

UZAY ARAÇLARINDA EKLEMELİ İMALATLA ÜRETİLMİŞ TERMO-PLASTİK MALZEME UYGULAMALARI

Mehmet Şahin¹ ve Halil İbrahim Erol²
TUSAŞ, Ankara

İbrahim Erdem Tekin³ ve Güneş Güngör⁴
TUSAŞ, Ankara

ÖZET

Gelişen yapısal optimizasyon yöntemleri ile daha hafif fakat geometrik olarak daha karmaşık yapısalarda elde edilebilmektedir. Bu tür yapıların konvansiyonel imalat yöntemleri ile imal edilmeleri nispeten zor ve pahalı olması gibi olumsuzluklar eklemeli imalat yöntemleri ve malzemeleri ile aşılmaktadır. Eklemeli imalat teknolojilerinde gelişmeler ve yeni geliştirilen malzemeler bu teknolojinin kullanım alanlarını genişletmektedir. Uzay ve hava araçlarında hafif malzeme kullanımı en öncelikle olması ve termo-plastik malzemelerin hafiflikleri ile öne çıkması nedeniyle optimize edilmiş bu tür hafif malzemelerden yapısal parçaların geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada uzay araçlarında konvansiyonel olarak kullanılan metal braketlerin termo-plastik malzeme olarak eklemeli imalat yöntemi ile üreterek, daha hafif, etkin ve ekonomik braketlerin kullanılmasını sağlamak için gerçekleştirilen prototip üretim çalışmaları ele alınmıştır. Prototip üretimi için yapılan çalışmalar termo-plastik malzeme seçimi, eklemeli imalat yönteminin belirlenmesi, tasarım, analiz, üretim ve testleri kapsamaktadır. Çalışma daha hafif ve ekonomik uzay araçları üretimi için alternatif malzeme kullanımı ve yeni imalat yöntemi ile üretim uygulaması olarak değerlendirilmekte ve daha büyük yapısal parçaların geliştirilmesinde bir adım olarak görülmektedir..

GİRİŞ

Yeni geliştirilen yeteri derecede düşük genleşme katsayılı, yüksek sıcaklara dayanıklı, düşük outgassing değerlerine sahip ve mukavemeti yüksek termo-plastik malzemeler uzay yapısal sistemlerinde yaygınlaşmaktadır. Termo-plastik malzemeler daha çok destek elemanları veya nispeten küçük panel ve dikme gibi yapısal elemanlarda kullanılmaktadır. Bu konuda uygulamalar yaygınlaşmakta ve daha nitelikli malzeme üretme konusunda etkin çalışmalar yapılmaktadır[Ray, 1990, Toraytac, 2022]. Bunlara örnek olarak polyether ether keton (PEEK) ve polyether keton keton (PEKK) türü malzemelerdir[Nakamura, Nakamura, Fujita, Noguchi, ve Imagawa, 2004, Pedoto1a, G., Smerdova, O., Grandidier, J-G., Gigliotti, M. ve Vinet, A, 2020, Stratasys, 2020]. Bu malzemeler NASA ve ESA gaz salınım (outgassing) standartlarını sağlayan malzemelerdir [NASA, 2022, ESA ESMET, 2022]. Ayrıca bu termo-plastik malzemelere nano katlı malzemeler katılarak farklı fiziksel özellikleri değiştirilebilmektedir[Baek, I., Lim, C-M., Park, Y. P., ve Ryu, B., K, 2022].

Son yıllarda özellikle yeni termo-plastik malzemeler ve eklemeli imalat yöntemlerindeki gelişmeler ve ilerlemeler sonucu termo-plastik malzemelerin uzay araçları farklı yapısal elemanlarında kullanımı yaygınlaşmaya başlamış bulunmaktadır[Nakamura, T., Imagawa, K., 2004, Pedoto1a, G., Smerdova, O., Grandidier, J-G., Gigliotti, M. ve Vinet, A, 2020]. Uzay araçlarında hafiflik için plastik malzemeler uygun olmasına rağmen mukavemet, rijitlik ve uzay çevresel şartlarına uygunlukları noktasında şartları sağlayamadıkları için genellikle kullanılamamıştır veya bu özelliklere sahip çok sınırlı sayıda plastik malzemeler kullanılabilmektedir. Uzay çevre şartları çok düşük sıcaklık, vakum

¹ Dr. Kıd. Uzm. Müh., TUSAŞ, E-posta: mehmet.sahin2@tai.com.tr

² Uzm. Müh., E-posta: halilibrahim.erol@tai.com.tr

³ Müh., E-posta: ibrahimerdem.tekin@tai.com.tr

⁴ Uzman Müh., E-posta: gunes.gungor@tai.com.tr

ortamı, radyasyon ve bulunduğu yörüngeye bağlı olarak atomik oksijen gibi malzeme özelliklerini direkt olarak etkileyen olumsuzlukları barındırmaktadır. Bu tür etkilere karşı metaller daha uygun olması nedeniyle özellikle alüminyum, titanyum gibi nispeten düşük yoğunluklu metaller ve alaşımları tercih edilmektedir. Gelişen eklemeli imalat (üç boyutlu baskı) teknolojilerinin yaygın kullanılmaya başlandığı alanlardan biride uzay ve havacılık yapısalı olmaya başlamıştır[Rinaldi, M, Cecchini, F, Pigliaru, L, Ghidini, T, Lumaca, F ve Nanni, F, 2021]. Bu tür uygulamalarda metal malzemeli yapısal destek elemanları ve braketleri eklemeli imalat yöntemleri ile üretilen ve kullanılan en yaygın yapısal parçalardır.

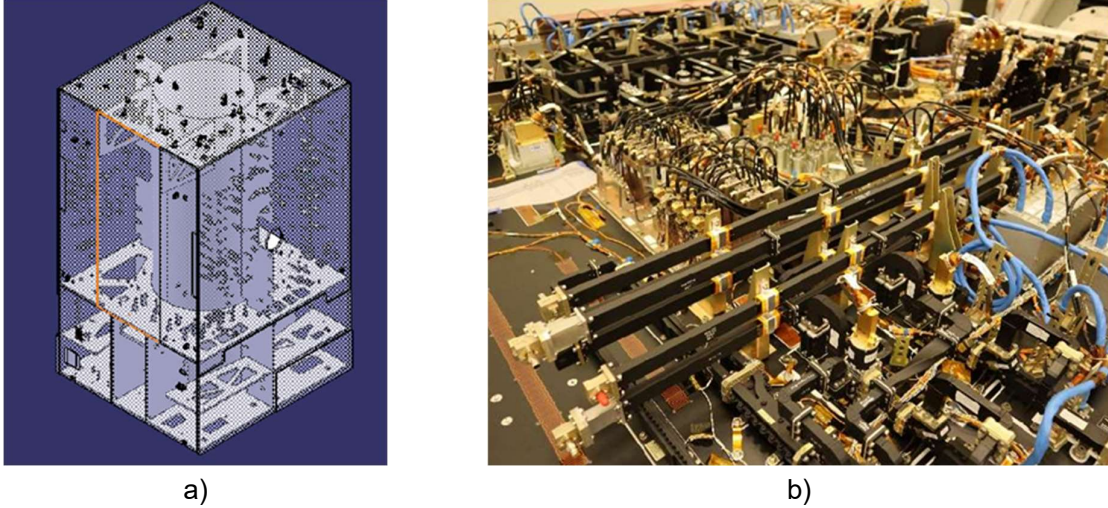
Termo-plastik kompozit malzemeler termo-set malzemelere göre nispeten kolay ve hızlı üretilebiliyor olması nedeniyle özellikle hafiflik gerektiren uzay ve havacılık yapısal parçalarında konvansiyonel metal parçalara alternatif malzeme olarak görülmektedir. Plastik malzemeler genellikle istenmeyen yüksek outgassing özelliklerine sahip olduğu için vakum ortamlarına uygun değildirler[ECSS-E-HB-31-01, 2011, ECSS-Q-ST-70-71, 2019, ECSS-Q-ST-70C, 2019]. Fakat son yıllarda PEEK ve PEKK gibi outgassing özellikleri düşük, yüksek katılık ve mukavemete sahip, yüksek sıcaklıklara dayanıklı termo-plastik malzemeler üretilmiş olup uzay araçlarında kullanılmaya başlanmıştır[Abdullah, F., Okuyama, K., Fajardo, I. ve Urakami, N, 2020, Pedoto1a, G., Smerdova, O., Grandidier, J-G., Gigliotti, M. ve Vinet, A., 2020, Rinaldi, M, Cecchini, F, Pigliaru, L, Ghidini, T, Lumaca, F ve Nanni, F., 2021]. PEKK termo-plastik malzemelere yüzde 3 oranda karbon nanotüp katkı malzemesi katılarak statik elektrik biriktirmeyen malzeme elde edilmiştir[Stratasys, 2022]. Bu malzeme rijitliği yüksek olmasa da mukavemeti küçük boyutlu yapısal elemanlar için uygundur. Örnek uygulama olarak elektronik devre kutuları, kablaj ve dalga klavuzu destek elemanları, küçük braketler ve diğer üçüncü derece diğer yapısal parçalardır. Uzay ve havacılıkta kullanılan daha büyük metal yapısal parçaların yerine vakum ve ekstrem ısı şartlarında yapısal kararlılık gösteren, istenilen fiziksel özellikleri sağlayan termo-plastik malzeme kullanılması üzerine kapsamlı çalışmalar yapılmaktadır[Stratasys, 2022, Toraytac, 2022]. Bu alanda malzeme geliştirme, eklemeli imalat yöntemleri kullanımı, ve optimizasyon yöntemleri ile daha ekonomik ve hafif yapısal malzeme elde etme konuları üzerine araştırmalar yürütülmektedir.

Uydu yapısal parçalarının daha hafif malzemelerden üretilmesi, uydulara daha uzun görev ömrü ve daha fazla faydalı yük imkânı sağlayarak uyduların ekonomik verimliliğini artırma imkanı sağlar. Bu çalışma daha ekonomik uydu üretimi için hafif malzeme kullanarak uydu kütlesini azaltıp daha fazla ve kapasiteli faydalı yük kullanımını sağlamak için yürütülen yapısal eleman geliştirme faaliyetleri üzerinedir. Çalışmada statik elektrik yüklemesi yapmayan ve oldukça yüksek sıcaklıkta yeterli mukavemete sahip PEKK termo-plastik malzemelerin eklemeli imalat yöntemleri ile üretilerek, konvansiyonel metal uydu kablaj destek elemanları ve tutturma plakaları yerine kullanılması amaçlanmıştır. Bu konuda yapılan çalışmalar incelenerek özellikle kütleli olarak metal yerine kullanılacak destek elemanlarının uygun bir uygulama potansiyeli olduğu belirlenmiştir. Yapılan tasarımlar analizlerle doğrulanmış ve prototip imalatları yapılmıştır ve testlerle kalifiye çalışmaları devam etmektedir. Tasarımlar da eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan eriyik yığıma modellemesinin yöne ve konuma bağlı farklı malzeme özellikleri oluşturması göz bulundurularak kritik yüklenme yönüne göre en yüksek elastik modülü ve mukavemeti elde etmek için üretim yönü ve oryantasyonu belirlenmiştir. Analizler de daha güvenli olmak için en düşük yöne bağlı elastik modülü ve mukavemet değerleri göz önünde bulundurulmuştur. Daha önce gerçek uydularda kullanılmış destek braketleri delikleri eklemeli imalata daha uygun olması için kapatılarak yüksek mukavemet elde edilmiştir. Yapılan analizlerde güvenlik marjineri sıfırdan büyüktür. Hacimsel olarak daha fazla hacim kullanılsa bile kütle olarak yüzde 40-50 oranında kazanım (azalma) elde edilmiştir. Güvenlik marjineri yükseltilerek daha güvenli braket elde edilecektir.

TERMO-PLASTİK MALZEMELERİN UZAY ARAÇLARINDA KULLANIMI

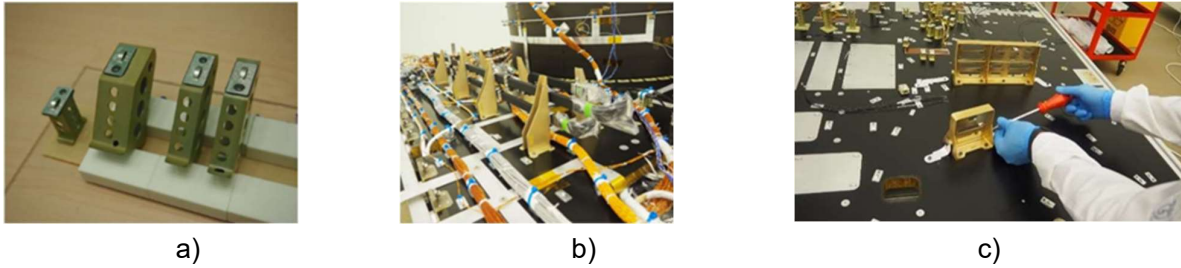
Uzay ve havacılıkta kütle azaltılması en önemli hedeflerden başında gelmektedir. Uydularda metal yerine termo-plastik malzemeler kullanılarak kütle azaltılması mümkündür. Haberleşme uydularında alüminyum destek braketlerinin toplam ağırlığı 20 kg ı bulabilmektedir. Şekil 1 a) tipik bir haberleşme uydusunda kullanılan tüm destek braketleri uydu üzerinde gösterilmiştir. Şekil 1 b) de gerçek bir haberleşme uydusu faydalı yük paneli üzerindeki farklı destek braketleri gösterilmiştir: Termo-plastik malzemelerin yoğunlukları 1.3 gr/cm³ civarında olduğu kabul edildiğinde alüminyum alaşımlarına

(yoğunluk 2.7 gr/cm^3) a göre yaklaşık yüzde 50 ye kadar kütle azaltılması mümkündür ve toplamda yaklaşık 10 kg lık bir kütle azaltılmasına denk gelmektedir. Buda orta büyüklükte kuru yük kütlesi 1500 kg civarında olan bir haberleşme uydusunda yüzde 0.7 (% 0.7) ya varan azaltmayı mümkün kılmaktadır. Bu oran kg başına maliyet açısından en pahalı sektör olan uzay araçlarında kayda değer bir orandır.



Şekil 1. Haberleşme uydusu üzerinde kablolama destek elemanları a) Destek braketleri dağılımı
b) faydalı yük paneli ve kablolama destek elemanları

Uydularda kablolama destek elemanları ana olarak kablo ve dalga klavuzu destek elemanları ve bağlantı konektörlerinden oluşmaktadır: Şekil 2 a) b) ve c) de farklı destek eleman tipleri gösterilmiştir. Bu tür braketlerin her biri ortalama olarak 10-15 gram civarında olup yüzlerce kullanılmaktadır ve ayrıca braket üzerine kabloyu tutturmak içinde ayrı olarak metal bağlantı plakasıda yapıştirilmektedir. Şekil 3 de bu konfigürasyon gösterilmiştir.

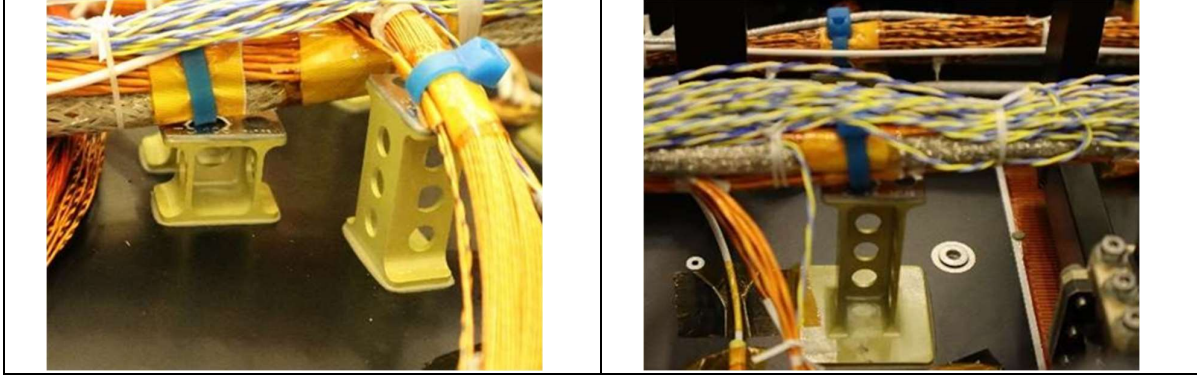


Şekil 2: Uydu kablolama sistemi için kullanılan farklı metal destek braketleri, a) kablo destek braketleri, b) dalga klavuzu destek braketleri, c) konektör braketleri

Uzay sektöründe ürünlerin ilgili tüm standartları sağlayarak sıkı kalite kontrol ve testlerden geçmiş olması gerekmektedir[ECSS-E-HB-31-01, 2011, ECSS-Q-ST-70-71, 2019, ECSS-Q-ST-70C, 2019]. Yeni geliştirilecek yapısal parçaların ve ekipmanların geliştirilmesinde ve prototip üretiminde ilgili süreçlerin yapılması büyük önem arz etmektedir. Yapısal prototip üretimi, yeni malzemenin seçimine ve kalifikasyonu, tasarım ve analizlerinin yapılması, üretim metodunun geliştirilmesi ve üretimi, üretilen yapısal elemanların statik ve çevresel testlere tabii tutularak uygunluğunun teyid edilmesini kapsamaktadır. Aşağıdaki bölümlerde bu konular sırası ile açıklanmıştır.

Malzeme olarak uzay şartlarına uygun ve üzerinde statik elektrik biriktirmeyen (ESD termo-plastik malzeme olan PEKK ESD malzemesi belirlenmiştir. Bu malzemenin mekanik ve fiziksel özellikleri incelenerek uygunluğu belirlenmiştir. Uzay şartlarına uygunluğu olarak düşük outgassing ve yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini sağlaması en önemli

kriterlerdir.



Şekil 3. Gerçek uydu üzerindeki alüminyum kablaj destek elemanları

Malzemelerde Gaz Salınımı (Outgassing)

Outgassing çok düşük basınç altında malzemelerin moleküler yapısının bozularak içerisindeki moleküllerinin ortam içerisinde serbest hale gelerek uçmasıdır. Bu durum malzemelerin fiziksel özelliklerinin zayıflamasına ve uçan moleküllerin etrafındaki diğer hassas ekipmanlar üzerine yapışarak onların performansını etkiler. Bu nedenle uzay ortamına maruz kalacak malzemelerin bu tür ortamlardaki moleküller bozulma seviyesinin tespiti için standart testler yapılarak bozulma özellikleri tespit edilir. ESA ve ASTM outgassing ölçümleri için standartlar yayınlamışlardır.

NASA ve ESA gibi kuruluşlar malzeme outgassing veri tabanlarını oluşturarak uzay araçlarında kullanılacak malzeme seçiminde önemli bir kriterin seçimini kolaylaştırmaktadırlar. Herhangi bir malzemenin outgassing özelliklerinin tespiti zaman alıcı ve pahalı olması nedeniyle bir kez yapılabildiği veri tabanına kaydedilmektedir malzemelerdir[NASA, 2022, ESA ESMET, 2022]. Outgassing özellikleri temel olarak geri kazanılan kütle kaybı (GKKK) ile toplanmış kararsız toplanabilir malzeme (TKTM) oranları ile tanımlanmaktadır. ECSS ve NASA standartlarına göre uzay araçlarında kullanılacak malzemeler için bu oranlar sırası ile yüzde 1 ve yüzde 0.1 den az olması istenmektedir [ECSS-Q-70, 2019]. PEKK malzemesi bu özellikleri sağlayan az sayıda termoplastik malzemelerden biridir.

PEKK Malzeme Özellikleri

Uzay araçlarında statik elektriğin uygun topraklama yöntemi ile deşarj edilmesi ve metal harici malzemelerinde statik elektrik biriktirmeyen (ESD) özellikte olması veya uygun şekilde topraklanması gerektirmektedir. Bu özelliklere sahip termoplastik malzeme olarak PEKK malzemesi öne çıkmaktadır ve düşük yoğunluk ve nispeten yüksek sıcaklıklara dayanıklı olması nedeniyle uzay araçlarında kullanım potansiyeli olan malzemedir. PEKK malzemeleri uzay araçlarında nispeten küçük ölçekli yapısal elemanlarda metal malzemelere alternatif olarak görülmeye başlamıştır. Bu çalışmadaki destek elemanları için ticari ismi Antero™ 840CN03 olan PEKK temelli malzeme kullanılmıştır. Eriyik yığılma metodu (FDM) eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiştir. Bu malzeme özellikle düşük outgassing özellikleri olan, kimyasal sert çevre şartlarına ve aşınmaya karşı dayanıklı ve ESD değeri 10^4 - 10^9 ohm/inch² aralığına da olan termoplastik bir malzemedir. Bu malzemeye ağırlık olarak %3 oranında karbon nanotüp malzeme katılarak ESD özelliği artırılmıştır. Tablo-1 de eklemeli imalat ile üretilecek olan PEKK malzemesinin üretim yönüne bağlı olarak mekanik özellikleri gösterilmiştir. FDM ile üretilen malzemeler yapının üretimindeki yığılma yönüne bağlı olarak farklı yönde farklı mekanik özellikleri gösterdiğinden analizlerde emniyetli tarafta olmak için en düşük değerleri veren ZX üretim eksenine ve çekme altındaki elastik modülüne sahip olduğu varsayılmıştır. Analizler için bu malzemeyi üreten üreticinin sağlamış olduğu değerler kullanılmıştır. Uzay uygulamalarında yapısal parça üreticileri kendi malzeme kalifikasyon testlerini yaparak kendi elde ettikleri malzeme özelliklerini kullanmaktadırlar.

Tablo 1. PEKK malzeme özellikleri (Üretici verileri)

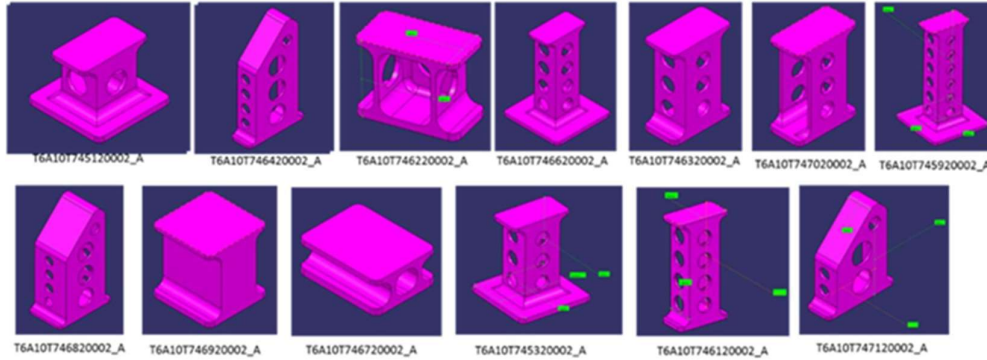
Malzeme Parametreleri	Alüminyum	PEKK
Minimum Elastik Modül (GPa) (Basma)	71	2.52
Kütle Yoğunluğu (kg/m ³)	2800	1270
Çekme Gerilmesi Limit (MPa)	365	56
Basma Gerilmesi Limit (MPa)	385	109
HDT @ 66 psi ©(C)	-	149.5

Prototip Üretimi

Prototip üretimi için yapılan çalışmalar termo-plastik malzeme seçimi, eklemeli imalat yönteminin belirlenmesi, tasarım, analiz, üretim ve testleri kapsamaktadır. Üretim akışı şu şekildedir.

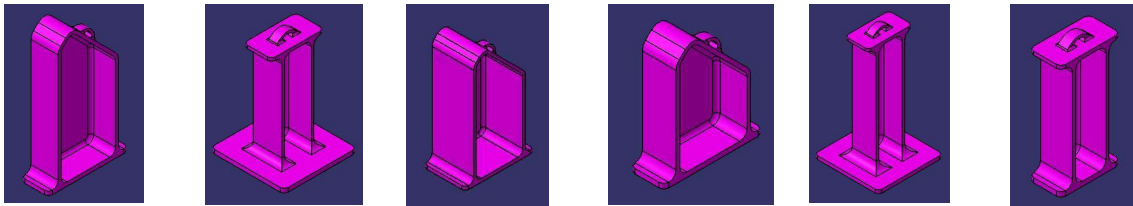
- CAD Modellerin oluşturulması
- Malzeme seçimi ve eklemeli imalat üretim pozisyonların belirlenmesi
- Sonlu elemanlar modelin oluşturulması
- Eklemeli imalat için üretim modelinin elde edilerek üretimin yapılması
- Muayene ve testler

Şekil 4. de gerçek haberleşme uydularında kullanılmış alüminyum malzemeden üretilmiş destek braketlerinin CAD modelleri gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi kütle azaltılması amacı ile için delikler yerleştirilmiştir. Fakat bu işlem delikler etrafında gerilim yığılmaları oluşmasına sebep olmakta ve üretim süresini ve fazla malzeme sarfiyatına sebep olmaktadır.



Şekil 4. Alüminyum malzemeden üretilmiş destek braketlerinin CAD modelleri

PEKK malzemeden eklemeli imalatla üretilen destek braketlerinin CAD çizimleri Şekil 5. gösterilmiştir. Bu tasarımda delikler kapatılarak lokal stress yığılmaları önlenmiş ve eklemeli imalatla daha az destek elemanının yanısıra dengeli ve düzenli elastik modüller elde edilmesi sağlanmış olacaktır.



Şekil 5. PEKK malzemeli yükseltme braketleri CAD modelleri

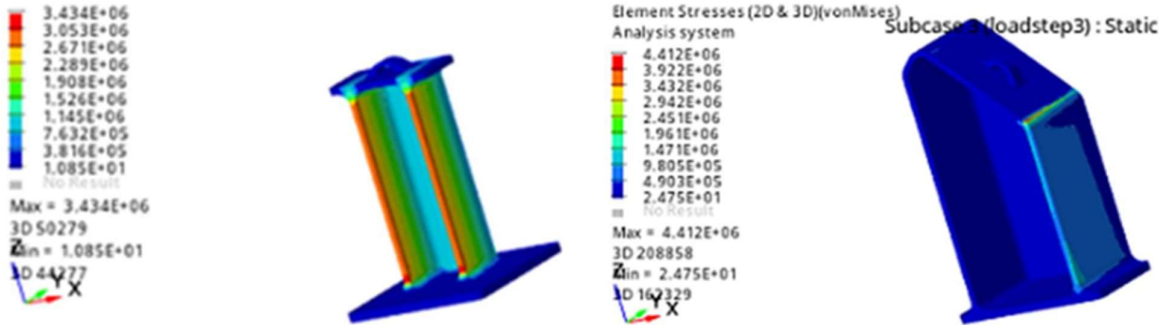
Tablo 2. de Kablo destek braketleri tasarım yükleri, alüminyum ve PEKK malzemeli kütleleri ve PEKK malzemeden üretildiğinde elde edilen kütle kazanımları (azaltılması) gösterilmiştir. PEKK malzeme kullanımı ortalama olarak % 47 kütle kazanımı sağladığı görülmektedir. Hedef olarak en az üçte bir (% 33) kütle kazanımı fazlası ile sağlanmaktadır. Braketin daha emniyetli olması için duvar kalınlıkları artırılarak güvenlik marjı yükseltilebilir. Bunun için fazlasıyla kütle marjı bulunmaktadır. Konvansiyonel alüminyum malzeme kullanımında kabloyu brakete tutturmak için ayrıca alüminyum plaka kullanılmaktadır. Kütle kazanımı yanında eklemeli imalat yöntemi ile bu iki parçalı yapı tek bir parça olarak üretilerek malzeme, zaman ve işçilikten tasarruf sağlamış olacaktır.

Tablo 2. Braketlerin tasarım yükleri, ağırlıkları ve kütle kazanımları

Braket No	Braket üzerindeki kablo yükü [kg]	Braket malzemesi PEKK (kg)	Braket malzemesi Alüminyum (kg)	Kütle kazancı (Azalımı) %
74592	0.41	0.01	0.018	44
74612	0.12	0.005	0.010	50
74642	0.15	0.008	0.013	38
74662	0.41	0.008	0.015	47
74682	0.15	0.012	0.025	52
74712	0.15	0.006	0.012	50
Ortalama (%)				47

Sonlu Elemanlar Analizi

Braketler sonlu elemanlar metodu ile yükleme analizleri yapılmıştır. Destek braketleri yükleri taşıdığı kablounun uzunluğuna ve kablo birim uzunluk ağırlığına göre değişmektedir. Bu yükler kablo alt sistemi tasarım grubu tarafından belirlenmektedir. Yükler Tablo 2. de gösterilmiştir. Yük uygulama noktası, üzerinden geçen kablounun yarıçapı kadar olacak şekilde belirlenerek modellenmiştir. Atalet yükleri her bir yönde 20g olacak şekilde uygulanmıştır. Yükleme sonucu oluşan gerilim değerleri kritik gerilim değerleri ile karşılaştırılarak gerekli model ve analiz düzeltmeleri yapılmış ve tümünün uygunlukları teyit edilmiştir. Şekil 6. da örnek bir analiz sonucu gösterilmiştir.



Şekil 6. Sonlu elemanlar metodu analizi

Üretim

Üretim için analizlerde gerilim dağılımları dikkate alınarak üretim konum ve oryantasyonları belirlenerek üretim tablası oluşturulmuş ve üretimleri yapılmıştır. Üretilen braketler Şekil 10 da gösterilmiştir. Eklemeli imalat için Eriyik Yığma Metodu (FDM) ile üretim yapan baskı makinası kullanılmıştır.



Şekil 7. PEKK ESD malzemeden üretilmiş kablaj destek braketleri

DEĞERLENDİRME

Uzay ve havacılıkta haberleşme uyduları gibi uzun süre görev yapan uzay araçlarında kütle başına fırlatma ve işletme maliyeti çok yüksektir. Tasarımcılar için kütle azaltma yolu ile daha verimli ve kapasiteli haberleşme uyduları ve diğer uzay araçları geliştirmek en önemli tasarım hedefleri arasındadır. Kütle azaltımı için uygun hafif malzeme ve optimizasyon yöntemleri kullanımı en temel yöntemlerdir. Bu çalışmada metal malzeme yerine uzay çevre şartlarına uygun yüksek mukavemetli termo-plastik malzeme kullanarak optimize edilmiş ve eklemeli imalat yöntemlerinin avantajlarını kullanarak üretilmiş daha az kütleli ve daha ekonomik yapısal destek elemanlarının elde edilebileceği gösterilmiştir. Geleneksel olarak kullanılan alüminyum metal destek braketleri yerine termo-plastik malzeme kullanarak yüzde elli (%50) civarında kütle azaltmasının yapılabileceği ortaya çıkmıştır. Bu çalışmanın son aşaması olan test çalışmaları devam etmektedir. Çalışmanın bir sonraki aşaması olarak daha büyük boyutlu olan metal dalga klavuzu gibi destek braketlerinde termo-plastik malzeme (PEKK) kullanarak prototip üretimini yapmak hedeflenmektedir. Bu sayede tüm kablaj destek braketlerinin eklemeli imalat yöntemleri ile daha hafif malzeme kullanarak üretilbileceğini gösterip ve kullanarak daha ekonomik uydu üretimine katkıda bulunulması hedeflenmektedir.

SONUÇ

Uydularda kütle azaltımı en önemli hedefdir. Bunun için optimal geometrik şekilli ve hafif malzemeden yapılmış yapısal elemanların kullanımı önemlidir. Yeni hafif, yüksek mukavemete sahip ve farklı amaçlara uygun malzemeler geliştirilmektedir. Bu tür malzemelerin uzay şartlarına uygun olanlarının teyid edilebilmesi için prototiplerinin üretilip test edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada termo-plastik malzemelerin daha hafif ve uygun mukavemete sahip olması nedeniyle uzay araçlarında yapısal kablaj destek braketlerinde kullanılması amacıyla yapılan prototip üretim ve test çalışmaları ele alınmıştır. Konvansiyonel olarak kullanılan metal alüminyum destek braketleri yerine PEKK türü termo-plastik malzeme kullanımının yüzde elliye varan kütle tasarrufu sağlayabileceği teorik olarak gösterilmiştir ve bunun gerçek uygulaması için prototip çalışması gerçekleştirilmiştir. Protop üretimi için tasarım, üretim ve test süreçleri planlanmıştır. Tasarımda var olan konvansiyonel metal braketlerin modifiye edilerek optimizasyon çalışması yapılmıştır. Eklemeli imalatta braketlerin en uygun ve yüksek mukavemete sağlayacak şekilde üretilmesi sağlanmıştır. Üretim yapılarak test sürecine başlanılmış bulunmaktadır ve devam etmektedir. Dalga klavuzu gibi daha büyük destek parçalarında benzer şekilde prototip üretiminin yapılarak termo-plastik malzemelerin uzay araçlarında daha yaygın kullanılması hedeflenmektedir.

Teşekkür

Yazarlar bu çalışmadaki maddi ve teknik imkan desteklerinden dolayı TUSAŞ yönetimine ve ilgili birim yöneticilerine teşekkürlerini bildirmektedirler.

Kaynaklar

- Abdullah, F., Okuyama, K., Fajardo, I. ve Urakami, N., *In Situ Measurement of Carbon Fibre/Polyether Ether Ketone Thermal Expansion in Low Earth Orbit*. Aerospace, 7(4), 2020.
- Baek, I., Lim, C-M., Park, Y. P., ve Ryu, B., K., *Enhanced Metal Coating Adhesion by Surface Modification of 3D Printed PEKKs*, Coatings, 12, 2022, 854
- ECSS-E-HB-31-01 Part 5A – *Thermal design handbook – Part 5: Structural Materials: Metallic and Composite* 5 Aralık 2011
- ECSS-Q-ST-70-71C Rev.1 – *Materials, processes and their data selection*, 15 Ekim 2019
- ECSS-Q-ST-70C Rev.2 – *Materials, mechanical parts and processes*, 15 October 2019
- Nakamura, T., Nakamura, H., Fujita, O., Noguchi, T. Ve Imagawa, K. *The space exposure experiment of PEEK sheets under tensile stress*. JSME International Journal, Series A, Vol. 47, No. 3, 2004
- ESA, ESMAT Outgassing database http://esmat.esa.int/services/outgassing_data/outgassing_data.html 11 mart 2022 tarihinde erişilmiştir.
- Pedoto Ia, G., Smerdova, O., Grandidier, J-G., Gigliotti, M. ve Vinet, A., *Characterization of the mechanical behavior of PEKK polymer and C/PEKK composite materials for aeronautical applications below and above the glass transition temperature*, Advances in Aircraft and Spacecraft Science, Vol. 7, No. 6, 2020, 475-493
- NASA, Outgassing Data for Selecting Spacecraft Materials Online, <https://outgassing.nasa.gov>, 11 Mart 2022 tarihinde erişilmiştir.
- Ray, G., *Potential for Advanced Thermoplastic Composites in Space Systems*, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831-7294 Report Number: CONF-901104-1, 4 Kasım 1990
- Rinaldi, M, Cecchini, F, Pigliaru, L, Ghidini, T, Lumaca, F ve Nanni, F, *Additive Manufacturing of Polyether Ether Ketone (PEEK) for Space Applications: A Nanosat Polymeric Structure*, Polymers, 13,2011, 11
- Stratasys, *Custom Materials Development Enables ESD-Safe 3D Printed Aerospace Parts* <https://www.stratasys.com.cn/explore/blog/esd-pekk-3d-printing>, 11 Mayıs 2022 tarihinde erişilmiştir.
- Toraytac, *Thermoplastic composites technology: A view from Europe*, Toray_Thermoplastic-Composites_A-View-from-Europe_CW.pdf (toraytac.com), 11 mart 2022 tarihinde erişilmiştir.