

KÜÇÜK ÖLÇEKLİ TAM BOY RÜZGAR TÜRBİNİ KANADI YAPISAL TEST DÜZENİĞİ TASARIMI

Mustafa İÇEN¹ ve Demirkan ÇÖKER²

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

ÖZET

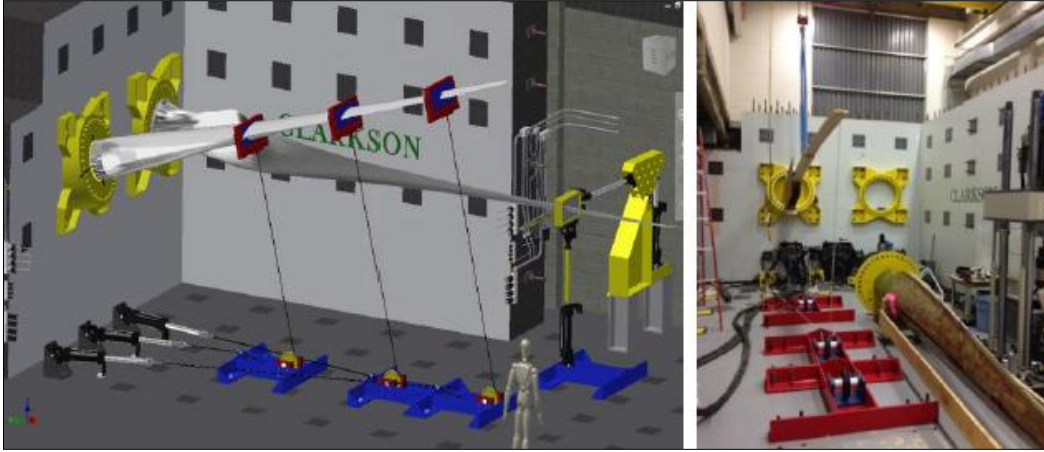
Fosil yakıtların tükenme tehlikesiyle karşı karşıya olan dünyamızda, enerji ihtiyacının artmasıyla da beraber yenilenebilir enerji kaynaklarına ihtiyaç artmaktadır. Bu doğrultuda rüzgar enerjisi konusunda da araştırma geliştirme faaliyetlerine yönlenildi. Rüzgar türbinlerinde rüzgar türbini kanadı en önemli bileşenlerden biridir. Rüzgar türbinleri işleme alınmadan önce, üretilen kanatların işletim sırasında gelebilecek bütün yüklerle dayanıklı olduğu analiz ve test yöntemleriyle kanıtlanmalıdır. Bu çalışmada, ODTÜ Rüzgar Enerjisi Araştırma Merkezi (Rüzgem) bünyesinde geliştirilen 5 metrelik rüzgar gülü kanadının mukavemetini test etme amacıyla statik ve yorulma yapısal test düzeneği geliştirilecektir. Çalışması yapılacak olan test düzeneğinin 9 metreye kadar olan tam boy kanatlar için statik ve yorulma testi yapabilecek kabiliyette olması da sağlanacaktır. Geliştirilen bu test düzeneğiyle beraber, tam boy Rüzgem kanadı statik testi için test planlaması anlatılacaktır.

GİRİŞ

Rüzgar enerjisi, yenilenebilir enerji olmasından dolayı gelişen teknolojiyle beraber büyük bir araştırma geliştirme alanı oluşturmaktadır. Rüzgar türbini tasarımında, tip sertifikası için kanadın yapısal açıdan hem statik hem de yorulma testleriyle doğrulanabilmesi de önemli bir gerekliliktir [IEC, 2002]. Sertifikasyona ek olarak, tam boy test için bir çok neden vardır. Kanat dayanımının, tasarımın yanı sıra üretim sürecine de bağlı olması, kanat özelliklerinin ve davranışının her noktada tam olarak bilinmemesi, kanat tasarımının analize tam olarak doğrulanamaması, kanadın hasar görmesi durumunda bölgesel onarımların çok pahalı olması gibi sebepler tam boy kanat testlerini zorunlu kılmaktadır [Musial, 2004]. Rüzgar gülü kanadı için çeşitli laboratuvarlarda yapılan yapısal testlerde çeşitliliği azaltmak ve pratikleri önermek amacıyla, yapılan testlere rehber niteliğinde IEC61400-23 dokümanı yayımlanmıştır [IEC, 2001]. Ulusal Rüzgar Enerjisi Laboratuvarı (NREL-ABD), Yenilenebilir Enerji Kaynakları Merkezi (CRES-Yunanistan), Delft (Hollanda) ve Sürdürülebilir Enerji Ulusal Laboratuvarı (RISØ-Danimarka) gibi çeşitli laboratuvarlarda IEC61400-23 dokümanı referans alınarak bir çok test gerçekleştirilmektedir [Larwood, 2000]. ABD'deki Ulusal Rüzgar Enerjisi Laboratuvarı (NREL) gözden geçirildiğinde, faaliyetlerdeki test düzeneğinin 8x14 metre güçlü zemine ve 6x5 metre reaksiyon duvarına sahip olduğu Şekil 1'de görülmektedir [Valyou, 2015]. Reaksiyon duvarı 1 MN-m momente, güçlü zemin ise 445 kN çekme yüküne dayanabilmektedir. 2 adet kök bağlantı yapısı içeren test düzeneği, 15 metreye kadar farklı boyutlarda tam boy kanatların statik ve yorulma testlerinin yapılmasına imkan tanımaktadır. Bu çalışma, yukarıda belirtilen laboratuvarlardaki gibi, test düzeneği tasarımı ve test altyapısı bakımından, başta Rüzgem tam boy statik kanat testi olmak üzere ODTÜ Rüzgem'e test kabiliyeti kazandırmayı amaçlamaktadır.

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl./Tasarım Müh., TUSAŞ, e-posta: mustafa.icen@tai.com.tr

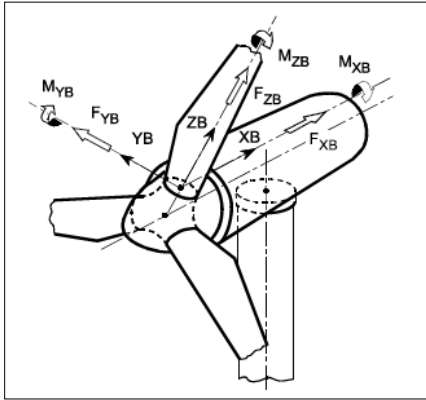
² Doç. Dr., ODTÜ Havacılık ve Uzay Müh. Böl./ RÜZGEM, ODTÜ, e-posta: coker@metu.edu.tr



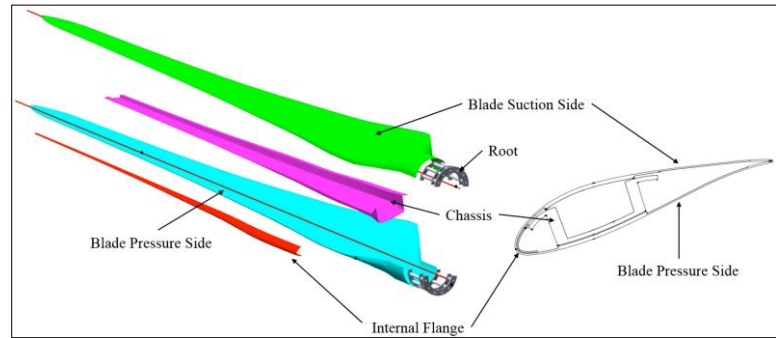
Şekil 1: NREL Tam Boy Rüzgar Türbini Kanadı Test Olanakları [Valyou vs., 2015]

YÖNTEM VE UYGULAMALAR

Test koordinat sistemi, kanat koordinat sistemi ile aynı seçilmiştir ve Şekil 2’de tanımlanmıştır. ODTÜ Rüzgem ve PATRAS Üniversitesi(Yunanistan) tarafından ortak tasarlanan kanat, 5 metre boyunda, 10 m/s rüzgar hızında 30 kW kapasiteye sahiptir. Kompozit kanat çelik, kompozit tabakalar ve tabakalar arası yapıştırıcı ile yapılmıştır. Kanat bileşenleri ve kanat yapısı Şekil 3’te yer almaktadır.

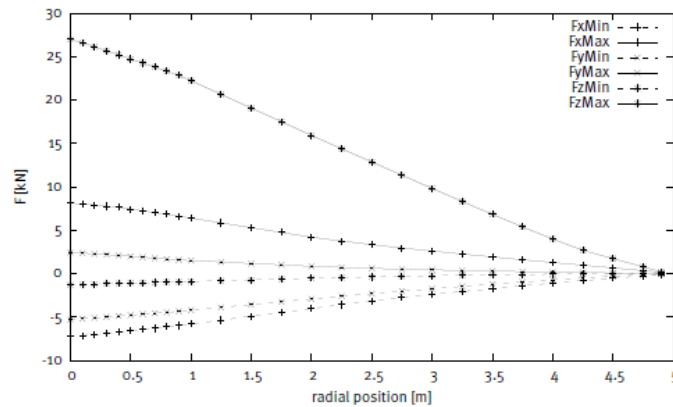


Şekil 2: Kanat koordinat sistemi

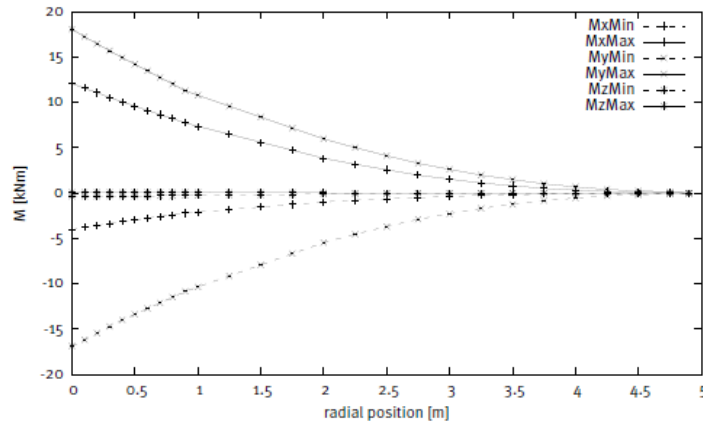


Şekil 3: Kanat yapısı ve bileşenleri [Weinzierl vs, 2017]

Operasyon sırasında kanat üzerine gelecek uçdeğer yayılı aerodinamik yükler güvenlik faktörü de hesaba katılarak kanat tasarımı sırasında hesaplanmış ve aşağıdaki Şekil 4 ve Şekil 5’te verilmiştir [Pechlivanoglou vs, 2013]. Veter yönündeki moment değeri (M_y), M_x ve M_z yönündeki moment değerlerine göre daha yüksektir. Veter momenti yönünde kanat mukavemeti de düşük olduğundan statik testte M_y momenti uygulanacaktır.



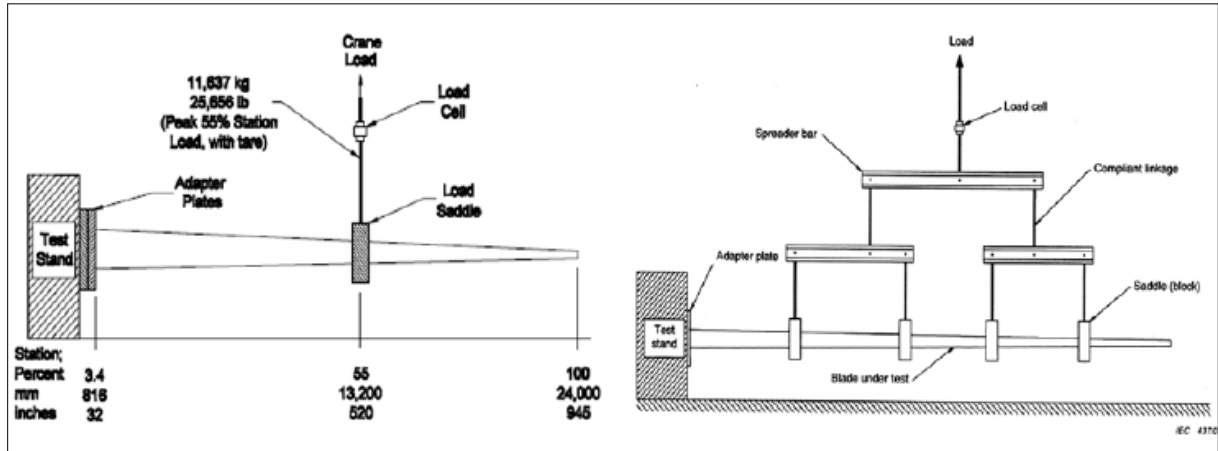
Şekil 4: Uçdeğer Kesme Yükleri [Weinzierl vs, 2013]



Şekil 5: Uçdeğer Burulma Momentleri [Weinzierl vs, 2013]

Yükleme Konsepti

Kanat üzerinde yayılı aerodinamik yük, test esnasında 3 farklı şekilde taklit edilebilir [IEC, 2001]. Yayılı yüzey yükü büyük kum torbalarının kanat üzerine konulmasıdır. Kesme yükü en iyi bu şekilde taklit edilebilir ancak uçdeğer koşullarda kum torbası eklemek tehlikelidir ve bu yükleme tek bir eksenle sınırlıdır. Tek nokta yönteminde yayılı yük konsantre bir şekilde tek bir kesitten uygulanır. Gereken donanım daha basit olmasına rağmen kanadı bir çok noktadan test etmek gerekir ve kesme yükü oldukça fazladır. Çok nokta yönteminde ise istenilen test yükü dağılımı tek bir seferde elde edilebilir ve kesme yükü ile burulma momenti daha gerçekçidir (Şekil 6). Tek nokta ve çoklu nokta yöntemi için yükler, vinçle uygulanabileceği gibi, hidrolik eyleyiciyle de uygulanabilir. Hidrolik eyleyicilerde deplasman ve yük kontrolü yapılabildiği için bu testte hidrolik eyleyici kullanılacaktır.



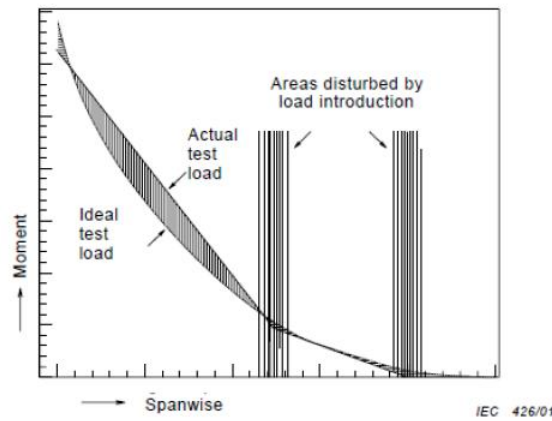
Şekil 6: Tek Nokta Yöntemi (Solda), Çoklu Nokta Yöntemi (Sağda) [Musial, 2004]

Yük Optimizasyonu

Çoklu nokta yönteminde yayılı aerodinamik yükler konsantre olarak uygulanır. Bu da kanadın bazı kesitlerinde gerçek kesit yük ve moment değerinden uzaklaşmaya sebep olur [IEC, 2001] (Şekil 7). Tasarımda ortaya çıkan kesitlerdeki uçdeğer burulma momenti (M_y) kullanılarak Excel çözücü eklentisinde iki nokta için yük optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyonda yük uygulama yerlerini tespit etmek ve uygulanacak test yükünü gerçek yayılı yüke mümkün olduğunca yaklaştırmak amaçlanmıştır. Excel çözücü eklentisine girdi sağlanan kanat üzerindeki 28 kesitteki tasarım kesit kesme yükleri ve burulma momentleri aşağıda Tablo 1'de sunulmuştur. Kanat kök kısmı $R=0$ metre, uç kısmı $R=5$ metre olarak alınmıştır.

Tablo 1 - Kesitlerdeki Tasarım Kesme Yüğü ve Burulma Momenti

Kesit No	R [m]	Fz [kN]	My [kNm]
1	0	8.14	18.09
2	0.1	8.03	17.24
3	0.2	7.9	16.47
4	0.3	7.77	15.7
5	0.4	7.64	14.93
6	0.5	7.44	14.21
7	0.6	7.23	13.48
8	0.7	7.03	12.75
9	0.8	6.82	12.02
10	0.9	6.62	11.29
11	1	6.4	10.79
12	1.25	5.85	9.58
13	1.5	5.3	8.38
14	1.75	4.75	7.17
15	2	4.2	5.97
16	2.25	3.76	5
17	2.5	3.35	4.12
18	2.75	2.95	3.27
19	3	2.6	2.61
20	3.25	2.26	1.98
21	3.5	1.93	1.49
22	3.75	1.6	1.02
23	4	1.29	0.69
24	4.25	0.97	0.39
25	4.5	0.66	0.24
26	4.75	0.34	0.1
27	4.9	0.15	0.01
28	5	0	0



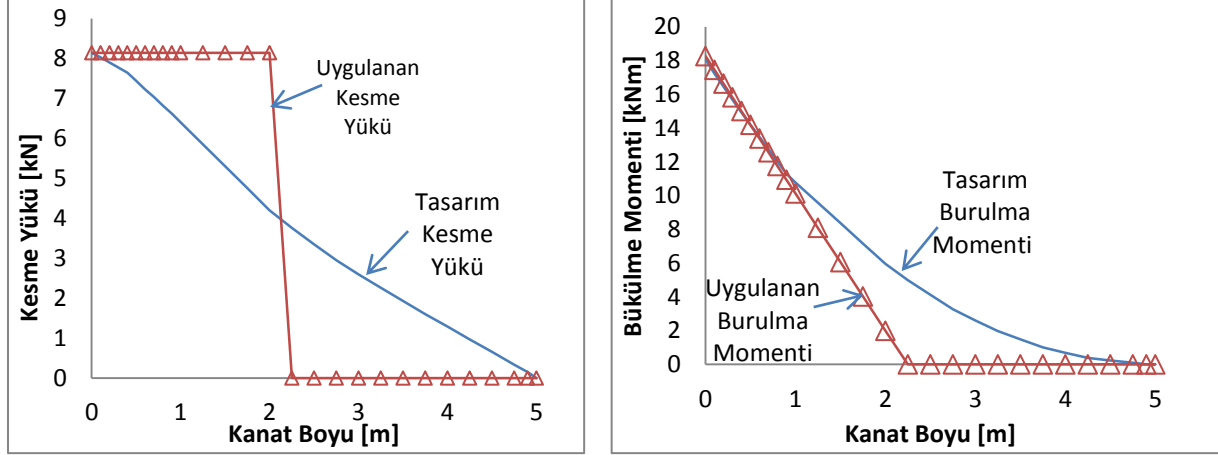
Şekil 7: İdeal Yüğü ve Gerçek Test Yüğü [IEC, 2001]

Yeniceli ve Kayran [2013], çoklu nokta yöntemi için kesitlerdeki yayılı ve konsantre yük arasındaki hata toplamını minimize edecek yük optimizasyonu yapmıştır. Bu çalışmada ise

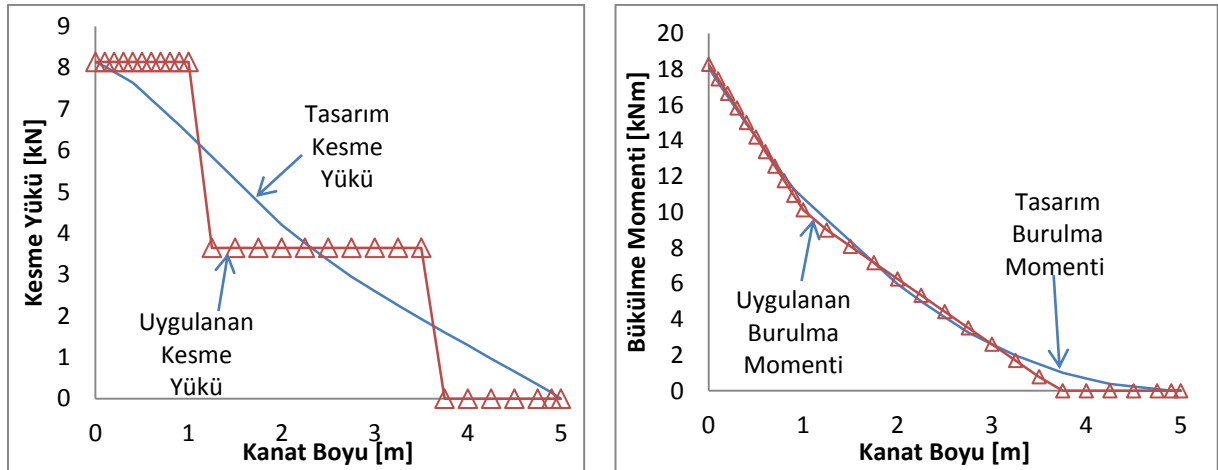
tek nokta ve çoklu nokta yönteminden iki kesit için kesitlerdeki burulma momenti farkları toplamını minimize etmek hedeflenmiş ve sınır şartları aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

- Kesitten uygulanacak kesme yüklerinin toplamı kök kesme yüküne eşit olmalı
- Uygulama noktaları 0 ile 5 metre arasında olmalı
- Kökteki gerçek burulma momenti ile uygulanan burulma momenti arasındaki fark %1'den küçük olmalıdır.

Bu koşullarla tek nokta ve iki nokta için çözülerek elde edilen kesme yükü ve burulma momenti grafikleri Şekil 8 ve Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 8: Kesme Yükü ve Burulma Momenti (Tek Nokta)

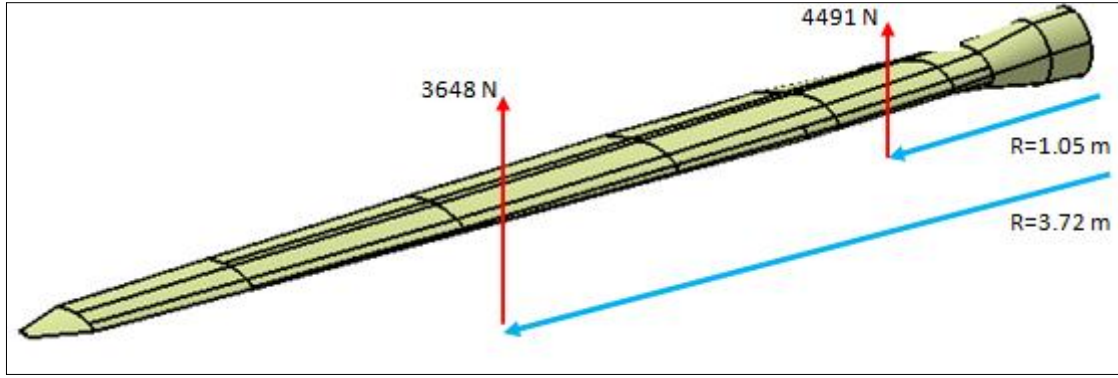


Şekil 9: Kesme Yükü ve Burulma Momenti (İki Nokta)

Yükleme noktaları ve bu noktadaki yükler ise aşağıdaki gibidir:

- Tek nokta: kökten 2.24 metre uzaklıkta, 8140 N
- İki nokta
 - Yükleme noktası 1: kökten 1.05 metre uzaklıkta, 4491 N
 - Yükleme noktası 2: kökten 3.72 metre uzaklıkta, 3648 N

Grafiklerden de görüldüğü gibi, iki nokta yönteminde tek noktaya göre yayılı aerodinamik yüke hem kesme yükü hem de burulma momenti açısından daha fazla yakınsanmıştır. Rüzgem tam boy kanat testinde, daha gerçekçi sonuçları daha kısa zamanda alabilmek için iki nokta yöntemi kullanılacaktır. Şekil 10'da kanat üzerinde yükleme yapılacak noktalar çizilmiştir.

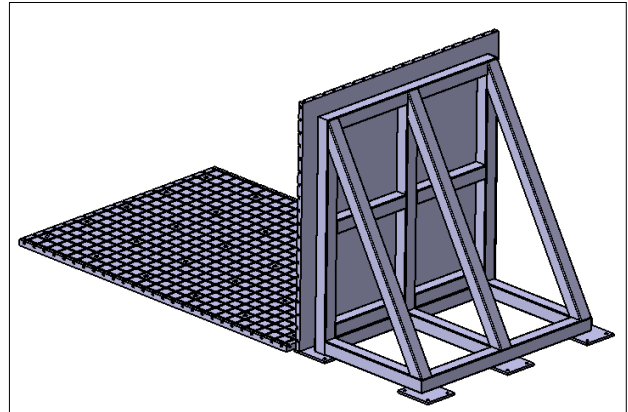
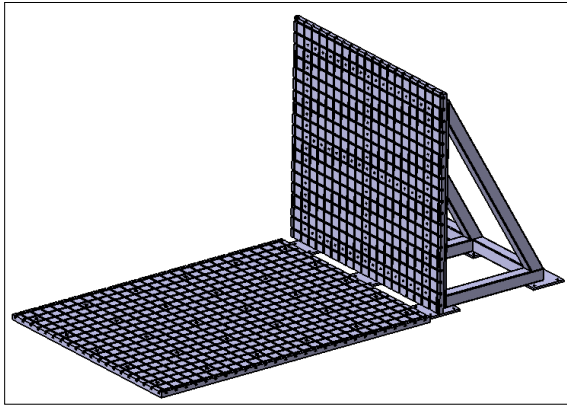


Şekil 10: Yükleme Noktaları ve Karşılık Gelen Yükler

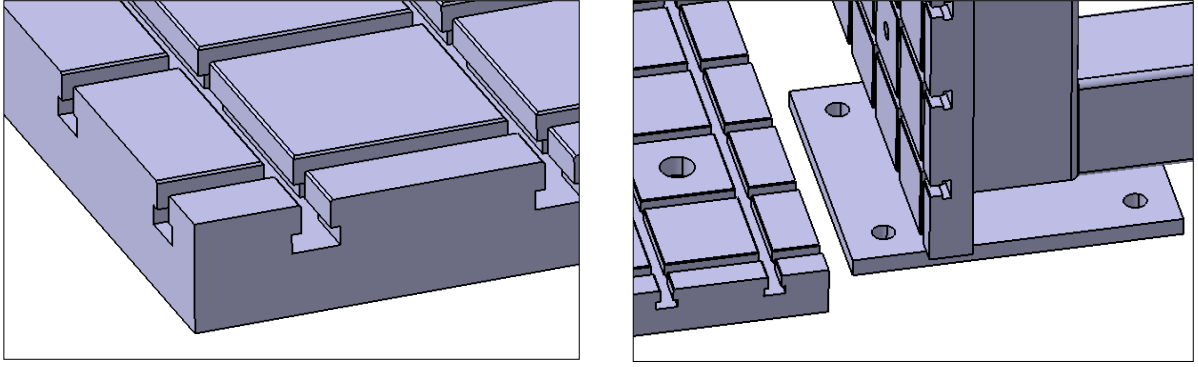
Test Düzeneği Tasarımı

Test düzeneği tasarımı 2 bileşenden oluşmaktadır. Tasarım CATIA V5R22 aracılığıyla yürütülmüştür.

Destek Yapı Tasarımı: Destek yapı, ana reaksiyon duvarı ve taban bağlantı plakasından oluşmaktadır. Ana reaksiyon duvarı çelik kare profil boruların kaynaklanmasıyla oluşan bir destek yapı ve üstünde DIN 650 standardında 150 mm aralıkla işlenen T yiv kanallar bulunan 2900 mm yüksekliğinde, 2950 mm genişliğinde plakadan oluşmaktadır. Bu ana reaksiyon duvarı kaynaklı yapının altında bulunan plakalar yardımıyla beton zemine ankrajlanacaktır. Taban bağlantı plakasında ise yine aynı şekilde 150 mm aralıklarla işlenen T yiv kanallar bulunmaktadır ve 4050 mm uzunluğa, 2950 mm genişliğe sahiptir. T yiv kanallar sayesinde hem ana reaksiyon duvarı hem de taban bağlantı plakası basit arayüz parçalarla beraber her türlü detay bağlantısının (hidrolik eyleyici, farklı kanat kökleri vs) yapılabilmesine olanak sağlamaktadır. Destek yapı tasarımı Şekil 11'de, T ray detayı ve beton zemine bağlantı yapılacak yerler Şekil 12'de gösterilmiştir. Malzeme olarak piyasada kolay bulunabilen ve muadillerine göre daha dayanıklı endüstriyel yapı çeliği St52-3 seçilmiştir.

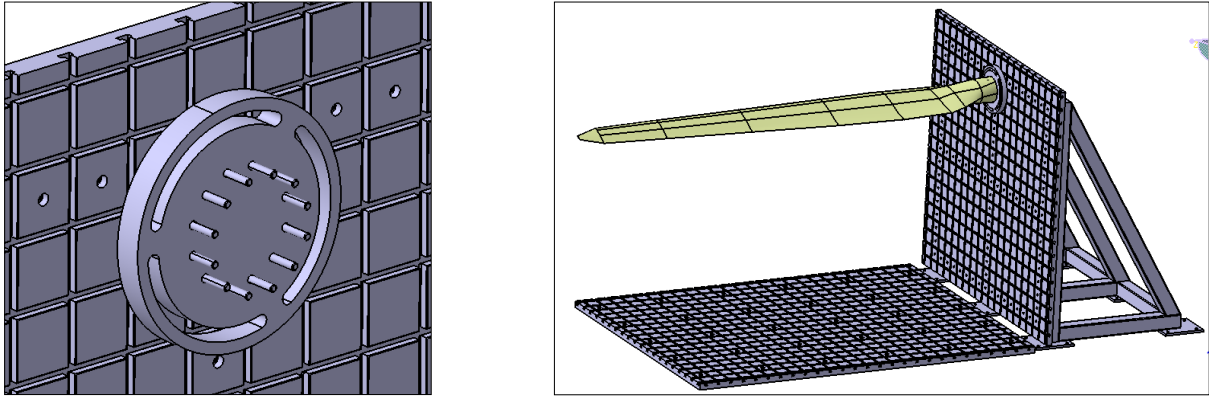


Şekil 11: Destek Yapı Tasarımı



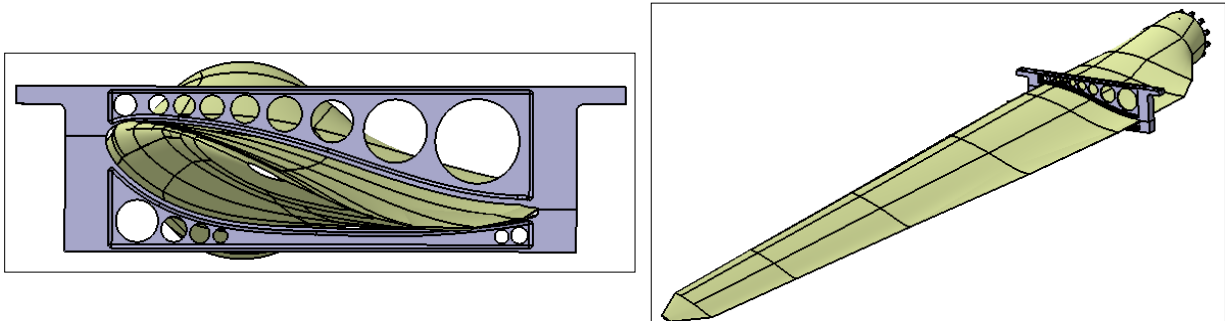
Şekil 12: T Yivli Kanallar (solda), Beton Zemin Bağlantı Delikleri (sağda)

Arayüz Bağlantı Tasarımı: Arayüz bağlantıları, kök bağlantı plakası ve yük uygulama adaptörlerinden oluşmaktadır. Kök bağlantı plakası, ana reaksiyon duvarı ile kanat arasında bağlantıyı sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Tasarlanan kök bağlantı plakasında kanat köküne bağlanma amacıyla 12 adet M16 bolt deliği ve ana reaksiyon duvarına bağlanma amacıyla kanallar bulunmaktadır. Tasarım aşağıda Şekil 13’de gösterilmiştir. Bu plakayla beraber kanadın yerden 2400 mm yukarıya bağlanması planlanmıştır.

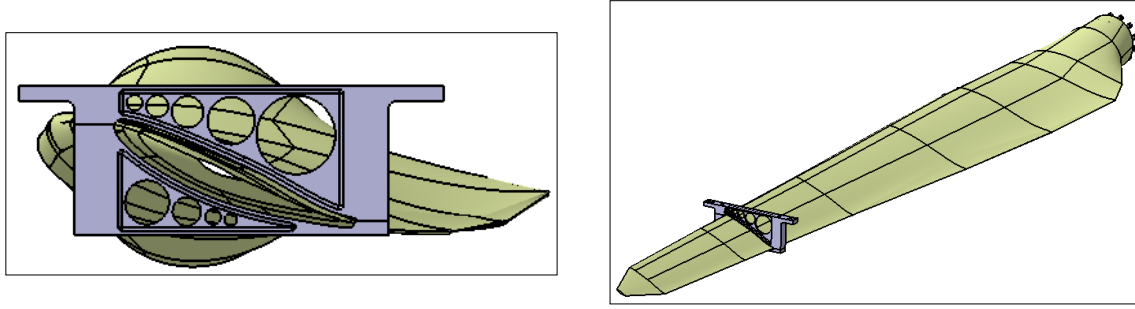


Şekil 13: Kök Bağlantı Plakası ve Kanadın Bağlanması

Yük uygulama adaptörleri Şekil 10’da belirtilen kesitlerden karşılık gelen yükleri uygulayacak, kanadı tam olarak saracak alüminyum plakalardan üretilecek şekilde 2 parça olarak tasarlanmıştır. Kanat yüzeyine zarar vermemek için, yüzeyi taklit eden yerlerde bu adaptörler 5 mm kanat yüzeyinden uzaklaştırılmıştır. Kanat ve adaptör arasına 5 mm kalınlığında kauçuk yapıştırılacaktır. Adaptörleri hafifletmek amacıyla ölü bölgeler boşaltılmıştır. Kök tarafındaki ve uç taraftaki yükleme noktalarındaki adaptörler Ş ve 2’de görülmektedir.

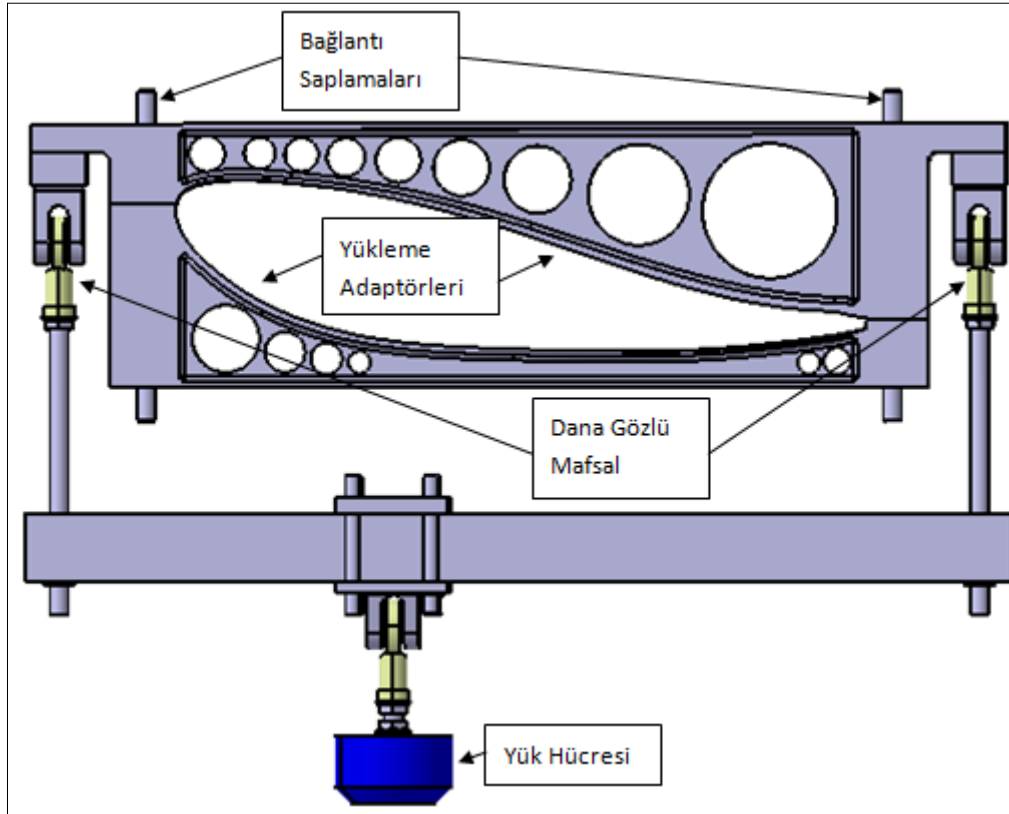


Şekil 14: Kök Kısmı Yükleme Adaptörleri



Şekil 15: Uç Kısım Yükleme Adaptörleri

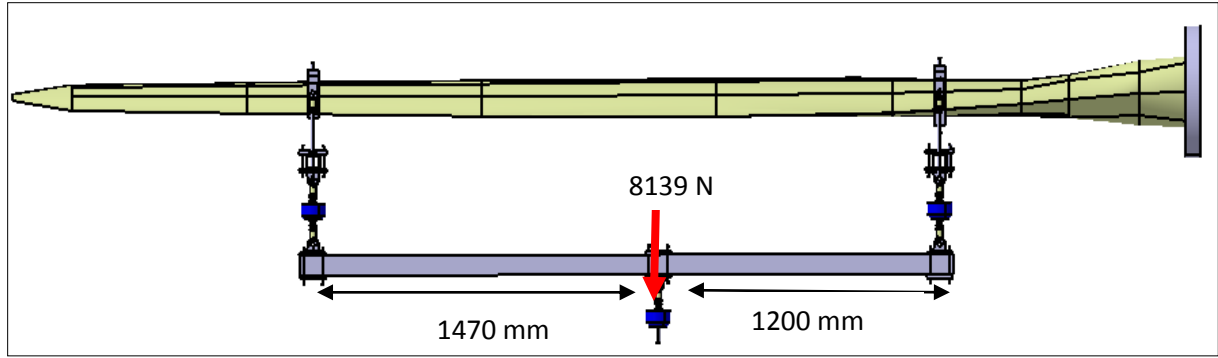
Yük ağacı: Hidrolik eyleyici maliyetini düşürmek ve kararlaştırılan 2 noktadan yüklemeyi, tek bir hidrolik eyleyici ile gerçekleştirmek için yük ağacı tasarımı yapılmıştır. Yük uygulama adaptörlerine bağlanan dana gözlü mafsallarla (INA FAG GIR 17-UK) yükleme esnasında hareket serbestisi kazandırılmıştır. İki yönden gelen ve dana gözlü mafsallardan çıkan saplamalar kanadın altında kare profil yardımıyla birleşerek yük hücresi de kanadın dönme noktasına yerleştirilmiştir. Yük hücreinden kanada aktarılan yükün doğru bir şekilde okunması hedeflenmiştir. Kanat üzerindeki kök kısım yük ağacı sistemi Şekil 16'da gösterilmiştir.



Şekil 16: Kök Tarafı Yük Ağacı Sistemi

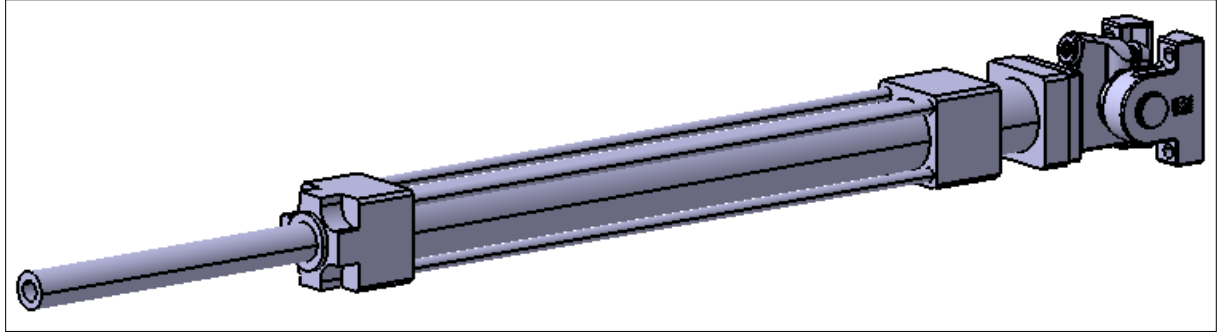
Yük uygulama adaptörlerinde ve kare profillerde kanat üzerinde yer çekiminden dolayı binen kuvveti azaltmak için alüminyum kullanılmasına karar verilmiştir. Piyasada kolay bulunabilen, maliyet olarak ucuz ve dayanıklı Al6063 T6 malzemesi seçilmiştir.

2 kesitte bulunan adaptör sisteminin birbirine bağlantısı yine kare profil bir detayla sağlanmıştır. İki taraftan da akan yükün moment reaksiyonlarının 0 olduğu noktaya üçüncü bir yük hücresi koyarak kanat üstüne akan toplam yük kontrolü gerçekleştirilecektir. Şekil 17'de yük ağacı sistemi gösterilmiştir.

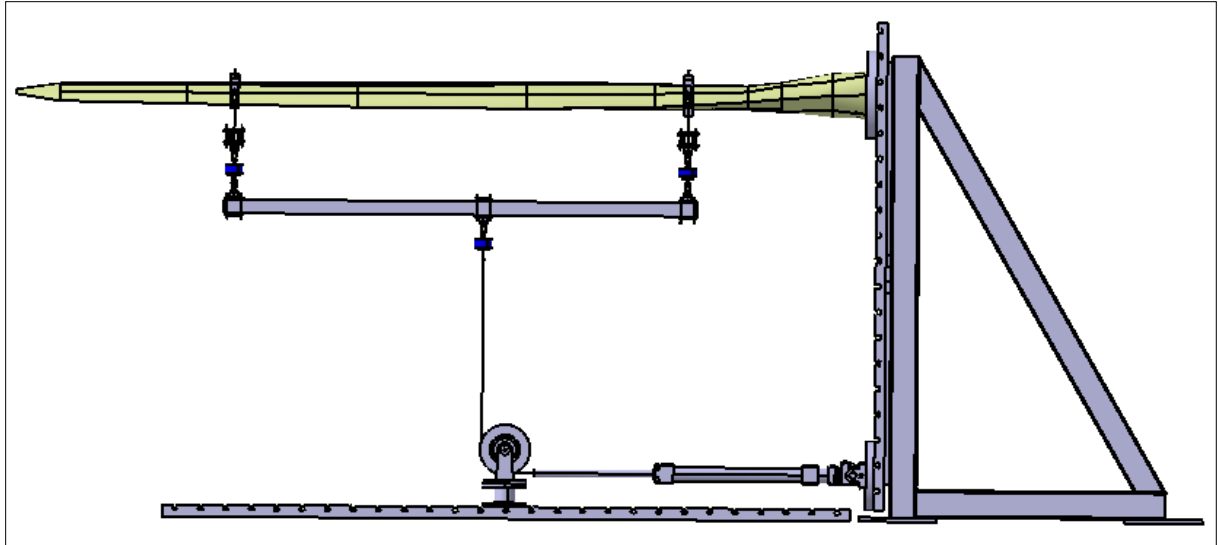


Şekil 17: Yük Ağacı

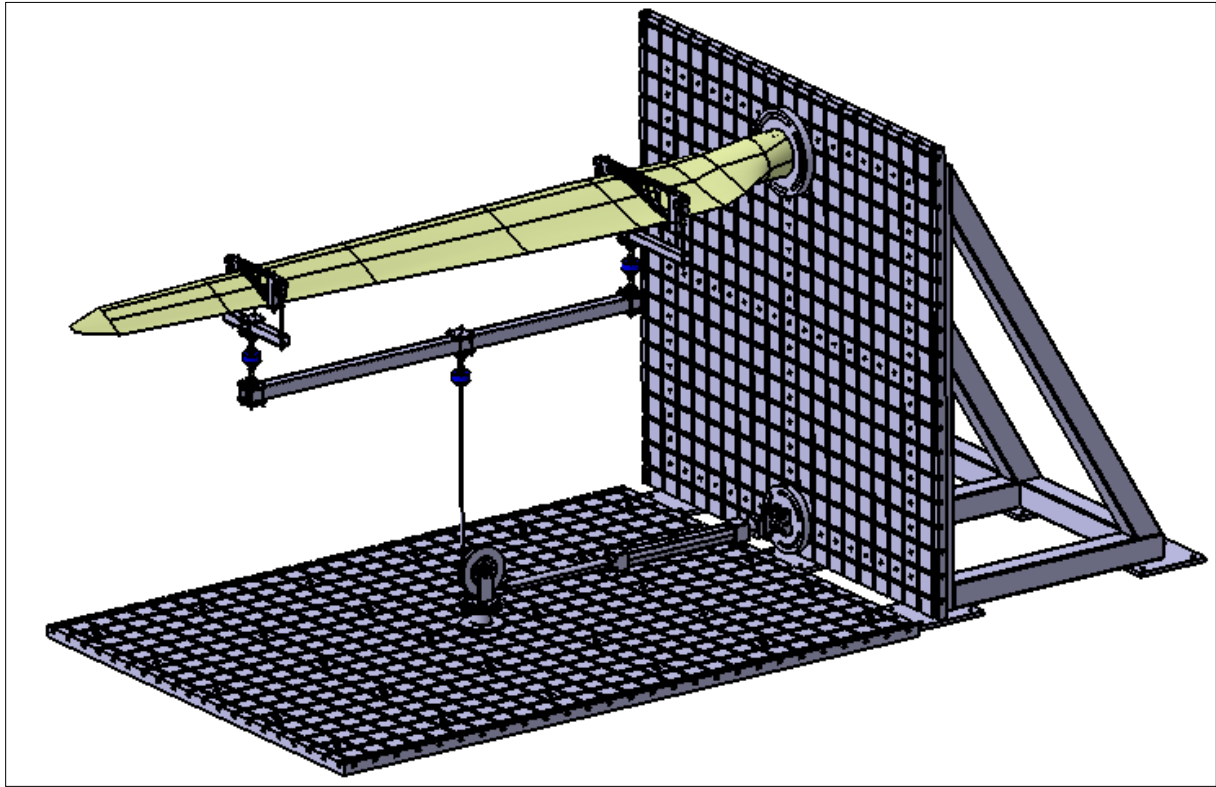
Hidrolik eyleyiciyi sisteme dik yerleştirmek piston hareket aralığı mesafesine yetmeyeceği için hidrolik eyleyici ana reaksiyon duvarına bağlanarak sisteme yatay olarak yerleştirilip, yük sisteme makara ve çelik halat aracılığıyla aktarılacaktır. Yük uygulaması için 30 kN çekme yapabilen 800 mm hareket aralığı olan yerli üretim hidrolik eyleyici seçilmiştir. Piston modeli Şekil 18’de görülebilir. Piston yerleşimi, makara, çelik halat ve yükün sisteme aktarılışı Şekil 19’da gösterilmiştir.



Şekil 18: RotaTeknik 30 kN 800 mm Hidrolik Eyleyici



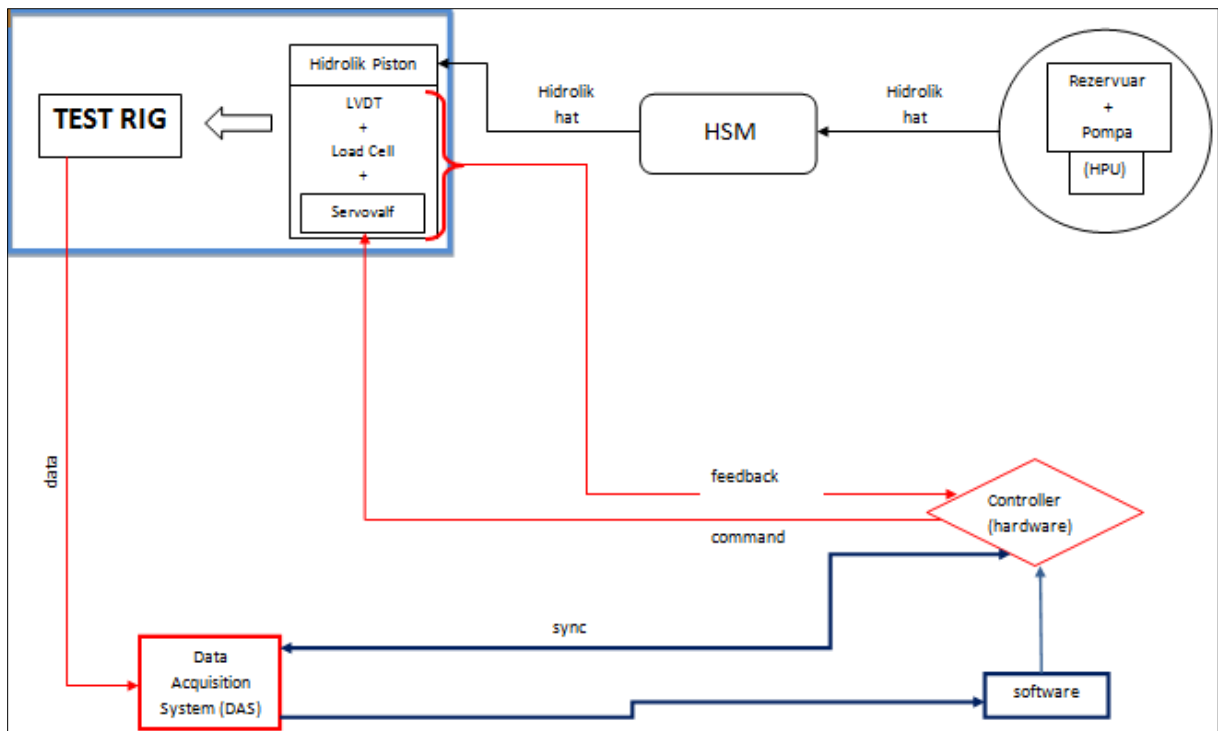
Şekil 19: Piston Yerleşimi



Şekil 20: Genel Görünüş

Hidrolik Sistem Mimarisi

Test sisteminin çalışmasına hakim olacak hidrolik sistem mimarisi aşağıda Şekil 21'deki illüstrasyonda gösterilmiştir.



Şekil 21: Hidrolik Sistem Mimarisi

Kontrolcünün servovalf'e gönderdiği komut doğrultusunda hidrolik servis manifold(HSM) rezervuardan gönderilen hidroliği düzenleyerek hidrolik eyleyiciye aktaracaktır. Yük

hücresinden gelen geri bildirimle beraber hidrolik eyleyicinin kontrolü sağlanacaktır. Test sisteminden alınan veriler (deplasman, yük), veri toplama cihazından işlenerek yazılım aracılığı ile kontrolcüye iletilecektir.

SONUÇ

Bu çalışmada, RÜZGEM tam boy kanadı ve 9 metreye kadar olan rüzgar türbini kanatları için test düzeneği tasarımı anlatılmıştır. Rüzgem kanadına yük uygulama yöntemi belirlenip, yük optimizasyonu yapılmıştır. Küçük boyutlardaki kanatlar için gerçek yayılı yüklemeye en yakın yükleme yönteminin 2 noktadan yapılan yük ağacı sistemi olduğu anlatılmıştır. Testi yönetecek olan hidrolik sistem mimarisi kısaca tanımlanmıştır. Test düzeneği üretim paketi hazırlanıp düzeneğin üretimi ve devreye alınımı en kısa sürede gerçekleşecektir.

Kaynaklar

International Electrotechnical Commission, 2002. *IEC61400-22: Wind Turbines – Part 22: Conformity testing and Certification*

Musial, W., *Wind Turbine Testing and Certification*, Wind Turbine Blade Workshop, Sheraton Uptown, Albuquerque, NM. 24-25 February 2004

International Electrotechnical Commission, 2001. *IEC61400-23: Wind Turbines – Part 23: Full-scale structural testing of rotor blades*

Larwood, S., Musial, W., 2000. *Comprehensive Testing of Nedwind 12-Meter Wind Turbine Blades at NREL*, 19th American Society of Mechanical Engineers (ASME) Wind Energy Symposium, Reno, Nevada, Golden. 10-13 January 2000

Arras, M., Arsenault, T. J., Cardenas, D., Copptelli, G., Elizalde, H., Grappasonni, C., Janoyan, K., Marzocca, P., Post, N., Probst, O., Valyou, D. N., 2015. *Development and Commissioning of a Small/Mid-Size Wind Turbine Test Facility*, 33. Wind Energy Symposium, s.1000

Pechlivanoglou, G., Weinzierl, G., 2013. *Aerodynamic and Aeroelastic Design Report of METUWIND Small Rotor Blade*, SmartBlade GmbH

Kayran, A., Yeniceli, S.C., 2013. *Design Optimization of a Whiffletree System For Static Testing of a Wind Turbine Blade*, Wind Energy Science and Technology Conference, Ankara, Turkey, 3-4 October 2013