

İnsansız Hava Araçları için Test Düzeneği Tasarımı ve Üretimi

A. Eray BARAN¹, Cevdet HANÇER¹, Egemen ÇALIKOĞLU¹
Emre DUMAN¹, Ertuğrul ÇETİNSOY¹, Mustafa ÜNEL¹, Mahmut F. AKŞİT¹

¹ Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi
Mekatronik Mühendisliği Programı
Sabancı Üniversitesi, 34956 İstanbul

{eraybaran, chancer, ecalikoglu, eduman, cetinsoy}@su.sabanciuniv.edu
{munel, aksit}@sabanciuniv.edu

Özetçe

Boyutları kullanım amaçlarına göre değişkenlik gösteren insansız hava araçlarının (İHA), mekanik, elektronik ve yazılım alanlarında birçok yenilikler getiriyor olması bu konuda çalışan araştırmacıların günden güne daha çok ilgisini çekmektedir. Bu çalışmada, bir İHA için kontrol algoritmalarının test edilebileceği bir düzeneğin tasarım ve üretimi anlatılmıştır. Düzeneğin üretilmesini takiben gerekli dayanıklılık testleri yapılmış ve benzetimlerle örtüşen dayanıklılık sonuçları elde edilmiştir.

1. Giriş

İnsansız hava araçları (Unmanned Aerial Vehicles- UAV), uçuş esnasında pilot taşımayan, uzaktan manuel kontrolle ya da kendi taşıdıkları kontrolörlerle kumanda edilebilen uçan robotlar olarak tanımlanabilir. Fonksiyonel niteliklerine göre sınıflandırıldıklarında İHA'ların; gözetleme, keşif, uzaktan algılama ve askeri misyonlar gibi savunma tabanlı amaçlarının yanı sıra son yıllarda artan bir şekilde özellikle ulaştırma, meteorolojik keşif ve zirai ilaçlama gibi sivil ve ticari amaçlar için de kullanımları gitgide yaygınlaşmaktadır [1]. Tarihsel olarak bu konudaki ilk çalışmalar 19. yüzyılın ilk çeyreğine kadar uzansa da, İHA'lar şu anda hala gelişim süreçlerinin başlarında. İHA'lar için öngörülen gelecek ise daha akıllı, daha otonom ve daha küçük boyutlara doğru yönelim şeklindedir. [2]'de belirtildiği üzere günümüzde İHA'lar minyatürleşme aşamasında önemli ölçüde yol katetmektedir.

İHA'ların üretim aşaması, farklı kontrol yapılarının denenmesi ve bunlar arasından seçilen uygun kontrolörlerin kullanılmasını içerir. Bu yapılar arasında, doğrusal olmayan kontrol yöntemleri kullanarak bozucu etkenlere karşı havada pozisyon ve dümen kontrolü ya da görsel tabanlı kontrol algoritmaları kullanarak otomatik kalkış ve iniş uygulamaları örneklendirilebilir. Söz konusu araçlar uçabilen yapıda olduklarından, tercih edilen kontrol yönteminin uygulanabilir olması için ilk denemelerin üzerinde yapılacağı, araçlara havada belirli serbestlik dereceleri sunabilen platformlara ihtiyaç duyarlar. Test amaçlı kurulan bu platformların bir başka önemli özelliği de henüz yazılım aşamasındaki kontrol algoritmaları için araca ait parametrelerin belirlenebileceği ortamı sunmalarıdır.

Şekil 1'de görülen İsviçre Federal Teknoloji Enstitüsü – ETH Zürich'te kullanılan platform [3], üretim açısından kolaylık gösteren yenilikçi bir tasarım olsa da hareket serbestisini gerektiği gibi sağlayamamaktadır. Söz konusu platform üzerinde duran araç, yalpalama (roll- ϕ) ve yunuslama (pitch- θ) manevralarını ve kartezyen koordinatlarda z doğrultusundaki hareketi gerekenden fazla kısıtlamaktadır. İHA kontrol testlerinde sıklıkla kullanılan bir diğer platform yapısı da Şekil 2'de gösterilmiştir [4]. Bu platform ise sabit yarıçaplı küresel bir çalışma alanı sağladığından x ve y eksenlerindeki hareketi z eksenine bağımlı hale getirmektedir.



Şekil 1: İsviçre Federal Teknoloji Enstitüsü Zürich'te kullanılan platform.



Şekil 2: Genel amaçlı İHA test platformu

Biz bu çalışmada, üzerinde farklı kontrol algoritmalarının denenebileceği ve İHA araştırmaları açısından model oluşturabilecek yeni bir test platformu geliştirdik. Bu platformda kullanılan sistemin, yukarıda bahsi geçen

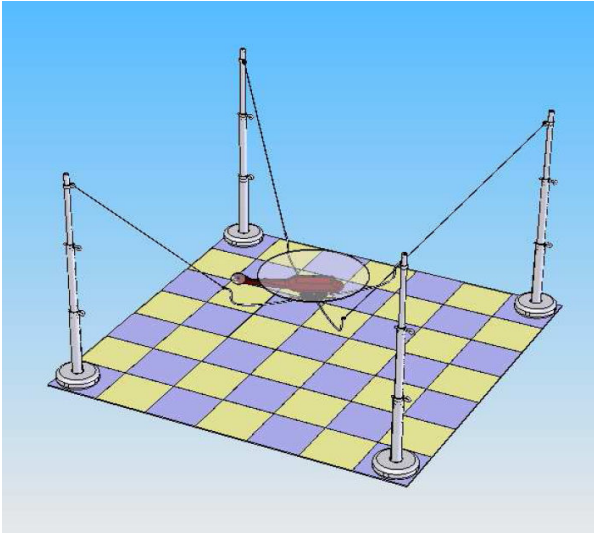
tasarımların dezavantajlarını ortadan kaldıracak oluşu çalışmada esas alınan ölçüt olmuştur. Söz konusu sistem, titreşime dayanıklı kolonlar/barlar üzerinde havada asılı durabilen kafes şeklinde bir platformdan oluşmaktadır. Bu sistemde platformun kendisi havada serbest hareketler yapabilmekteyken, platform üzerine bağlanan araç da platforma göre rahatlıkla hareket edebilmektedir.

Çalışmada izleyen bölümler şu şekilde düzenlenmiştir: Bölüm 2’de yeni tasarıma giden fikir, tasarım ve üretim aşamaları anlatılmıştır. Bölüm 3, üretim sonrası denemeleri içermektedir. Bölüm 4’te ise sonuçlar açıklanmıştır.

2. Tasarım ve Üretim

2.1. Fikir Olarak Tasarım

Giriş kısmında anlatılan tasarımlar da değerlendirilerek İHA’ya 6 serbestlik derecesi (3 pozisyon koordinatı ve 3 yönelim açısı) sağlayabilecek yeni bir tasarım geliştirildi. Bu tasarım, dört adet sağlamlaştırılmış kolona takılı yüksek gergi mukavemetli misinalarla asılı duran bir platformun üzerinde dönebilen bilyeli bir mafsaldan oluşmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3: Tasarımın Solidworks çizimi

Söz konusu tasarımda ana platform yerden yaklaşık 50 cm yukarıda duracak şekilde düşünülmüştür. Buradaki temel amaç ilerde İHA destekli mobil robot koordinasyon deneyleri için altta gerekli alanı bırakmaktır.

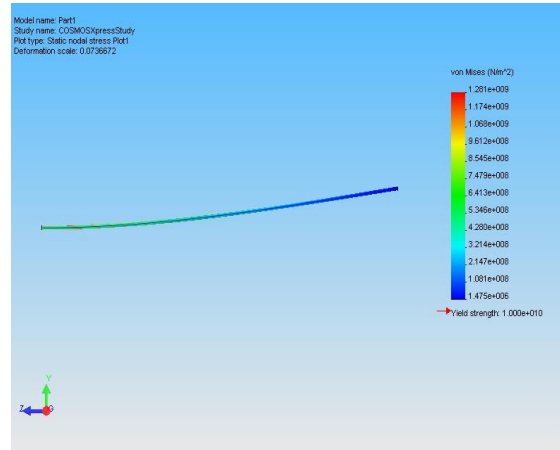
Tasarım aşamasında gerekli teknik özellikleri sağlamanın yanı sıra göz önüne alınan iki ana unsur dayanıklılık ve kullanım kolaylığı olmuştur. Bu bağlamda taşıyıcı kolonların yüksek momentlere dayanıklılığı esas alınmış ve orta platformun üretim öncesi mukavemet benzetimleri yapılmıştır. Ayrıca ilerde kontrol testlerinin açık havada rüzgârın bozucu etkisi altında denenebilir olması için tüm sistem laboratuvar dışına taşınabilecek portatiflikte tasarlanmıştır.

2.2. Tasarım Etapları

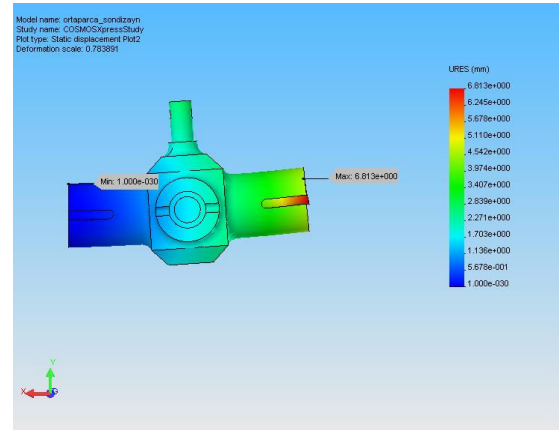
2.2.1. Orta Platform

Orta platform, birbirine bağlı dört adet kol ve bu kolları bilyeli mafsala bağlayacak bir ara parçadan oluşmaktadır. Kollar için, hem sağlam hem de hafif olması nedeniyle, karbon fiber malzemeden üretilmiş borular kullanılmıştır. Bu boruları bir arada tutacak ara parçanın ise karmaşık geometrisi sebebiyle polyamid’den üretilmesi düşünülmüştür.

Uçuş esnasındaki en kötü ihtimaller düşünülerek hesaplanan moment ve kuvvetler, SolidWorks programında modellenmiş olan karbon fiberler ve polyamid ara parça için sistem girdisi sayılıp gerekli benzetimler yapılmıştır. Karbon fiber borular ve polyamid ara parça için sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5’te verilen sonuçlara göre, en kötü durumda dahi orta platform en az 1.5’lik bir güvenlik faktörüyle deforme olmadan durabilmektedir.



Şekil 4: Karbon fiber borunun gerilme benzetimi



Şekil 5: Polyamid parçanın gerilme benzetimi

2.2.2. Tutucu Kolonlar

Tutucu kolonlar için belirlenen kıstas, yaklaşık 1.80 – 1.90 m yüksekliğinde olmaları ve hareket esnasında olabildiğince az titreşim üretmeleridir. Titreşimden az etkilenmesi sebebiyle malzeme olarak kolonlar için çelik öngörülmüştür. Uçuş esnasında oluşabilecek momentlerin üstesinden gelebilmek

için kolonların ağırlık merkezlerinin olabildiğince aşağıda tutulması gerekmektedir. Bu sebeple, kolonların altına bağlanabilecekleri her biri 30 kg'lık mermer zeminler üretilmesi planlanmıştır. Mermer ve çelik sahip oldukları sert yapıları sayesinde titreşimi minimal düzeye indirebilecek niteliktedir.

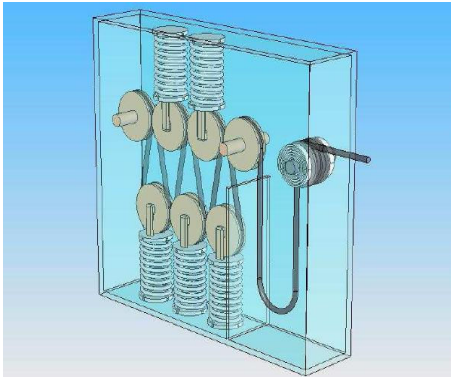
Öte yandan gerek mermerin kırılğan yapısını azaltmak için gerekse titreşimleri emmede yardımcı olması açısından, kolonların mermerlere arada sert plastik contalar kullanılarak bağlanması düşünülmüştür.

Son olarak, önceden sözü edilen portatifliği sağlayabilmesi maksadıyla bağlanan mermer ve çelik yapı kilitlenebilen tekerlekli kızakların üzerine sabitlenmiştir.

2.2.3. Bağlantı Kablosu ve Sönümlendiriciler

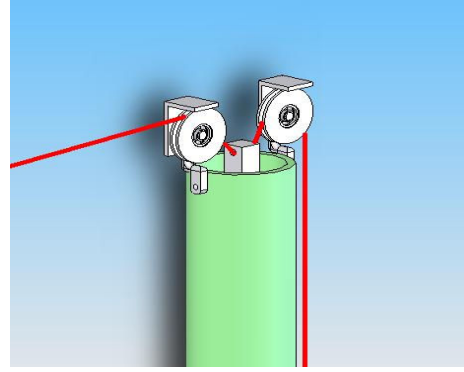
İHA'nın üstüne oturtulduğu platformu, tutucu kolonlara bağlayacak yapının özellikle çok esnek olması ve yüksek gerilme kuvvetlerini taşıyabilmesi amaçlanmıştır. Söz konusu yapı'nın 1.5 güvenlik faktörü kullanmak kaydıyla yaklaşık 8 kg'lık bir yükü kaldıracak birinci önceliklidir. Bu yüksek mukavemeti yeterli esneklikle sağlayabilmesi açısından misina benzeri özel bir ip çeşidi öngörülmüştür.

Öte yandan İHA'nın havadaki hareketi esnasında tutucu ipin limitlere ulaştığı noktalarda sistemin herhangi bir çarpma etkisiyle yüz yüze kalmaması gerekmektedir. Bu nedenle, iplerin maksimum uzama noktalarından sonra gerdirmeye başlayacakları sönümlendirme kutuları tasarlanmıştır. İplerde oluşacak maksimum gerginin önceden yapılan benzetimlerde baz alınan maksimum kuvveti aşmaması açısından 30 cm kadar bir maksimum esnemenin müsaade edilir olması gerekmektedir. Tasarlanan sönümlendirme kutusu Şekil 6'te gösterilmektedir.



Şekil 6: Sönümlendirme kutusunun tasarımı

Son olarak kullanılacak ipin İHA havada manevra yaparken pervanelere takılmaması için sürekli gergin tutulması gerekmektedir. Bu maksatla ip üzerinde asılı, çelik kolonların içerisinde serbest hareket edebilecek ve ipte sabit 0.3 N'luk gerilme yaratacak parçalar tasarlanmıştır. Tasarlanan bu parçaların bir örneği Şekil 7'te gösterilmiştir.

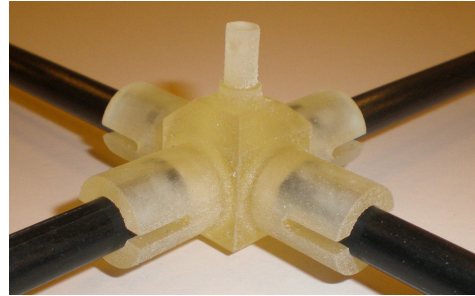


Şekil 7: Gerdirici parçanın modeli

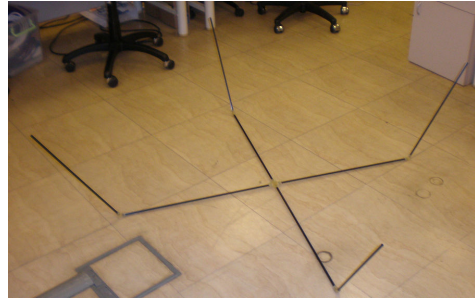
2.3. Üretim Etapları

2.3.1. Orta Platform

Polyamid orta parça tasarım etaplarında belirtildiği şekilde üretilmiş ve karbon fiberler satın alınmıştır. Şekil 8 orta polyamid parçanın üretim sonrası bir resmini gösterirken Şekil 9 ise tutucu platformun resmini sunmaktadır.



Şekil 8: Üretilen polyamid orta parça



Şekil 9: Üretilen platform

Bilyeli mafsal'ın önceden planlandığı gibi oldukça yüksek hareket serbestliği sağladığı gözlemlenmiştir. Yalpalama (ϕ) ve yunuslama (θ) yönlerinde yaklaşık 30° 'lik dönmeyi serbest bırakan bu bilyeli mafsal, sapma (ψ) yönünde ise tam tur dönmeyi olanaklı kılmıştır.

Üretim sonrasında üzerinde taşıdığı helikopter ağırlığıyla birlikte serbest düşmeye bırakılan sistem deformasyona uğramadan bütünlüğünü korumuştur.

2.3.2. Tutucu Kolonlar

Tutucu kolonlar çelikten imal ettirilmiştir. Tabana oturacak mermerler ile birlikte her bir kolon setinin toplam ağırlığı 44 kg olarak ölçülmüştür. Üretim sonrasında yapılan testlerde kolonların, önceden hesaplanan maksimum kuvvetten oldukça fazla kuvvetleri dahi devrilmeden taşıyabildiği gözlemlenmiştir.

2.3.3. Bağlantı Kablosu ve Sönümlendiriciler

Bağlantı kablosu olarak kullanılan özel misininin, yaklaşık 60 kg yükü kopmadan taşıyabildiği gözlemlenmiştir.

Sönümlendirme kutuları için kullanılacak olan ve bölüm 2.4.1'de sertlikleri hesaplanan yaylardan kestirilmiş ve kutular üretilip monte edilmiştir. Gerdirme testlerinde, kutulara bağlanan misinaların, istenen uzamayı sağlayabildikleri gözlemlenmiştir. Şekil 10 bir sönümlendirme kutusunun üretim sonrası kapatılmadan önceki görüntüsünü vermektedir.



Şekil 10: Üretilen sönümlendirme kutusu

İpler üzerinde ön gergi yaratacak ağırlıklar üretilmiş ve sisteme eklenmiştir. Çok çeşitli manevralarda dahi platformu tutan iplerin sürekli gergin kalıp pervanelere dolanmadığı gözlemlenmiştir.

2.4. Hesaplamalar

Yukarıdaki muhtelif bölümlerde temel alınan değerlerin hesapları ilerleyen alt başlıklarda sunulmuştur.

2.4.1. Yay Sabitinin Hesabı

Yayların esneklik katsayılarının üretimde baştan belirlenen 1500 (N/m) değerine yakın olduğu deneysel olarak da gözlemlenmiştir. Tek bir yay temel alınarak yapılan ölçümlerde, yayların doğrusal çalıştıkları bölgedeki kuvvete bağlı esneme değerleri kaydedilmiş ve 3 kg'lık bir yükün yaklaşık 1.9 cm'lik bir esneme yarattığı gözlemlenmiştir. Buna göre;

$$k = \frac{\text{uygulanan kuvvet}}{\text{esneme}}$$

$$k = \frac{3(\text{kg}) \times 9.81 (\text{N} / \text{kg})}{1.9 \times 10^{-2} (\text{m})} = 1549 (\text{N} / \text{m})$$

Burada bulunan yay sabiti, tek başına bir yay için geçerli olan değerdir. Sönümlendirme kutularının her birinde 5 yay kullanılmıştır ve her yay palanga sistemiyle üzerindeki gerilmeyi iki ipe aktarmaktadır. Bu durumda ipteki toplam uzama bir yaydakinin 10 katı kadar olacaktır. Dolayısıyla, ip bir yay gibi davrandığında sahip olacağı yay sabiti ise tek bir yayinkinin 1/10'u kadar, yani yaklaşık 155 (N/m) olacaktır.

2.4.2. Maksimum İp Gerilmesinin Hesabı

Tipik bir İHA için öngörülen maksimum kalkış ivmelenmesi genelde 2 m/s² civarındadır. En aşağıdan harekete geçen aracın, misininin maksimum gerilmeye ulaşacağı noktaya kadar, toplam 1 m yol alacağını da hesaba katarak İHA'nın tepeye çıkış süresi;

$$x = \frac{1}{2}at^2 \quad (1)$$

$$t = 1 \text{ s}$$

olarak bulunur. Bu durumda, İHA tepeye ulaştığı andaki maksimum hız;

$$v = at \quad (2)$$

$$v = 2 \text{ m} / \text{s}$$

çıkar. Bu bilgilerle; 4kg kütleli bir İHA'nın, misinayı gerdirmeye başladığı noktadaki maksimum kinetik enerjisi;

$$EK = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3)$$

$$EK = 8 \text{ joule}$$

olarak bulunur. Misinaların esnemesi sonrasında bu enerjinin tamamı yay potansiyeline (U) dönüşeceğinden, maksimum gerilme esnasındaki uzama miktarı;

$$EK = U = \frac{1}{2}kx^2 \quad (4)$$

$$8 = \frac{1}{2} \times 155 \times x^2$$

$$x = 0.321 \text{ m}$$

olacaktır. Buradan Hooke Yasası'na göre sistemde oluşacak kuvvet bulunabilir. Ölçümdeki hassasiyet bozukluklarını temel alarak her ihtimale karşı bir hata payı konulabilir. Bu şekilde çıkan ip gerilmesinde %10'luk bir oynama olabileceği varsayılarak kuvvet hesabı için gereken maksimum uzama yaklaşık 0.35 m alınabilir. Bu durumda kuvvet;

$$F = kx \quad (5)$$

$$F = 155 \times 0.35$$

$$F = 52.5 \text{ N}$$

$$F = 5.35 \text{ kgf}$$

olarak bulunacaktır. Sistem için, minimum güvenlik faktörü 1.5 alındığında elde edilen maksimum kuvvet:

$$F = 78.8 \text{ N}$$

$$F = 8.02 \text{ kgf}$$

olarak belirlenecektir. Misininin 60 kg taşıyabildiği hatırlandığında, sistemde oluşacak maksimum kuvvetin 7.5 katına bile dayanabildiği belirlenmiştir.

2.4.3. Maksimum Burkulma Momenti

Yukarıda elde edilen maksimum kuvvet değeri ve tasarımın geometrisi kullanılarak orta platformun polyamid birleştirici parçasının üzerine düşecek maksimum moment de hesaplanabilir. En uzun moment kolunun 0.86 m olduğu bilgisinden;

$$M_{\max} = F_{\max} x_{\max} \quad (6)$$

$$M_{\max} = 67.7 \text{ Nm}$$

bulunacaktır.

2.4.4. Üretim Maliyetleri

Tablo 1 en baştan sona kadar geçen üretim etaplarında her bir kalem için yapılan harcamaları ve çalışmanın toplam maliyetini göstermektedir.

Tablo 1: Maliyetler

Üretim & Satın Alma Maliyetleri			
Envanter	Birim Maliyet (YTL)	Miktar	Toplam Maliyet (YTL)
Alüminyum	100	1	100
Rulmanlar	1,6	50	80
Misina	30	1	30
Karbon Fiberler	8	4	32
Platform Araparıça	123	2	246
Mermer Taban	41	4	164
Barlar	36	4	144
Yaylar	3	30	90
Çelik Kutular	70	4	280
Tekerlekli Taban	17,5	4	70
Misina Sargıları	4	9	36
Muhtelif *	150	1	150

Genel Toplam (YTL)	1422
--------------------	------

* Ulaşım ve (vida gibi) düşük maliyetli sarf malzemelerinin toplamını içerir

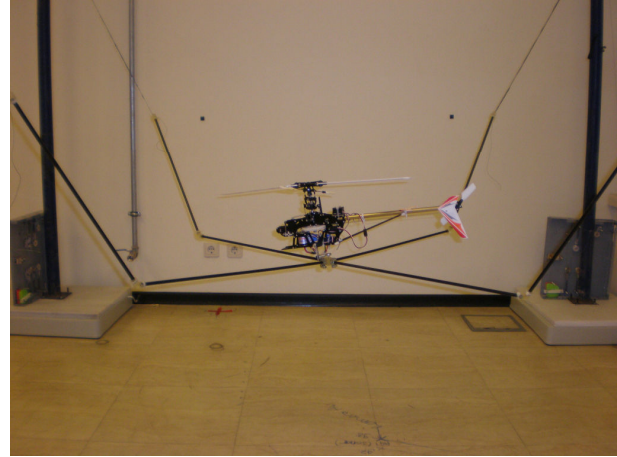
3. Tartışma

3.1. Üretim Sonrası Denemeler

Tasarım ve üretim etaplarının tamamı bitirildikten sonra ortaya çıkan sistem üzerinde çeşitli olumsuz koşulları temsil edecek şekilde dayanıklılık testleri yapılmıştır. Bu testler arasında, yatay doğrultuda en yüksek momenti yaratacak gerdirmeler ve en üst noktadan serbest düşme gibi pratikte pek de karşılaşılmayacak durumlar bile içirilmiştir. Sonuç olarak,

platformun tüm bu durumlardan hasar almadığı ve sağlam kaldığı gözlemlenmiştir.

Şekil 11'de bitmiş halinin resmi verilen sistemin elemanları ayrı ayrı da dayanıklılık testlerine tabi tutulmuşlardır. Bu testlerde gözlemlenen en zayıf bölgenin, Şekil 2.6'da gösterilen, karbon fiberleri birleştiren polyamid ara parça olduğu tespit edilmiştir. Sistem genelinde güvenlik faktörü hiçbir yerde 3'ün altına inmezken bu parça için 1.5 civarında kalmıştır. Böyle bir sonuç elde edilmesindeki temel sebep, söz konusu parçanın karmaşık geometrisinden ötürü metalik malzemeden üretilemeyeşi ve prototip üreticilerinde polyamidten üretilmesidir. Polyamidin metalik malzemenin esnekliğini gösteremeyip kırılğan davranması güvenlik faktörünü düşürmektedir.

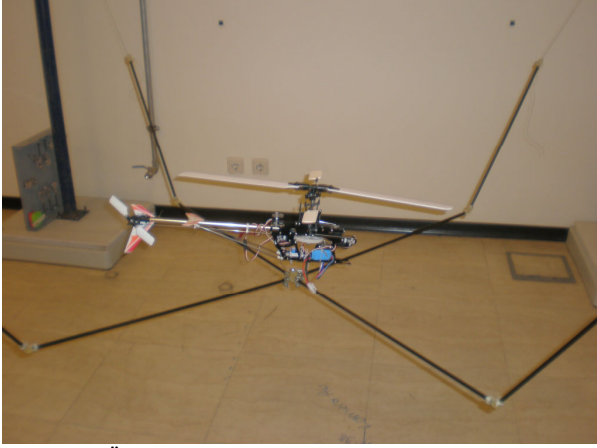


Şekil 11: Üretimi tamamlanan platformun çapraz açıdan görüntüsü.

Şekil 12 ve Şekil 13'te resimleri verilen sisteme monte edilen bir model helikopterin ik uçuşu yapılmıştır. Uçuş esnasında, giriş bölümünde sözü geçen iki tasarıma göre manevra yeteneğinin çok daha geniş olduğu bir kere daha gözlemlenmiştir. İplerdeki sürekli gerginin bozucu etki yaratmadığı ve iplerin pervaneye takılmasını sürekli önlediği de gözlemlenmiştir.

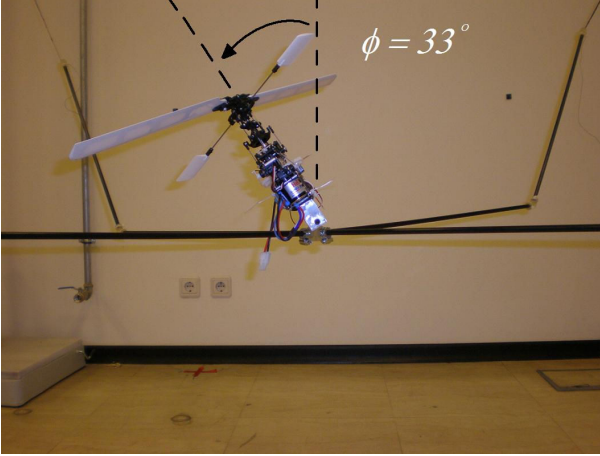


Şekil 12: Üretimi tamamlanan platformun yandan görüntüsü.



Şekil 13: Üretimi tamamlanan platformun üstten görüntüsü.

Söz konusu platformun minimum 30° lik yalpalama ve yunuslama açısına olanak sağladığı gözlemlenmiştir. Denemeler sonrası, Şekil 14'te de gösterildiği gibi, bu açının maksimum 33° civarında olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 14: Maksimum yalpalama açısı

4. Sonuçlar

Bu çalışmada bir insansız hava aracının uçuş parametrelerinin belirlenip üzerinde kontrol denemelerinin yapılabileceği bir platformun, tasarım ve üretim aşamaları anlatılmış, üretim sonrası yapılan dayanıklılık testlerinin sonuçları açıklanmıştır. Söz konusu platformun istenen yüksek manevra yeteneğini sağlayabildiği ve hareket halinde oluşacak kuvvet ve momentler karşısında gereken dayanıklılığa sahip olduğu gösterilmiştir.

5. Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK 107M179 nolu bilimsel araştırma projesi çerçevesinde Mekatronik Mühendisliği son sınıf bitirme projesi olarak gerçekleştirilmiştir. Yazarlar TÜBİTAK ve Sabancı Üniversitesi'ne katkılarından dolayı teşekkürü borç bilirlir.

6. Kaynakça

- [1] University of Florida, Laboratory for Information Systems (LIST), Retrieved July 18, 2008 from <http://www.list.ufl.edu/uav/UAVHstry.htm>
- [2] Aerosonde, Miniature UAV's and Future Electronic Warfare, Retrieved July 18, 2008 from http://www.aerosonde.com/downloads/Aerosonde_DSTO_EW.pdf
- [3] Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Retrieved July 18, 2008 from http://www.uav.ethz.ch/research/projects/Indoor_Helicopter
- [4] The University of Texas Arlington, Automation and Robotics Research Institute, Retrieved July 18, 2008 from <http://arri.uta.edu/acs/pestringu/UAV/>