek yapılarından temizlenmiş hali.

Figure 16. (a) Support structures formed on the new ocular body in the manufacturing with LPBF, (b) The new ocular body cleaned of support structures.



Şekil 17. Yeni oküler gövdenin destek yapıları söküldükten sonra torna ve freze ile talaşlı işlenerek nihai boyuta getirilmiş hali.

Figure 17. The new ocular body was machined to its final size using a lathe and milling machine after the support structures were removed.

5 Sonuçlar

Çalışmanın amacı, savunma sanayiinde kullanılan ve talaşlı imalat yöntemleri ile imal edilen A940 tüfek gündüz nişangâhının ağırlığını azaltmaktır. Bu amaçla gündüz nişangâhı iç bileşeni olan oküler gövdenin tasarımı değiştirilmiş ve eklemeli imalat yöntemlerinden LPBF ile imal edilmiştir. Al7075-T6 olan ilk malzemesi yerine, kaynak edilebilir özelliği sayesinde eklemeli imalata uygun AlSi10Mg kullanılmıştır. Tasarım ve malzeme değişikliklerinin ardından hem önceki hem de yeni tasarım oküler gövdenin ANSYS - Workbench programında analizleri yapılmış ve parçanın yeni malzeme ile eklemeli imalatı gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak;

- Yeni (AlSi10Mg malzeme kullanılan ve tasarımı değiştirilen) oküler gövde, ağırlık azaltmaya yönelik yapılan çalışma sonucunda mevcut oküler gövdeye göre ~%16 daha hafiftir.
- Yeni oküler gövdeye yapılan zamana bağlı sıcaklık analizi sonucunda, pim çevresindeki toplam deformasyon değeri (0.013 mm) mevcut oküler gövdeye (0.011) kıyasla ~%18 artmış, eşdeğer gerilme değeri (mevcut: 473.77 MPa, yeni tasarım: 180.25 MPa) malzemelerin akma dayanımlarındaki farktan dolayı ~%62 oranında azalmıştır.
- Hem mevcut oküler gövdenin hem de yeni oküler gövdenin, eşdeğer gerilme değerleri yüksek olsa da güvenlik kat sayılarının >1' in üstünde olmasından dolayı nihai akma sınırını aşmadığı gözlemlenmiştir.
- Titreşim altında hasar analizi sonuçları incelendiğinde, yeni oküler gövdenin hasar oranının (1.447×10^{-32}), mevcut oküler gövdeninkine (2.061×10^{-8}) kıyasla çok daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

6 Conclusions

The aim of the study is to reduce the weight of the A940 rifle day sight used in the defense industry and manufactured by

machining methods. For this purpose, the design of the ocular body, which is the internal component of the day sight, was changed and manufactured with LPBF, one of the additive manufacturing methods. Instead of the original Al7075-T6 material, AlSi10Mg, which is suitable for additive manufacturing due to its weldable properties, was used. After the design and material changes, both the previous and the new design ocular body were analyzed in ANSYS - Workbench program and additive manufacturing of the part was carried out with the new material. As a result;

- The new (AlSi10Mg material and redesigned) ocular body is ~16% lighter than the existing ocular body as a result of weight reduction efforts.
- As a result of the time-dependent temperature analysis of the new ocular body, the total deformation value around the pin (0.013 mm) increased by ~18% compared to the existing ocular body (0.011), while the equivalent stress value (existing: 473.77 MPa, new design: 180.25 MPa) decreased by ~62% due to the difference in the yield strength of the materials.
- It was observed that both the existing ocular body and the new ocular body did not exceed the ultimate yield limit, even though the equivalent stress values were high, because the safety factor was >1.
- When the results of the damage analysis under vibration are analyzed, it is observed that the damage rate of the new ocular body (1.447×10^{-32}) is much lower than that of the existing ocular body (2.061×10^{-8}).

7 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Yazar 1, fikrin oluşması, yeni tasarımın değerlendirilmesi, yazım denetimi ve içeriğin kontrol edilmesi, makalenin yazılması ve sonuçların irdelenmesi hususunda; Yazar 2, literatür taraması, yeni tasarımın çizimi, sayısal analizlerin yapılması ve sonuçların elde edilmesi hususunda katkıda bulunmuştur.

8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur." "Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır."

9 Kaynaklar

- [1] Aktürk M. Eklemeli İmalat Yöntemi ile Üretilmiş AlSi10Mg Malzemesinin Malzeme Yapısal Parametrelerinin Belirlenmesi ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Doğrulanması. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye, 2021.
- [2] Aktürk M, Korkmaz EM. "Eklemeli İmalat Yöntemi ile Üretilmiş Alüminyum Alaşımlarının Malzeme Yapısal Parametrelerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Derleme". *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 2(1), 49-60, 2021.
- [3] Rometsch PA, Zhu Y, Wu X, Huang A. "Review of high-strength aluminium alloys for additive manufacturing by laser powder bed fusion". *Materials & Design*, 219(110779), 2022.
- [4] Vanzetti M, Pavel MJ, Williamson CJ, Padovano E, Pérez-Andrade, LI, Weaver M, Brewer NL, Bondioli F, Fino P. "Design and Characterization of Innovative Gas-Atomized Al-Si-Cu-Mg Alloys for Additive Manufacturing". *Metals*, 13(11), 1845, 2023.
- [5] Aboulkhair NT, Simonelli M, Parry L, Ashcroft I, Tuck C, Hague R. "3D printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser

- melting". *Progress in materials science*, 106(100578), 2019
- [6] Tütük İ, Ural MM, Yılmaz MS, & Özer G. "Development of an Alternative Heat Treatment to the Traditional T6 Heat Treatment of AlSi10Mg Alloy Produced by Additive Manufacturing". *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1-11, 2024.
- [7] Jiang Z, Sun J, Berto F, Wang X, Qian G. "Fatigue and fracture behavior of AlSi10Mg manufactured by selective laser melting: a review". *Physical Mesomechanics*, 26(4), 367-390, 2023.
- [8] Peres LS, Gargarella P, Paiva MV, Rodrigues ADG, Adamiak M, Batalha GF. "Influence of Moisture on the Properties of AlSi10Mg Powder for Laser Powder Bed Fusion". *Materials Research*, 27, e20230490, 2024.
- [9] Kim I, Park SC, Kim YI, Kim DK, Lee KA, Oh SJ, Lee B. "Surface residual stress analysis of additive manufactured AlSi10Mg alloys". *Journal of Alloys and Compounds*, 945, 169315, 2023.
- [10] Ngo TD, Kashani A, Imbalzano G, Nguyen KTQ, Hui D. "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges". *Composites Part B: Engineering*, 143, 172-196, 2018.
- [11] Craftcloud. Dughi P. "3D Printing Aluminum - The Ultimate Guide". <https://all3dp.com/1/3d-printing-aluminum/> (19.05.2024).
- [12] Choe J, Kim KT, HunYu J, Park JM, Yang DY, Jung SH, Jo S, Joo H, Kan M, Ahn SY, Jeong SG, Kim ES, Lee H, Kim HS. "A novel route for predicting the cracking of inoculant-added AA7075 processed via laser powder bed fusion". *Additive Manufacturing*, 62, 103370, 2023.
- [13] Yamada R, Ishizawa S, Itoh G, Kurumada A, Nakai M. "Effects of environment on fatigue crack growth behavior of 2000 and 7000 series aluminum alloys". *Recent Advances in Structural Integrity Analysis - Proceedings of the International Congress*, Sydney, Australia, 9-12 December 2014.
- [14] Gatto A, Cappelletti C, Defanti S, Fabbri F. "The Corrosion Behaviour of Additively Manufactured AlSi10Mg Parts Compared to Traditional Al Alloys". *Metals*, 13(5), 913 2023.
- [15] Tiwari A, Singh G, Jayaganthan R. "Improved Corrosion Resistance Behaviour of AlSi10Mg Alloy due to Selective Laser Melting". *Coatings*, 13(2), 225, 2023.
- [16] Spignoli N, Minak G. "Influence on Fatigue Strength of Post-Process Treatments on Thin-Walled AlSi10Mg Structures Made by Additive Manufacturing". *Metals*, 13(1), 126, 2023.
- [17] Šutka J, Medvecká D, Koňar R, Bruna M, Matejka M. "Evaluation of Selected Technological Parameters for Selective Laser Melting of AlSi10Mg Metal Powder". *Manufacturing Technology*, 23(1), 110-117, 2023.
- [18] Pirinu A, Primo T, Del Prete A, Panella FW, De Pascalis F. "Mechanical behaviour of AlSi10Mg lattice structures manufactured by the Selective Laser Melting (SLM)". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 124(5), 1651-1680, 2023.
- [19] Bosio F, Shen H, Liu Y, Lombardi M, Rometsch P, Wu X, Zhu Y, Huang A. "Production strategy for manufacturing large-scale AlSi10Mg components by laser powder bed fusion". *Jom*, 73(3), 770-780, 2021.
- [20] Gite RE, Wakchaure VD. "A review on process parameters, microstructure and mechanical properties of additively manufactured AlSi10Mg alloy". *Materials today: Proceedings*, 72(3), 966-986, 2023.
- [21] Lupi G, Minerva G, Patriarca L, Casati R, Beretta S. "Fracture toughness of AlSi10Mg alloy produced by LPBF: effects of orientation and heat treatment". *International Journal of Fracture*, 1-16, 2024.
- [22] Paolino DS, Tridello A, Fiocchi J, Biffi CA, Chiandussi G, Rossetto M, Tuissi A. "VHCF Response up to 109 Cycles of SLM AlSi10Mg Specimens Built in a Vertical Direction". *Applied Sciences*, 9(15), 2954, 2019.
- [23] Delva. "Aluminium AlSi10Mg for 3D Printing". <https://delva.fi/en/aluminum/> (21.05.2024).
- [24] Özsoy AL, Şirin E, Yıldırım ÇV, Sarıkaya M. "AlSi10Mg Alaşımının SLM Yöntemiyle Üretilmesinde Proses Parametrelerinin Yüzey Kalitesi Üzerindeki Etkisi". *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 12(2), 480-493, 2024.
- [25] Additive 3D Printing. "Features of 3D Printed AlSi10Mg Aluminium". <https://additive-3d.com/aluminium-AlSi10Mg-3d-printing.html> (21.05.2024).
- [26] ASELSAN Hassas Optik A.Ş. "A940 1x-4x Gündüz Nişangâhı". <https://aho.com.tr/tr/urunler/gunduz-gorus/a940-1x-4x-gunduz-nisangahi> (09.01.2024).
- [27] Trenton Systems. "Vibration Test Method MIL-STD-810 Method 514.8 Vibration". https://www.trentonsystems.com/hubfs/vibration_test_method_milstd810h.pdf (10.01.2024).