

Namık Kılıç* 

BİAS Mühendislik, Haluk Türksoy Sok. No:12/3
Altunizade 34662 İstanbul TÜRKİYE

MEF Üniversitesi, Huzur Mah. Maslak Ayazağa
Cad. No.4 34396 İstanbul TÜRKİYE

Sarper Özcan 

BİAS Mühendislik, Haluk Türksoy Sok. No:12/3
Altunizade 34662 İstanbul TÜRKİYE

Berkman Kantar 

BİAS Mühendislik, Haluk Türksoy Sok. No:12/3
Altunizade 34662 İstanbul TÜRKİYE

Makale Bilgisi:
Araştırma Makalesi
Gönderilme: 28 Aralık 2024
Kabul: 14 Kasım 2025

*Sorumlu Yazar: Namık Kılıç
Email: nkilic1584@hotmail.com

DOL: <https://doi.org/10.56193/matim.1608585>

Tasarımda Altı Sigma Yöntemi ile Statik İvme Test Düzenliği Tasarımı

Çalışmada, havacılık, uzay ve kara platformlarında operasyonel yükler sebebiyle maruz kalınan yüksek ivme seviyelerinin test edilmesine yönelik santrifüj statik ivme test sisteminin Tasarımda Altı Sigma yöntemi ile geliştirilmesi aşamaları anlatılmaktadır. İlk aşamada gerçekleştirilen Kalite Fonksiyon Açılımı ile müşteri gereksinimleri teknik isterlere dönüştürülmüştür. İkinci aşamada Tasarım Hata Modu Etki Analizleri ve kavramsal tasarım yöntemleri ile olası tasarım zayıflıkları ve riskler değerlendirilmiştir. Daha sonra test platformunun güvenli ve yüksek performansta çalışması ve testler sırasında oluşacak güç ihtiyacının azaltılmasına yönelik yapısal optimizasyon çalışması, deney tasarımı ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği simülasyonları ile gerçekleştirilmiştir. Çalışma boyunca çeşitli Tasarımda Altı Sigma araçları kullanılarak, ilk seferde doğru tasarım hedeflenmiştir. Oluşturulan veriler ışığında test platformunun güvenli ve fonksiyonel şekilde çalışması için gerekli olan detay tasarım tamamlanmıştır. Yapılan validasyon çalışmaları ile statik ivme test sistemi kullanıma hazır hale getirilmiştir. Proje performans parametreleri karşılaştırılarak, uygulanan ürün geliştirme metodunun klasik Faz Geçiş yöntemine göre etkinliği gösterildi.

Anahtar Kelimeler: Tasarımda altı sigma, Faz geçiş metodu, Kalite fonksiyon açılımı, Deney tasarımı, Taguchi sağlam parametre tasarımı, Santrifüj statik ivme test cihazı

1. GİRİŞ

Günümüz dünyasında yoğun rekabet ve sürekli güncellenen müşteri talepleri, organizasyonları ve kurumları yeni ürünlerin kaliteli ve hızlı olarak tasarlanmasına odaklamıştır. Sürdürülebilir karlılık hedefleri, değişen pazar koşullarına uyacak şekilde ürün geliştirme süreçlerinin evrimleşmesini gerekli kılmıştır. 90'lı yılların başından itibaren proje yönetiminde ve yeni ürün geliştirme sürecinde yaygın olarak Faz Kapısı (Robert Cooper Stage-Gate) metodolojisi kullanılmaktadır [1-2]. Bu yöntemin pek çok farklı versiyonu halen geniş kitleler tarafından kullanılmaktadır. Aynı zamanda, güncel çalışmalar ürün ömür yönetimi (PLM), yeni ürün geliştirme ve

devreye alma (NPDI), yalın ürün geliştirme (LPD) veya toplam kalite yönetimi (TQM) gibi farklı yaklaşımlar ve yöntemlerin son yirmi yılda artan oranda uygulandığını göstermektedir [3,4]. Klasik ürün geliştirme sürecinde ürün gereksinimleri hiyerarşik olarak ürünün kalitesini etkilemektedir. Diğer bir ifade ile, tasarım, prototip, doğrulama ve seri üretimden gelen kalitesel sorunlar kümülatif olarak ürünün kalitesini azaltmaktadır ve hataların doğal olarak ilgili faz geçilirken tespit edilip giderilmesi üzerine odaklanılmıştır. Bu süreç yaklaşımı hataların projenin ileri safhalarında tanımlanabilmesi sebebiyle yüksek maliyetler ile çözülmesine sebep olmaktadır.

Tasarımda Altı Sigma (DFSS- Design For Six Sigma) yaklaşımı, kullanıcı taleplerini değer, kalite,

güvenirlik ve maliyet açısından yararlı tasarım çözümlerine dönüştürmeyi sistematik ve bilimsel bir yöntemle ele alan bir geliştirme sürecidir [5-7]. 25 yıldan uzun bir süredir Altı Sigma, ürün ve süreçlerin kalitesini iyileştirmek için en etkili metodolojilerden biri olarak kabul edilmektedir ve sektör lideri pek çok kurum tarafından şirket felsefesi şeklinde uygulanmaktadır [8]. Altı Sigma stratejisi kapsamında gerçekleştirilen projeler ve çalışmalar DMAIC (Define-Measure-Analyze-Improve-Control) problem çözme modeline dayanmaktadır [5,9]. Üretim proseslerinin optimizasyonuna odaklanan projeler çoğunlukla DMAIC metodolojisini takip ederken, yeni ürün geliştirmeyi amaçlayan projelerde sistematik yaklaşımlardan daha çok, geleneksel ürün geliştirme süreçleri uygulanmıştır [5]. Bu süreçlerde konsept geliştirme ve tasarım alternatiflerinin sistematik bir yaklaşımla seçilmesi ve en iyi hale getirilmesi çalışmaları yeterince ön plana alınmadığı için ancak sonradan üründe yapılacak düzeltmelerle istenilen kalite seviyesine ulaşılmaktadır. Endüstride kalite iyileştirme çalışmaları klasik Faz Kapısı metodunun uygulanması sebebiyle bazı basit altı sigma araçları kullanılsa bile zafiyetleri üretim aşamasında çözmeye çalışmaktadır. Oysa, başarılı bir ürün geliştirme ve tasarım sürecinde prototip safhasından önce problemlerin ve tasarım zayıflıklarının tanımlanması ve sağlam (robust) tasarım yöntemleri ile bu zayıflıkların giderilmesi hedeflenmelidir. Özetle, DFSS stratejisinin temel unsuru, ürün iyileştirmede kullanılan yöntemlerin ve kalite iyileştirme araçlarının tanımlı bir metodolojiyle konsept tasarım aşamasından itibaren uygulanmasıdır [5].

DFSS'de amaç, güvenilir ve sağlam tasarımların, uzun süreli karlılık, müşteri memnuniyeti ve yüksek pazar payı sağlamasıdır. Aynı zamanda süreç, ürün için kritik olan özellikleri etkin bir şekilde adreslemeli, proje maliyeti ve riskleri azaltmalıdır. Literatürde DFSS yönteminin etkinliğinin performans kriterleri açısından klasik süreçlerle karşılaştırıldığı pek çok çalışmaya rastlıyoruz. Bu çalışmalarda DFSS araçları çeşitli seviyelerde kullanılmakta olup, çalışmalar arasında değişkenlikler göstermektedir. Su ve Su tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, LCD panel tasarımında DFSS uygulanmadan önce seri üretim verimliliği %86.36 olarak ölçüldü [10]. Yeni ürün geliştirme süresince Kalite Fonksiyon Dağıtımı (QFD), Hata Modu ve Etki Analizi (FMEA), TRIZ, Deney Tasarımı (DOE) ve Taguchi yöntemi uygulandıktan sonra bu oran %99.63'e çıkmıştır. İade oranları %7.08'den %1.54'e düşmüş ve oluşan yıllık ilave 600.000 satış adedi sayesinde ürün başına geliştirme maliyetleri azalmıştır [10]. Rafiee ve Faiz tarafından sabit miktatlı motorlarda yapılan bir çalışmada ürün maliyetlerinde klasik ürün geliştirme sürecine göre parça başı ilave 9 USD'lik artışla

hata olasılık değeri %80.2'den sıfıra indirilmiştir. Bu çalışmada özellikle optimizasyon ve deney tasarımı sürecine odaklanıldığı görülmektedir [11]. Nada ve diğ. tarafından ayak kaval kemiği implantında DFSS uygulanarak kayma gerilmelerinde %50'ye varan azalma ve diz ağrılarında %30'a varan iyileşme görülmüştür [12]. Rane ve diğ. tarafından yapılan çalışmada ise devre kesici tasarımında DFSS araçlarından parametre diyagramı, SWOT analizi, Kano modeli, Sebep-Sonuç diyagramları, Pareto analizi, ANOVA analizi kullanılmıştır. Güvenirlik değerleri %61.76 dan %98.17'ye çıkarılmıştır [13]. Benzer şekilde pek çok sektörde DFSS araçları uygulanan çalışmalarda, süre, maliyet, pazar payı, güvenilirlik değerlerinde belirgin kazançlar elde edildiği görülmektedir [14-16].

Genel olarak, mevcut tasarım yöntemlerinin çoğu doğası gereği deneyseldir. Oluşturulan alternatifler çoğunlukla, diğer firmalar tarafından pazara sunulan önceki ürünlerin kıyaslanmasından ve rakip analizlerinden yola çıkarak tasarım ekibinin en iyi düşüncelerini temsil ederler. Ancak, ne yazık ki, sezgisel olarak oluşturulan tasarım çözümleri bilimsel temelden yoksundurlar ve zayıflıklar veya eksiklikler barındırırlar [5]. DFSS yaklaşımı, tasarım ve geliştirme sürecine yardımcı olan [5,17-19] ve projenin niteliğine bağlı olarak uygulanabilen çok çeşitli metodolojiler sunar. DFSS'in pek çok tanımı ve örneği olmakla birlikte en yaygın olarak adlandırılan **IDOV (Tanımlama, Tasarım, Optimize Etme, Doğrulama)** [5] metodolojisidir. DFSS, yeni bir ürün veya teknolojinin pazar başarısını en üst düzeye çıkarmaya yardımcı olabilecek güçlü ve karmaşık bir mekanizmadır. Bununla birlikte, bu metodolojide ürün tasarımına analitik bir yaklaşım benimsendiğinin altı çizilmelidir.

Üretici, tasarım sürecinin erken bir aşamasında kritik özellikleri belirleyerek, müşteri memnuniyeti üzerinde en yüksek etkiye sahip olan ürün parametrelerini geliştirmeye odaklanır. IDOV metodolojisi, kritik müşteri gereksinimlerinin hiçbirinin ihmal edilmemesini garanti eder. Tasarım süreci söz konusu olduğunda, sonraki aşamalarda ürün kalitesini ve müşteri beğenisini gösterebilecek özellikleri nasıl seçtiğimiz önemlidir. Literatür, müşterinin kritik özelliklerini öngörmeye yardımcı olmak için tasarlanmış bir dizi hazır yöntem ve araç sunar. Bu araçlar beyin fırtınası, kontrol listeleri, Kano modeli, ağaç diyagramları gibi nispeten basit veya QFD, FMEA gibi daha karmaşık çalışmaları içerebilir [5,6,19,20].

Ürünlerdeki değişkenlik ve hedeflenen kritik performans metriklerinin farklı olması Tanımlama, Tasarım, Optimize Etme, Doğrulama aşamalarını değiştirmemekte fakat her bir aşamadaki kullanılan

araçları farklılaştırabilmektedir. Her bir DFSS aşamasında potansiyel olarak kullanılan araçlar Şekil-1 de özetlenmiştir. Bhat ve diğ. tarafından yapılan ilginç bir çalışmada Hindistan'da DFSS metodu kullanan firmalarda tasarımıdaki kritik hata faktörlerinin hangi araçları ön plana çıkardığı incelenmiştir [4]. Çeşitli tecrübe ve demografik yapıda 500'den fazla sektör uzmanıyla yapılan anket çalışmalarında belirlenen on sekiz kritik hatanın DFSS prosesleri ile ilişkisi istatistik yöntemler ile incelenmiştir. Projedeki hataların özellikle tanımlama ve analiz safhasında çıktığı ve Müşterin Sesi çalışmalarının en güçlü parametre olduğu görülmektedir [4]. Fancisco ve diğ. tarafından yapılan çalışmada, DFSS uygulandığında dayanıklı tüketim ürünlerinde fayda beklenen yedi ana başlıkta iyileşmeye nasıl bir katkı vereceği incelenmiştir [21]. Uzmanların %80'i, DFSS yol haritasının ürün geliştirme sürecinin tüm beklentileri karşıladığını belirtmiştir. Kırk altı tasarım aktivitesinin %65'ini çok önemli olarak nitelendirmiştir. Özetle dayanıklı tüketim ürünlerinin geliştirilmesi DFSS yönteminin süre, maliyet, kalite ve güvenilirlik konularında konsept tasarımdan pazara sunulmasına kadar tüm aşamalarda uygulanmasının faydalarını nicelik olarak ortaya koymaktadır.

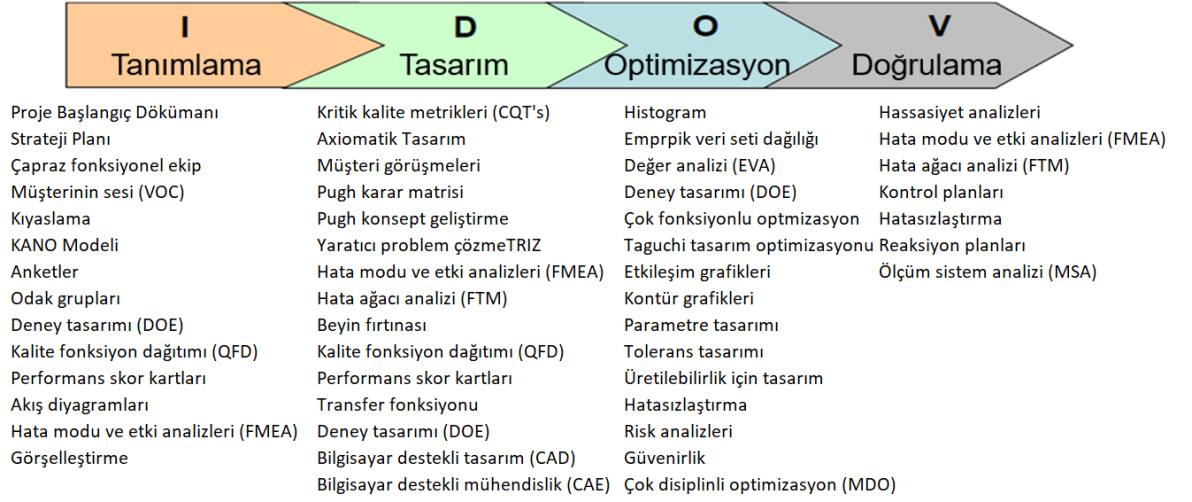
Dzulinski ve diğ. tarafından yapılan sistematik derleme çalışmasında, literatürdeki kitap ve makaleler incelenerek ürün geliştirme sürecinde belirlenen 72 aktivite, kullanılan DFSS aracına göre değerlendirilmiştir [3]. Bu çalışmada ürün geliştirme süreci; ilk, orta ve son seviye olarak kategorize edilmiştir. QFD, DOE ve FMEA'nin en etkin araçlar olduğu görülmektedir. İlk safhada belirtilen QFD %14.42, ikinci safhada DOE %11.82 FMEA %6.36, son safhada ise DOE'nin %12.2 ile öncelikli kullanılan araçlar olduğu görülmektedir.

Literatür araştırması sonucunda tanımlama aşamasında kullanılan en popüler araçlardan biri, müşterinin gereksinimlerini belirlemeyip anlamaya ve ölçülebilir teknik parametrelere dönüştürmeyi sağlayan QFD çalışmasıdır [5,22-26]. Bu çalışma aynı zamanda müşterinin sesi olarak da adlandırılmaktadır. QFD metodolojisi, müşterinin temel gereksinimlerini ve beklentilerini karşılamada önemli ölçüde yardımcı olur. Tasarım ve üretim sürecinin verimli bir şekilde kontrol edilmesini sağlamak için, müşterinin kritik gereksinimleri üzerinde en güçlü etkiye sahip olan teknik parametreler erken bir aşamada belirlenmelidir. DFSS bakış açısından yapılması gereken şey, QFD çalışmasından türetilen işlevsel gereksinimlerin optimize edildiğinden emin olmaktır. Dikkate alınması gereken faaliyetler arasında fiziksel ve süreç yapısı geliştirme, optimizasyon ve transfer fonksiyonu geliştirme, testler ve tasarlanmış

deneyler, doğrulama, güvenilirlik yöntemleri ve diğer DFSS algoritma faaliyetleri yer alır.

Tasarımda oluşabilecek hataların, ürüne dönüşmeden önce değerlendirilmesi, çok faydalı olacak bir risk analizi çalışmasıdır. Bu yönde 70'li yıllardan itibaren yaygın olarak kullanılan FMEA yönteminin tasarıma uygulanmasıdır [5,27,28]. DFMEA, öncelikle tasarımdan sorumlu ekip tarafından, mümkün olduğunca, olası hata modları ve bunlarla ilişkili nedenler ve mekanizmaların dikkate alındığından emin olmak için kullanılan bir analitik tekniktir [5]. İlgili her sistem, alt montaj ve bileşenle birlikte değerlendirilmelidir. Süreç, tasarımın ne yapması ve ne yapmaması gerektiğinin (yani, tasarım amacı) bir listesini geliştirerek başlar [29]. Müşteri istekleri ve ihtiyaçları dahil edilmelidir; bunlar QFD gibi kaynaklardan belirlenebilir. İstenen özelliklerin tanımı ne kadar iyi olursa, önleyici/düzeltilici eylem için olası Arıza Modlarını belirlemek o kadar kolay olur. Çalışmanın son aşamasında gerçekleştirilecek FMEA çalışması ile riskler tasarım sürecinin içine dahil edilecektir.

DFSS sürecinin en önemli aşamalarında biri optimizasyon sürecidir. Deney tasarımı ve optimizasyon tasarımın tüm zayıflıklarının giderilerek üretime ve doğrulamaya hazır hale getirilmesini içermektedir. Bu süreçte pek çok optimizasyon yöntemi kullanılmakta olup, karşılaşılan problemlerin içeriğine göre DOE ve optimizasyon metodu belirlenmektedir. Bu çalışmada tasarım parametreleri ile hedef fonksiyon arasında doğrusal bir ilişki beklendiği için yöntem olarak Taguchi metodu kullanılmıştır. Taguchi'nin sağlam parametre tasarımı, transfer fonksiyonlarını detaylandırmak için istatistiksel deneysel tasarım uygulayan ve tasarım optimizasyonu yapan sistematik bir metodolojidir [30-32]. Taguchi yöntemi, sağlam mühendislik tasarım prensiplerinin ve Taguchi'nin ortogonal dizi deneyi adı verilen deney tasarımı versiyonunun birleşimidir [30]. Bir Taguchi deneyinde, sadece ana etkiler ve iki faktörlü etkileşimler dikkate alınır [33,34]. Daha yüksek dereceli etkileşimlerin var olmadığı varsayılır. Ek olarak, deneyicilerden, konu hakkındaki bilgileri aracılığıyla, deneyi yürütmeden önce hangi etkileşimlerin önemli olabileceğini belirlemeleri istenir. Bu iki adımdan sonra, deneysel faktörlerin toplam serbestlik derecesi Taguchi deneysel tasarımında belirlenmelidir [30]. Serbestlik derecesi, incelenen tüm etkileri tahmin etmek için gereken göreceli veri miktarıdır. Taguchi deneyindeki optimizasyon, optimum yanıt veren faktör seviyesi kombinasyonunu bulmayı içerir. Optimum yanıt "en iyi" kriterinin ne olduğuna bağlıdır. Bu çalışmada QFD ile kritik tasarım parametreleri belirlendikten sonra Taguchi yöntemiyle belirlenen parametrelerin optimizasyon çalışmaları sanal ortamda yapılacaktır.



Şekil 1. DFSS aşamalarında kullanılan araçlar

Havacılık, uzay ve kara platformlarından gerçekleşen fonksiyonel yüklemeler sırasında ana yapıya bağlı komponent ve sistemlerin üzerinde atalet sebebiyle yüksek ivmeler ve bu doğrultuda yüksek yükler oluşabilmektedir. Bazen yükleme koşulları çok ve rezonans sebebiyle oluşan yüksek ivme değerleri ile karıştırılmakta fakat doğası gereği bu yüklemeler çok daha uzun süreler etkin olması sebebiyle çevresel testlerde sıklıkla kullanılmakta olan elektromekanik sarsıcılardan farklı test düzeneklerinde uygulanması gerekmektedir. Özellikle elektronik kutular üstünde şok ve titreşim testleriyle simüle edilemeyen uçuş ve yol yükleri sebebiyle oluşan ivmeler, lehimlerin, sensörlerin ve bağlantıların zarar görmesine, bazen kopmasına sebep olabilmektedir. Hava taşıtının yapısal çerçevesine yakın noktalara bağlanan parçalarda bile bağlama yönüne ve lokasyona bağlı olarak yüksek ivmeler ve yükler oluşmaktadır [35,36]. Askeri yapıların gereksinim doğrulamalarında kullanılan temel standartlardan biri olan MIL-STD-810-H'de servis yükleri sırasında oluşan yüksek ivmelere karşı yapısal dayanım, bağlantı kontrolleri ve fonksiyonel özelliklerde zayıflamayı test etmek amacıyla Metot 513 uygulanmaktadır [37]. Metot 513'de yapısal amaçlı yüksek ivmelerin testi için önerilen düzeneklerden biri santrifüj test düzeneğidir. Söz konusu test sisteminin maliyeti, yüksek güvenilirlik beklentisi ve uzun süreler çalışacak olması, tasarım ve üretim sürecinde klasik Faz Kapısı yönteminin kullanılmasının getireceği riskler açısından alternatif bir süreç ihtiyacı ortaya koymaktadır. Bu tip ileri mühendislik test sistemleri çözümleri, deneme ve yanılma dışında üst seviye mühendislik yaklaşımları ile yapılmalıdır. Test sisteminin geliştirilmesinde giriş bölümünde belirtilen avantajlar doğrultusunda DFSS uygulanmasına karar verildi. Literatür çalışması doğrultusunda projeye en büyük fayda sağlaması beklenen QFD, parametre diyagramı,

FMEA, DOE, ANOVA analizi, Taguchi optimizasyon yöntemi, Tasarım Doğrulama Planı kullanılmıştır. Çalışmada ortaya çıkan süre, maliyet ve güvenilirlik gibi kritik performans verileri klasik süreçle karşılaştırılarak uygulanan metodolojinin etkinliği gösterilmiştir.

2. DETERMINİSTİK TASARIM – FAZ GEÇİŞ METODU

Santrifüj test sistemi, çeşitli amaçlarla uzun yıllardır araştırmacıların üzerinde çalıştığı ve çözümler geliştirdiği bir yöntem olmuştur [38]. Endüstrinin farklı kollarında ve bilim alanlarında birbirinden bağımsız uygulamalara rastlanmaktadır. Santrifüj statik ivme test sistemi temelde merkezde dönen bir yapı ve bu yapıya bağlı döner kol ve bir model kutusundan oluşmaktadır [38,39]. Ürün geliştirme süreci başlangıçta Bias mühendislikte uygulanmakta olan Faz Geçiş metoduna dayalı tasarım prosedürü doğrultusunda kurgulanmıştır. Tasarım Süreci, 5 temel aşamadan oluşmaktadır. Bunlar; Ön Tasarım, Detay Tasarım, Test ve Doğrulama, Tasarım ve Geliştirme Değişikliklerinin Kontrolü ve Kabul aşamalarından oluşmaktadır. Oluşturulan Proje Beratında görev yetki ve sorumluluklar, tasarım ve geliştirme aşamaları, tasarım gözden geçirme taslakları, doğrulama ve validasyon taslakları, tasarım girdileri, işlevsel ve performans gereksinimleri, yasal gereklilikler, güvenlik gereksinimleri, maliyet hedefleri belirtilir. Bu çalışmada proje beratında yedi ay süre içinde, 5.05 adamxay ve toplam 47,520 € maliyetle projenin gerçekleştirileceği öngörülmüştür. Proje maliyet kalemleri Tablo-1'de gösterilmektedir.

Ön tasarım çalışmasına girdi olarak literatür ve rakip ürün araştırması yapılarak teknik istekler oluşturulur. Oluşturulan teknik istekler Tablo-2 de belirtilmektedir.

Tablo 1. Proje maliyet kalemleri

Gider Grubu	Maliyet, €
Proje Personel Maliyeti	23,200
Seyahat Giderleri Tahmini Maliyet	2,000
Alet/Teçhizat/Yazılım/Yayın Alımları Tahmini Maliyeti	3,000
Malzeme Alımları Tahmini Maliyeti	10,500
Üretim işçilikleri	4,500
Revizyonlar, %10 proje maliyeti	4,320
Toplam	47,520

Tablo 2. Teknik isterler

İster no	Tanımı
1	Test numunesi boyutu bağlantı fikstürü dahil 200x200x200 mm
2	Test numunesi ağırlığı 50 kg
3	Hedef ivmelenme 50 g
4	Hızlanma süresi en çok 5 dakika
5	Kaza durumunda çevresine zarar vermeyecek biçimde güvenlik önlemleri alınacaktır.
6	Kaza durumda operatör kararıyla veya yazılım aracılığıyla sistem mümkün olan en hızlı biçimde durdurulabilecektir.
7	Sistem bir yazılım aracılığıyla kullanılacak ve istenen ivme ve hızlara önceden belirlenen hız profilini takip ederek ulaşacaktır.

Ön Tasarım, belirlenen tüm isterleri karşıladığı görüldükten sonra; Ön Tasarım gözden geçirme toplantısı düzenlenir. Herhangi bir revizyon kararı ya da proje iptali kararı çıkmaz ise tasarım onayı alınmış olur ve Detay Tasarım aşamasına geçilir. Bu aşamada sistem analiz ve hesaplamalarının uygun olduğu ve amaçlanan tasarım gerekliliklerinin sağlanabildiğinden emin olmak için tasarım için gerekli kontrollerin yapılması gerekir. Proje zaman planı Şekil-2 de gösterilmiştir.

Üretilen prototipin ölçü kontrol raporlarının proje birimi tarafından uygunluğu kontrol edilir. Yapılan kontroller sonucunda uygunsuz olan sonuçlar var ise kavramsal prototip üretimi tekrarlanır. Yapılan tasarım revizyonu gerekliliği değerlendirmesi sonucunda gerekiyor ise prototip tasarımı tekrar yapılır. Organize edilen Detay Tasarım (CDR) Gözden Geçirme aşaması sonrası üretim yapılır. Test ve Doğrulama aşamasında, başarısızlıklar olması durumunda prototip üretim, detay tasarım veya ön tasarım aşamalarına geri dönülür ve üründeki iyileştirmeler tamamlanır. Test Sonuç Gözden Geçirme aşaması sonucunda onay alan ürün ile ilgili kabul aşamasına geçilir. Kullanıcı ve sahadan gelen geri beslemeler doğrultusunda değişiklik talepleri, tasarım ekibi tarafından değerlendirilir.

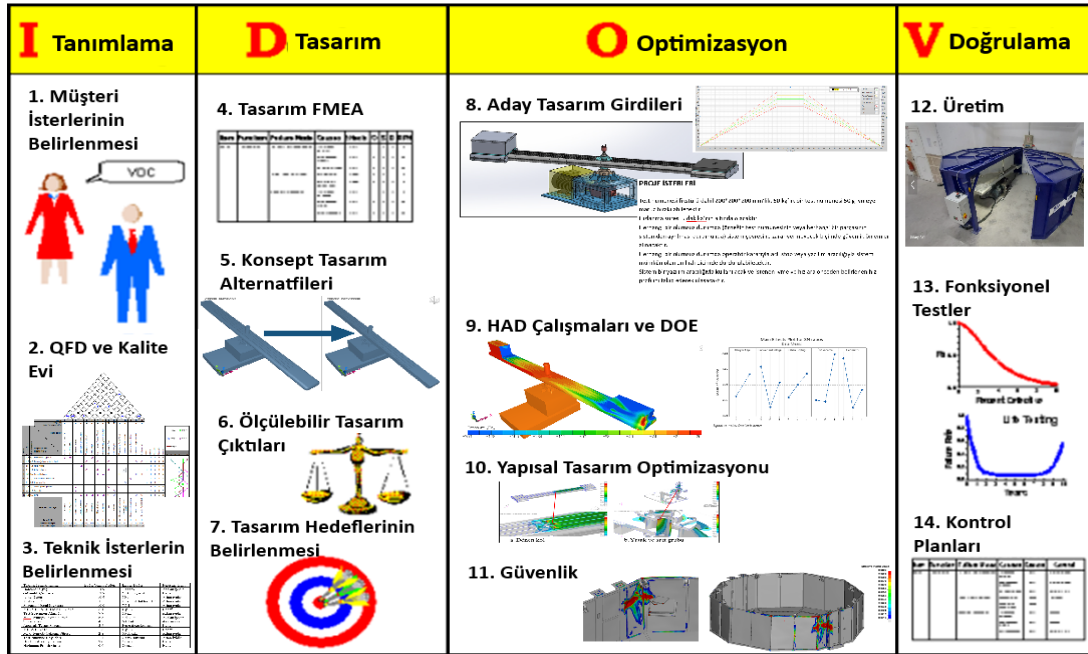
3. DFSS METODU

Mevcut Faz Geçişli deterministik tasarım sürecine alternatif olarak kullanılan DFSS yöntemi

ile ilk seferde doğru ürünün gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda isterlerin belirlenmesi amacıyla müşteri anketleri, uzman görüşmeleri, rakip incelemeleri çalışmaları ile başlamıştır. Sonrasında yapılan QFD analizi ile isterler tasarım parametrelerine (DP) dönüştürülmüştür. Kavramsal tasarım aşamasında DFMEA ve sonlu elemanlar analizlerinden faydalanarak konsept tasarımı oluşturacak bilgiler toplanmıştır. Optimizasyon aşamasında kritik özellikler için deney tasarımı çalışması, Taguchi sağlam parametre tasarımı, iterasyonlar kullanarak hedef değerlerin sağlanması hedeflenmiştir. Son aşamada doğrulama planında belirlenen aksiyonlar gerçekleştirilerek ürün devreye alınmıştır. Tüm çalışma sürecinde kullanılan metodoloji ve adımlar Şekil-3’de özetlenmiştir. Proje başında kurgulanan Faz Geçişli deterministik tasarım yöntemiyle karşılaştırıldığında süreçler arasında benzerlikler olmakla beraber, klasik sistemde aşamaların geçişlerinde belirgin bir sayısal sistematik kullanılmadığı, kararların tamamen tecrübeye bırakıldığını görmekteyiz. Dolayısıyla iyileştirme çalışmalarının ne seviyede yapılacağı, karar stratejileri klasik ürün geliştirme süreçlerinde uygulama, test et, düzelt, iyileştir döngüsüyle yürümektedir. Her bir aşamanın sonunda ekip kararıyla başa dönelebilmekte ve ciddi süre kayıpları oluşabilmektedir. Daha tehlikelisi, bir sonraki aşamaya ciddi riskler taşınabilmektedir. Oysa başarılı bir ürün geliştirme sürecinde kullanılan doğru araçlar ile nihai doğrulama aşamasının temel amacı iyileştirmeler için veri oluşturmak değil, ürün kabulünün tamamlanmasıdır.

		1. Ay	2. Ay	3. Ay	4. Ay	5. Ay	6. Ay	7. Ay
Ön Tasarım	Sistem Gereksinimleri Gözden Geçirilmesi							
	Benchmark Analizi							
	Görev Profili Tespiti							
	Proje Yönetim Planı Oluşturulması							
	Sistem İsterleri Gözden Geçirme Toplantısı							
Detay Tasarım	Mevcut motor ile kapasite belirlenmesi							
	Redüktör seçimi							
	Mil-yatak grubu kavramsal tasarımı							
	Kanat grubu kavramsal tasarımı							
	Kaide kavramsal tasarımı							
	Kavramsal tasarım gözden geçirme toplantısı							
	Akış-modal-yapısal analizlerin gerçekleştirilmesi							
	Mil-yatak grubu detay tasarımı							
	Kanat grubu detay tasarımı							
	Ölü ağırlık detay tasarımları							
Üretim - Mekanik	Siparişlerin verilmesi							
	Ürün kalite kontrolleri							
	Üretim - montaj faaliyetleri							
Üretim - Yazılım	Eğitim							
	Arayüz tasarımı							
	Veri toplama katmanı yazılımı							
	Yazılım doğrulama faaliyetleri							
Üretim - Kontrol sistemi	Sürücü pano gözden geçirilmesi							
	Akım koruma ekipmanı gerekliliği entegrasyonu							
	Sürücü parametrelerinin ayarlanması							
	Acil stop devresi tasarımı ve entegrasyonu							
	Frenleme direnci entegrasyonu							
	Kontrolcü - Encoder entegrasyonu ve hız okuma							
	kablo belirlenmesi ve kablolama							
Test Doğrulama	Kademeli yüklü/yüksüz denemeler							
	Dummy numune ile testler							
	Revizyonlar ve Kabul							

Şekil 2. Faz Geçiş yöntemiyle oluşturulan ürün geliştirme zaman planı



Şekil 3. Santrifüj test platformu geliştirilmesinde kullanılan DFSS aşamaları ve araçları

4. TANIMLAMA AŞAMASI – QFD

Mevcut ürün geliştirme sürecinde isterler, rakip ürün incelemeleri, literatür araştırmaları ve tasarım ekibinin tecrübeleri ile oluşturulmaktadır. Bu doğrultuda Tablo-2’de santrifüj ivme test sistemi için

yedi adet ister belirlenmiştir. DFFS yönteminde en çok üstünde durulan aşama, tanımlama aşamasıdır. Proje ekibinin bu aşamada harcayacağı emek ve etkili araçların kullanılması sonraki aşamalara ürün ile ilgili hata ve risklerin taşınmasını engelleyecektir. Ürünün müşterinin sesini yansıtması temel amaçtır.

QFD uygulaması DFSS prosesi içinde en önemli aşamalardan biri olup, tam uygulanması durumunda birbirlerine bağlı dört ayrı çalışmadan oluşur [5]. Belirtilen dört QFD çalışması sadece tanımlama aşaması değil, daha sonraki tasarım ve optimizasyon aşamalarının da önemli bir aracıdır (Şekil-4). Birinci çalışma, Kalite Evi (House of Quality -HOQ) olarak adlandırılır ve genellikle QFD' ye atıfta bulunmak için kullanılır. Ancak bu ilk matrisin kendisi tek başına tam uygulamayı oluşturmaz. HOQ müşteri gereksinimlerini alır ve bunları teknik (tasarım) gereksinimlere dönüştürür. HOQ, müşterinin sesini yakaladığı ve bir yol oluşturduğundan dolayı, geliştirme sürecindeki en kritik unsurdur ve en sık kullanılan QFD bileşenidir. Aşağıda belirtilen her bir adım, HOQ oluşturulurken tamamlandığı sıraya göre adlandırılmıştır. İkinci matris teknik gereksinimleri parça özelliklerine dönüştürür ve bunlar daha sonra üçüncü matriste süreç gereksinimleri açısından ifade edilir. Son matriste ise gereksinimler üretim parametrelerine dönüştürülerek QFD çalışması tamamlanır [5].

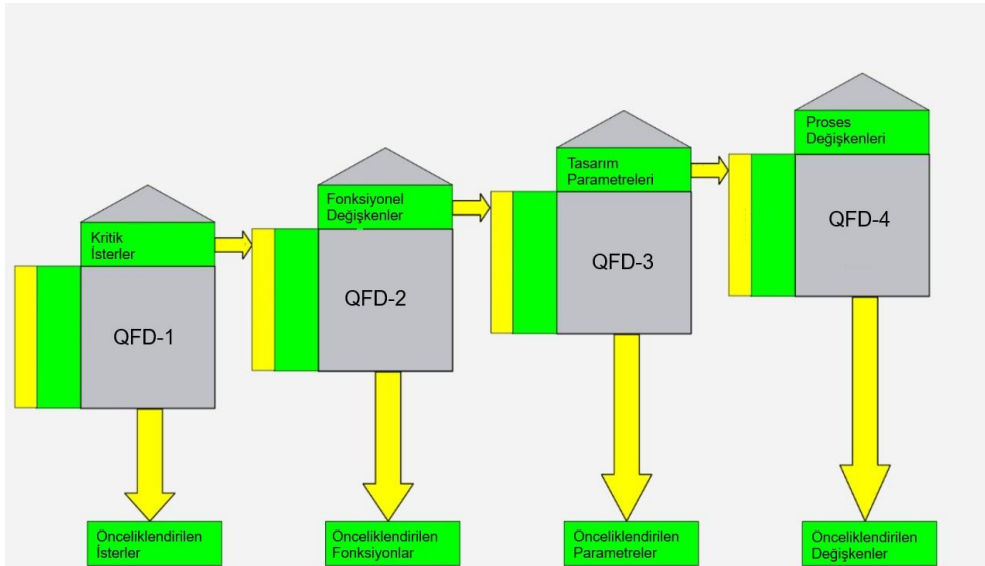
Kalite evi oluşturulurken, birinci adım, müşteri ihtiyaçlarını tanımlanması ve önem derecelerini belirlenmesi çalışmasıdır. Müşteri ihtiyaçları (gereksinimleri) genellikle anketler, görüşmeler, odak grupları ve diğer benzer yöntemlerle toplanır. Müşteri ihtiyaçları önem derecesine göre birkaç seviyede tanımlanabilir ve tanımlanan seviyeler ihtiyaç hakkında ayrıntılı bilgi sağlayabilir. Santrifüj statik ivme test makinaları, özellikle elektronik ekipman sektörüne hizmet veren test merkezleri tarafından kullanılmaktadır. Söz

konusu ürünün yurtdışı teminini yapılmakla birlikte yerli imkanlarla üretim olmadığı için, müşterinin sesi çalışmaları kurulu sistemlerin kullanıcılarından alınan bilgiler doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Havacılık, Uzay Sanayi ve Savunma sanayi firmalarında kendi kullanımları için satın alınan veya modifiye edilmiş test sistemleri bulunmaktadır [40]. Bu ürünlerle ilgili kullanıcı görüşleri alınarak QFD çalışması başlatılmıştır. Buna ilave olarak ürünün potansiyel kullanıcısı olabilecek orta ve büyük ölçekli test merkezlerinin yöneticileri ile görüşmeler gerçekleştirilmiştir. Elektronik ekipman üreticilerinden test ihtiyaçları toplanarak, pazardaki ihtiyaçlar belirlenmiştir. Ayrıca internet üzerinden rakip ürünlerin özellikleri mühendislik ekibince önem derecesine göre sıralanmıştır. Kullanıcılardan, test yöneticilerinden ve rakip analizlerinden gelen veriler belirlenen ağırlık seviyeleri ile çarpılarak en önemli özelliğe “9” verecek şekilde, önem derecesi olarak kalite evine yerleştirilmiştir. Önem derecesi hesaplamasında “Kullanıcılar K_i ”, “Test Firmaları TF_i ”, “Rakipler R_i ” için derecelendirme hesabında 1,2 ve 3 numaralı denklemler kullanılmıştır.

$$K_i = \frac{K_i}{\sum_{i=1}^m K_i} \quad (1)$$

$$TF_i = \frac{TF_i}{\sum_{i=1}^m TF_i} \quad (2)$$

$$R_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^m R_i} \quad (3)$$



Şekil 4. Kalite Fonksiyon Dağıtımı (QFD) aşamaları

QFD çalışmasında kullanılacak önem derecesi hesaplamasında her bir veri türü ağırlıklandırılarak, toplam önem derecesi hesaplamasında 4 numaralı denklem kullanılmıştır.

$$OD_i = 0.6 \times K_i + 0.3 \times TF_i + 0.1 \times R_i \quad (4)$$

Her bir müşteri önem derecesi, Kullanıcılar, Test Firmaları ve Rakip analizindeki uzman görüşlerinden oluşmaktadır. Bu değerlerde en önemli bileşen kullanıcılardan gelmektedir.

İkinci adımda, teknik gereksinimler tanımlanıp, karşılıklı ilişkileri belirlenir. Müşteri ihtiyaçlarını hesaplanan önem derecelerine göre listeledikten sonra, teknik gereksinimler oluşturuldu. Müşteri ihtiyaçları, müşterinin dilinden ifade edilmesi genelde tercih edilir. Teknik gereksinimleri oluşturmaktaki amaç, bu ihtiyaçların ölçülebilir niteliklerle ifade edilen tasarım gereksinimlerine çevrilmesidir. Her bir teknik gereksinim bir veya daha fazla müşteri ihtiyacını değişen önem derecelerine göre karşılayabilir. HOQ çatısı, teknik gereksinimler arasındaki korelasyonu göstermek için kullanılır. Hangi teknik gereksinimlerin birbirini desteklediğini veya birbirine karşı çalıştığını belirlemek önemlidir. Bu adımda ayrıca teknik gereksinimler için iyileştirme yönünün (maksimum, minimum veya hedef değere ulaşma) belirlenmesi de yer alır. Bu bilgiler çatı ile teknik gereksinimleri listeleyen satır arasındaki bir satırda saklanır. Şekil-4 de yeşil renk ile belirtilen sol dikey sütunda listelenen müşteri ihtiyaçları (Şekil-5 müşteri istekleri), ilişki matrisi adı verilen bölümü doldurarak en üstte yeşil renkte yatay satırda listelenen teknik gereksinimlere bağlanır (Şekil-5 teknik istekler). QFD çalışması görselliği yoğun bir metodoloji kullanmaktadır, sembollerle müşteri ile teknik gereksinimler arasındaki ilişkiler tanımlanır. Müşteri gereksinimlerinden biriyle güçlü bir ilişkisi olan en

az bir teknik gereksinim olması gerekir. Bunun olmaması, belirli bir müşteri gereksiniminin önemli ölçüde karşılanamayacağını gösterir. Benzer şekilde, bir teknik gereksinim müşteri gereksinimlerinden herhangi biriyle güçlü bir şekilde bağlantılı değilse, bu gereksinim QFD analizine dahil edilmemelidir.

Dördüncü adımda rekabet analizi gerçekleştirilir. Rakiplerin ürün veya hizmetleri, matrisin en sol sütununda gösterilen müşterilerinin sesini karşılamadaki performansları açısından incelenir. Her rakip ürünü değerlendirmede, 5'in en iyi temsil ettiği 1 ile 5 arası bir ölçek kullanılmıştır. Rakip analizlerinde firmaların internet sitelerinden faydalanılmıştır. Beşinci adımda, rekabet analizinin sonuçlarını ve müşteri ihtiyaçları için önem derecelerini kullanarak, teknik gereksinimler için hedef değerlerin seçilmesi aşamadır. Rakiplerin daha iyi performans gösterdiği ihtiyaçlara karşılık gelen gereksinimler ve daha yüksek önem derecesine sahip olanlar vurgulanır. Daha sonra, her teknik gereksinim için seçilen hedef değerlere ulaşmanın ne kadar zor olduğuna göre teknik zorluklar belirlenir. Sıralamalar genellikle 1'in en kolay, 5'in en zor olduğu beş puanlık bir ölçek kullanılarak yapılır. Bazı QFD uygulamalarında, bu adımda ayrıca teknik gereksinimler açısından rakip değerlendirmesini de içerir ve sonuçlar önem derecelendirmelerinden önce matrisin bodrumunda yer alan bir satıra kaydedilir. Son bölümde, önem derecelendirmelerinin kaydedildiği evin bodrumu tamamlanır (Şekil-5, hedef ve limit değerler). Önem derecelendirmeleri, QFD sürecinin sonraki adımlarında hangi teknik gereksinimlerin en fazla dikkati çekeceğini belirlemek için hesaplanır. Önem derecelendirmeleri, her bir öğenin müşteri ihtiyaçlarını karşılama açısından ağırlığına göre her bir teknik gereksinimin göreceli önemidir.

Tablo 3. Müşteri istekleri

#	Müşteri İsteri	K	TF	R	OD
1	Standartlara uygunluk	9	9	9	9.0
2	Farklı ağırlıkları test edebilmeli	6	7	5	6.2
3	Kolay montaj	5	5	5	4.5
4	Kolay hızlanma	4	3	4	3.7
5	Güvenli kullanım	7	6	5	6.5
6	Hızlanma tarif edilebilmeli	1	1	1	1.0
7	Uyarı vermeli	3	4	1	3.1
8	Düşük işletme giderleri	8	8	7	7.9
9	Sessizlik	2	2	5	2.2
10	Fiyat	7	8	3	6.9

Tablo 4. QFD’de kullanılan semboller

Sembol	Tanım	Sayısal Değer
⊖	Güçlü İlişki	9
○	Orta ilişki	3
▲	Zayıf ilişki	1
++	Güçlü pozitif korelasyon	
+	Pozitif korelasyon	
-	Negatif korelasyon	
▼	Güçlü negatif korelasyon	
▼	İyileşme yönü negatif – amaç azaltmak	
▲	İyileşme yönü pozitif – amaç arttırmak	
X	Amaç hedef değere ulaşmak	

Her bir teknik gereksinimin mutlak önemi, aşağıdaki ifade kullanılarak hesaplanır:

$$W_j = \sum_{i=1}^n d_i r_{ij} \quad (5)$$

Burada W_j , j ’inci teknik gereksinimin ağırlığı, d_i , i ’inci müşteri gereksiniminin önem derecesi ve r_{ij} i ’inci müşteri gereksinimi ile j ’inci teknik gereksinim arasındaki ilişki katsayısıdır ve HOQ grafiğindeki “ilişki matrisinden” çıkarılır. Daha sonra, bağıl önem değeri aşağıdaki denklem kullanılarak belirlenir

$$Z_j = \frac{W_j}{\sum_{k=1}^m W_k} \quad (6)$$

Burada Z_j , j ’inci teknik gereksinimin bağıl ağırlığıdır (önem derecesi). Rakip ürünlere kıyasla daha yüksek önem derecesine ve düşük performansa sahip teknik gereksinimler, yukarıda açıklanan aynı işlem kullanılarak parça özelliklerinin belirlendiği başka bir matrisin oluşturulduğu ikinci aşamaya taşınır. Bu durumda teknik gereksinimler, yeni matrisin sol sütununa girilir. Bu işlem, QFD uygulamasındaki son matris tamamlanana kadar devam eder. Biz bu makalede ürün seri üretim ve özel prosesler içermediği için kalite evi seviyesinde QFD çalışmasını bitireceğiz. Bağıl ağırlıklara bakınca kullanıcı açısından en dikkat çeken teknik özelliğin elektrik motorunun çektiği yük olduğunu görmekteyiz (14.9), sonrasında güvenli çalışma (13.7) maksimum test ivmesi (10.7), sistemin doğal frekansı (10), ve mukavemeti (10.2) önemli çıkmaktadır. Elektronik ekipmanların yüksek ivme yükleri altında fonksiyon ve dayanımı ile ilgili MIL-STD-810-F, MIL-STD-202 ve IEC68-2-7 numaralı test standartları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bazı rakiplerin bu standartlardan biri ve birkaçını kapsayabildikleri görülmekle birlikte üçünü birden içeriyor olmanın müşteri açısından önemli bir kriter olduğu görülmüştür. Üzerinde çalışılacak test platformunun çalışma aralığı, maksimum ivme

seviyesi, tolerans aralıkları gibi ana isterlerin oluşturulmasında QFD çalışması kullanılmıştır. Bu doğrultuda test numunesinin bağlantı fikstürü dahil 200x200x200 mm boyutlarında, 50 kg’lık ağırlığı 50 g ivmeye kadar çıkarması hedeflenmiştir.

Düzenegin maksimum ivmeye gelene kadar geçen hızlanma süresi 5 dakikanın altında olacaktır. Çıkan ivme değerlerini sağlayacak dönme hızlarının yüksek olması sebebiyle herhangi bir olumsuzluk durumunda (örneğin test numunesinin veya herhangi bir parçasının sistemden ayrılması durumunda) sistem çevresine zarar vermeyecek biçimde güvenlik önlemleri alınmalıdır. Böyle bir durumda operatör kararıyla acil stop düğmesine basılsa dahi güvenli durma yazılım aracılığıyla belirlenen bir yavaşlama profili ile durdurulabilecektir. Sistem, maksimum ivme değerine ulaştıktan sonra sürekli çalışma süresi 60 dakika olarak belirlenmiştir. Bu süre içinde sistemdeki ivme değişimi, güç dalgalanması minimum seviyede tutulmalı ve herhangi bir anomali davranışı sistem tarafından tespit edilip kayıt altına alınmalıdır.

QFD çalışmasının birinci aşaması olan HOQ Şekil-5’de gösterilmektedir. Teknik özellikler çıkan bağıl önem değerine göre Tablo-5’de özetlenmiştir. Tablo-5’de belirtilen ilk beş teknik ister ile ilgili optimizasyon çalışmaları optimizasyon aşamasında detaylı olarak incelenmiştir.

Mevcut ürün geliştirme sürecinde kıyaslama literatür çalışmaları ile yedi tane ister belirlenmiştir. Bu isterlerin önem sırası ise proje ekibinin tecrübe ve inisiyatifleriyle oluşturulmuştur. DFSS de kullanılan anket ve QFD çalışması doğrultusunda ürüne doğrudan etki eden on beş adet teknik ister oluşturulmuş vebu isterler sayısal metriklerle önem sırasına göre derecelendirilmiştir. Klasik yöntemle test sırasında elektrik motorunun harcadığı güç ve güvenlik çemberi proje ekibinin ister listesinde olmamasına rağmen, QFD çalışmasında en önemli isterler olduğu görülerek, tasarım ve optimizasyon aşamalarında bu iki ister üzerine odaklanıldı.

STATİK İVME TEST SİSTEMİ MALZEME LİSTESİ			
No	İsim	Açıklama	ADET
KANAT GURUBU PARÇA/MALZEME			
1	Kanat plaka altı	400x400x20 6061 alaşım	2
2	sigma profil	90x180x3000 T10 ağır 3 m 0.05 tol	1
3	sigma profil	90x180x400 T10 hafif 0.4 m 0.05 mm tol	4
4	sigma profil bombeli	Kenar çita 45x45	16
5	Kanat dış kapak	Alüminyum plaka 6 mm	2
6	çetvel	400 mm	2
RULMAN ARA YATAK - MİL GURUBU PARÇA/MALZEME			
7	Rulman (kendinden yataklı)	UCF 212	2
8	enkoder bağ braket	ST 37 sac imalat	1
8	enkoder/braket bağ civata	M3x10 imbus kalite 8/8	3
9	enkoder barketi /redüktör bağ civata	M10x20 imbus kalite: 8/9	2
RULMAN ARA YATAK PARÇA/MALZEME			
10	Rulman ara yatak üst parça	ST 37 çelik	1
11	Rulman ara yatak silindirik parça	ST 37 çelik	1
12	Rulman ara yatak bayrak parça	ST 37 çelik	8
13	Rulman ara yatak alt tabla 500x540x	ST 37 çelik	1
ANA KAİDE GURUBU PARÇA/MALZEME			
14	Ana kaide zemin plaka 1000x600x20	St 37 kalite	1
15	Redüktör braket	St 37 sac	1
16	Şase	60x60x2.5 çelik profil ST 52	6
17	motor altı burç	Sae 1040 40x13x18	4
18	motor muhafaza sacı	ST 37 kalite	1
MOTOR - REDÜKTÖR GRUBU			
19	Elektrik motoru	Volt VM 132S-2	1
20	Redüktör	YILMAZ REDÜKTÖR KT_27_3_0_T00_ML17A_M5	1
21	Enkoder	ATEK ARS S 050	1
22	Slip Ring	ZEN-X3 12	1
23	Slip Ring Motor kaplini	BK 38	1
GÜVENLİK DUVARI / DUMMY PARÇALAR/ASKI MUYLUSU			
24	Balans Askı Mıylusu	Kanat grubunun balansına bakmak için dairese parç	1
25	Dummy ağız yükü kutusu		1
ELEKTRİK PANO/KONTROL CÜ			
26	Sürücü	Delta VFD-055 E23A	1
27	Elektrik pano ve sarf malzeme		1
28	Fren Direnci		1
29	Beckhoff Otomasyon kiti	t 1 kanal analog çıkış terminali 0-10V	1
30	Beckhoff ivme ölçer modülü	2-channel analog input, 16 bit, 50 ksp/s	1
31	İvme Ölçer		1
32	IP Kamera		1
33	Ethernet switch		1

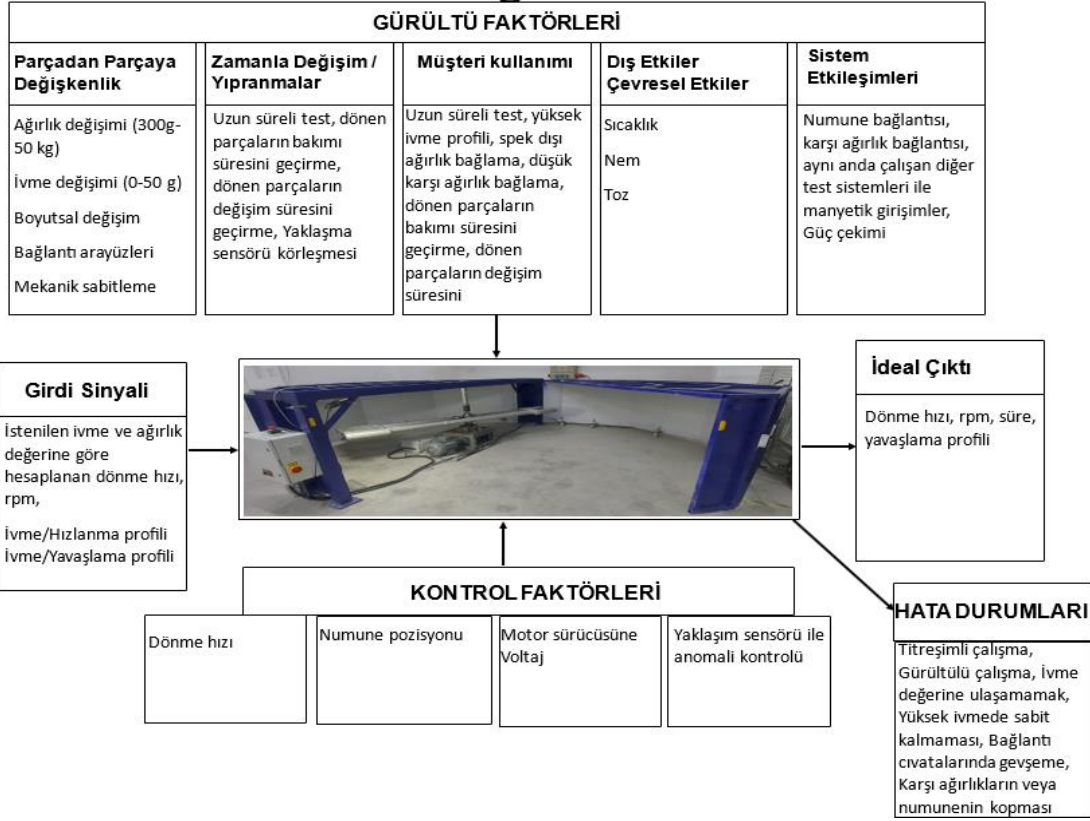
Şekil 6. Ön tasarım sonucu oluşan malzeme listesi

DFSS sürecindeki ikinci aşama kavramsal tasarım ve karakterizasyonunu içerir [5,41]. Müşteri gereksinimlerini ürün/süreç fonksiyonel gereksinimlerine çevirdikten sonra, müşteriyi neyin tatmin edeceği hakkında elde edilen veriler doğrudan tasarım gereksinimleri olarak kullanılamaz. Birinci aşamada yapılan QFD çalışması ile bu dönüşüm tamamlanır. Yeni tasarım konsepti (ürün, hizmet veya süreç) için fonksiyonel gereksinimlerin belirlenmesinden sonra, bu fonksiyonel gereksinimleri karşılayabilecek tasarım parametrelerini karakterize etmemiz (geliştirmemiz) gerekir. Aksiyomatik tasarım ve TRIZ (Yaratıcı Tasarım Yöntemi) yenilikçi tasarımların uygulanmasında sıklıkla başvuru metotlarıdır. Bu çalışmada ürün sektöründe bilinen bir uygulamanın tekrardan gerçekleştirilmesi olduğu için yenilikçi tasarım yöntemlerine ihtiyaç duyulmamıştır. Oluşturulan birkaç tasarım alternatifini değerlendirmemiz ve hangi konseptin kullanılacağına dair nihai bir karar vermemiz gerekir. Tasarım değerlendirmesinde kırılgenlik analizi [5] ve FMEA dahil olmak üzere birçok yöntem kullanılabilir. Bu çalışmada DFMEA, sonlu elemanlar analizleri tasarım araçları olarak kullanılmıştır [27]. Tasarım FMEA'nın amacı, ekibin Altı Sigma kalite seviyesi için tasarım yapmasına yardımcı olmaktır. DFMEA nadiren yapıldığından veya bir formalite olarak görüldüğünden uygulanması bir süreç değişimidir ve tasarımın güvenilirliğini önemli ölçüde artıracaktır.

DFMEA'nın en büyük kaldırıcısı, arıza modlarının proje henüz kâğıt üzerindeyken erken aşamalarında proaktif olarak belirlenmesidir.

Arıza modları, yapıdaki her hiyerarşik varlığın amaçlanan ömrünün sonundan önce nasıl arızalanabileceğini açıklar. Çalışmada p-diyagramından ve QFD den faydalanarak tasarım parametrelerinin (Design Parameter- DP) aksiyom ihlali nedeniyle tasarım zayıflığı, gürültü faktörleri, etkileri ve bunların DP'lerle etkileşimini DFMEA'nın girdisini oluşturmuştur. Detaylı p-diyagram Şekil-7'de verilmektedir. Ayrıca p-diyagramında birimler arası üretim ve montaj zayıflıkları, montaj hataları, malzeme çeşitliliği dikkate alınmıştır. Olası arıza nedenleri, hata ağacı analizi (Failure Tree Analysis-FTA), neden-sonuç diyagramı ve neden-sonuç matrisi gibi araçlarla analiz edilebilir. Her arıza modu, sonuçların ciddiyeti, tespiti ve nedenlerinin ortaya çıkması açısından ele alınmıştır. DFMEA çalışması oldukça detaylı ve uzun bir çalışma olduğundan bu maktelede tamamına yer vermek yerine ana fonksiyonlardaki kritik olabilecek unsurları özetlenmiştir. Özet DFMEA Tablo-6'da verilmiştir. Ekip, RPN numaralarına dayanarak düzeltici eylemlere karar vermek üzere harekete geçerek aksiyonları belirledi. Söz konusu aksiyonlar gerek yapılacak sonlu elemanlar analizlerinde gerekse daha sonradan oluşturulacak tasarım doğrulama planında (Design Verification Plan – DVP) kullanılacaktır.

P-Diagram



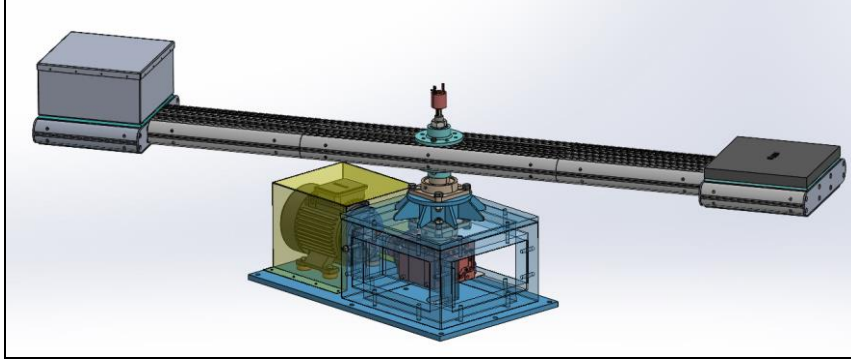
Şekil 7. Santrifüj test sistemi için oluşturulan parametre diyagramı

Tablo 6. Tasarım Hata Modu Etki Analizi

ID	Sistem veya Komponent	Fonksiyon	Potansiyel Hata Modu	Hatanın Olası Etkisi	Sıklık	Nedeni	Olasılık	Mevcut Kontroller	Bulma	RPN	Önerilen Aksiyon	Sıklık	Olasılık	Bulma	RPN
#								Ölçüm							
1	Kanat grubu	Dönerek ivme oluşturma	Kanadın kırılması	Koparak tehlike oluşturma	9	Malzeme mukavemet zayıflığı	2		3	54	Penetrasyon analizi ile kapama sac kalınlığı belirlenmesi	6	2	2	24
2					9	Cıvataların kopması	3	Rakip analizi	4	108	Cıvata kopma analizleri	9	3	2	54
3			Cıvata gevşeme	Titreşimli çalışma	7	Cıvataların gevşemesi	4	Yok	8	224	Kontrol kartlarına uygun cıvata torqlarının girilmesi	7	4	2	56
4			Titreşimli çalışma	Erken ayırmalar	8	Doğal frekans etkisi	5	FE analizleri	2	80	Yaklaşma sensörü ile anomali kontrolü	8	4	1	32
5	Rulma - Ara yatak - Mil grubu	Motorun gelen torkun kanada iletilmesi	Yıpranma	Titreşimli çalışma	7	Hatalı montaj	4	Tolerans kontrolü	3	84					0
6	Taşıyıcı grup	Kanat ve motoru taşıma, yapsal bütünlük sağlama	Kırılma, çatlak	Koparak tehlike oluşturma	9	Malzeme mukavemet zayıflığı	3	FE analizleri	2	54					0
7	Motor - Redüktör grubu	Kanatlara tork vererek hareket sağlama	Hızlanmama	İvme değerini sağlamama	8	Seçilen motor gücü	4	El hesabı	4	128	CFD analizleri ile güç ihtiyacı belirlenmesi	8	4	2	64
8			Sürekli çalışmama	Testin yapılamaması	8	Seçilen motor kapasitesi	4	El hesabı	4	128	Deney tasarımı ile güç azaltma	8	4	2	64
9	Güvenlik Duvarı	Kopan parçaların tutulması	Delinme	Hayati risk	9	Düşük duvar kalınlığı	4	Tecrübe	5	180	Penetrasyon analizleri ile kalınlık belirlenmesi	9	4	2	72
10	Elektrik panosu ve kontrolcü	Test sırasında stabilite	Yavaş hızlanma	Standartta uyumsuzluk	8	Kontrolcü parametreleri	3	Tecrübe	3	72	Deney tasarımı	8	3	2	48
11			Acil stop	Kopma	9	Kontrolcü parametreleri	3	Özel duruş algoritması eklenmesi	1	27					0

Kavramsal tasarım, bir kol üzerinde orta bölgeden merkezlenip test edilecek ürün bir uca, karşı ağırlığın diğer uca yerleştirilecek şekilde bir yatak etrafında kolun dönmesinden oluşmaktadır. Dönme mekanizması, yanal ve eksenel yükleri karşılamak

amacıyla bilyeli yatak içine sabitlenmiştir. Elektrik motorunda üretilen güç, bir redüktör yardımı ile tahriki 90 derece döndürerek dönen kola aktarmaktadır. Test platformunun genel yapısı Şekil-8'de gösterilmektedir.



Şekil 8. Santrifüj test platformu kavramsal tasarımı

Tasarım olgunlaşma sürecinde QFD çalışması sonucunda önem olarak en yüksek değere sahip olan elektrik motorunun çektiği yük (15.1), maksimum test ivmesi (10.7), sistemin doğal frekansı (10.1), mukavemetin (10.3) birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Öncelikle yataklar ve rulmanlar üstünde fazladan ataletsel yükler oluşturulmaması için dönen kolların ağırlığı ve atalet momenti mümkün olduğunca düşük tutulmalıdır. Belirtilen amaç gerçekleştirilirken yapının modal davranış problemleri ve yüksek hızlarda kanat çırpma gibi yapısal değişkenlikler göstermesi, titreşim, ses ve yatak aşınma problemlerine sebep olacağı için dikkatli değerlendirilmelidir. Maksimum test yükünde kollarda esneme değerinin minimumda tutulması için eğme yüklerine dirençli bir kesit geliştirilmesi gerekmektedir. Test parçası, karşı ağırlık, dönme platformu, motor ve diğer bağlantıların yapısal dayanım açısından kontrolü ve yüksek güvenilirlikte olması, test sırasında oluşabilecek bir sorunda, hayati risklerin ortadan kaldırılması ve sistemin tamamen güvenli olması, test platformunun ve test numunesinin korunmasını birincil öncelik olarak tasarım kriterlerine eklenmesini gerektirmektedir. Özetle bir taraftan hafif bir sistem geliştirilmesi diğer taraftan yapısal birliktelik adına yüksek güvenlik katsayıları oluşturulmalıdır.

Konsept tasarım aşamasında parametre diyagramı ve tasarım FMEA araçları kullanılarak, özellikle ürünle ilgili bazı riskler ortadan kaldırılarak optimizasyon aşamasında odaklanılacak ürün fonksiyonları belirlendi. Tasarım risklerine alternatif çözümler geliştirilerek risklerin hangi oranda iyileştirildiği, sayısal değerler ile belirlendi. Ön plana çıkan sekiz farklı tasarımsal risk faktöründe %50 civarında iyileşmeler sağlandı ve bazı güvenlik riskleri ilave tasarım çözümleri ile ortadan kaldırıldı.

6. OPTİMİZASYON AŞAMASI

Genellikle klasik ürün geliştirme süreçlerinde iyileştirme çalışmaları deterministik yaklaşımlarla

gerçekleştirilir. Örneğin, yapısal dayanım çalışmasında ürünü etkileyen boyutsal veya malzeme özellikleri belirli değerlerin altında kalacak şekilde tasarım kontrolleri yapılır. Maksimum yükte gerilme değerinin belli bir güvenlik faktörü ile malzeme akma değerinin altında kalması veya uzun yapısal ömür için kopma değerinin %50 sinin altında kalması gibi. DFSS de hedeflenen optimizasyon çalışması bir veya birçok fonksiyon için o fonksiyonlara etki eden tüm tasarım parametrelerinin bulunmasını ve optimize edilmesini içerir. Bu ancak istatistikî analiz yöntemleri ile yapılabilir. Klasik ürün geliştirme prosesinde santrifüj test sistemi sadece yapısal dayanım açısından ele alınmış ve geometri ve kullanılan malzemeler açısından birkaç iterasyonla sonuca gidilmesi hedeflenmiştir. Oysa DFSS de uygulanan DOE ve Taguchi araçları ile hem testler sırasında harcanan enerji minimize edilmiş, aynı zamanda maliyete doğrudan etki eden motor büyüklüğü, slip ring, yataklar, rulmanların tasarımları yönlendirilmiştir. Bölüm 6.2’de uygulanan DOE ve Taguchi sağlam parametre tasarımı detayları ile verilmektedir.

6.1. Yapısal analizler

QFD analizinde önem derecesine göre ele alınması gereken ikinci seviyedeki teknik özellikler doğal frekans, yapısal güvenlik faktörü ve numune ağırlığı, boyutsal ve yapısal tasarımın birer çıktısı olduğu ve birbirleri ile yüksek korelasyona sahip olduklarından aynı anda çalışılması gereken, birbirlerini doğrudan etkileyen teknik özelliklerdir. Bu özellikler çalışılırken gerçekleştirilmesi diğerlerine göre daha zor olan doğal frekans değeri (zorluk seviyesi 8) hedeflenerek diğer iki teknik özellik elde edilen seviyeye göre kontrol edilerek tasarımın olgunlaştırılması sağlanmıştır.

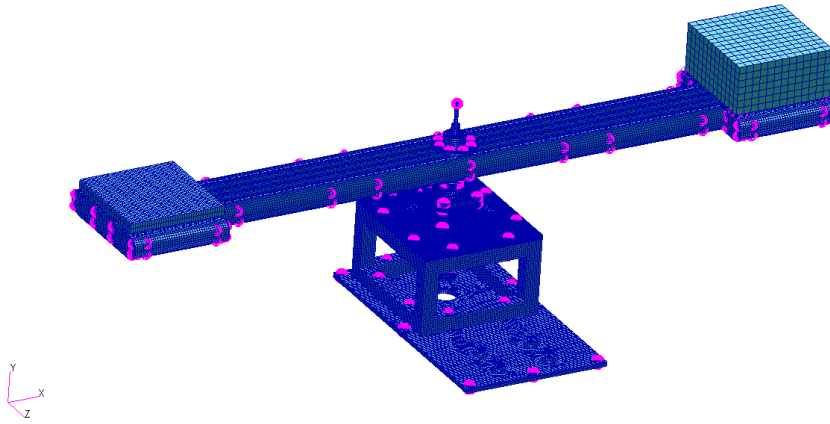
Statik dayanım analizleri ve modal analizler, genel amaçlı ileri seviye bir sonlu eleman çözücüsü olan MSC Nastran yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil-9). Analizlerin uygulama esasları ve sonlu eleman modelleme detayları N.

Kılıç ve diğ. tarafından sunulan bildiride detaylı olarak verilmiştir [42]. Statik ivme test düzeneği yapısı çelik ve alüminyum malzemelerden imal edilmiş ana parçaların ve hazır ek parçaların civata bağlantıları veya kaynak ile birleştirilmesi ile oluşan bir yapıdır. Analiz modeline yönelik sonlu eleman ağı oluşturulması öncesinde sağlıklı ve pratik süreler içerisinde çözülebilir bir analiz modeli elde edebilmek adına geometri üzerinde basitleştirme ve sadeleştirme işlemleri yapılmış, sonuçlara etkisi minimal olacağı öngörülen parçalar modelden tamamen kaldırılmış ya da noktasal kütle olarak modele eklenmiştir.

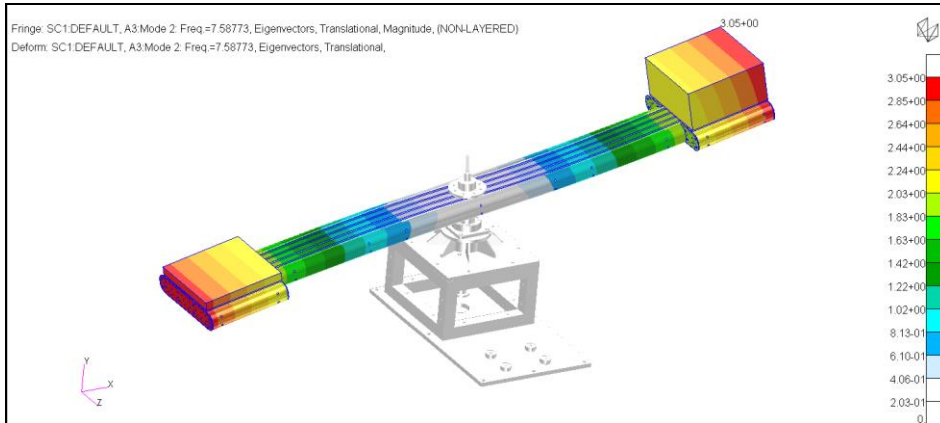
Yapının 200 rpm açısal hızda ve 10 g ivme yükü altında davranışı incelenmiştir. Statik analizlerde iki adet senaryo sonucu incelenmiştir. Birinci senaryoda iki adet 50 kg kütle eklenmiş, ikinci senaryoda test kütlesinin fikstürden çıktığı durumdaki sonuçlar incelenmiştir. Yapının yere sabitlenen noktalarına ayrı ayrı RBE2 tipi bağlayıcı eleman tanımlanmış, RBE2 elemanlarının merkez düğüm noktalarına bütün yönlerinde sınır koşulu tanımlanması yapılmıştır. İlgili sınır koşulları altında gerçekleştirilen modal analizler sonucunda yapının

ilk doğal frekansı hesaplanmıştır. Yapının düşey yöndeki ilk eğme modu 7.6 Hz'de oluşmaktadır. Sistemin en çok 200 rpm'de (3.3Hz) çalıştırılacağı dikkate alındığında, yapının ilk modunun çalışma aralığının üstünde olduğu görülmektedir. Özetle çalışma sırasında dönen parçaların tahrikinden oluşacak bir rezonans riski görülmemiştir.

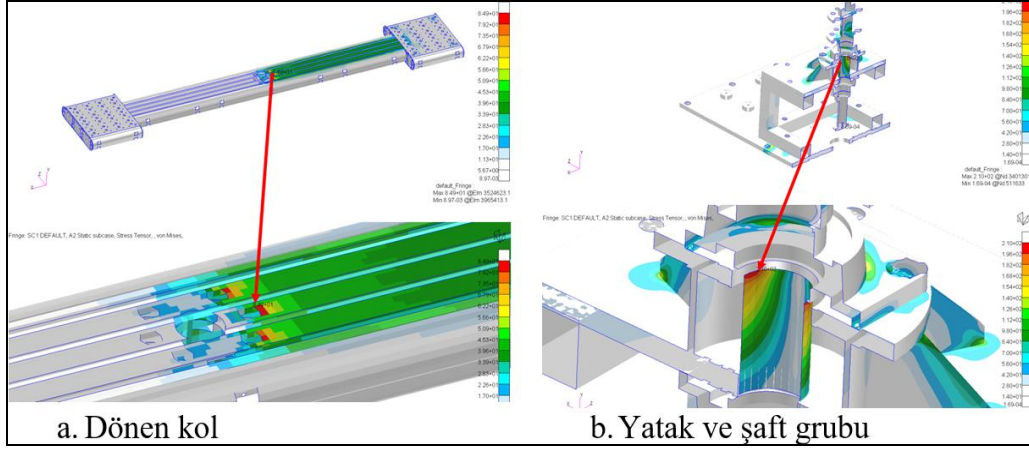
Mukavemet açısından değerlendirildiğinde minör iyileştirmeler sonrasında seçilen malzemelerin akma değerlerine göre 1.5 emniyet katsayısına ulaşılmıştır. Alüminyum parçalar için akma mukavemeti 145 MPa, çelik parçalar için 350 MPa kabul edilmiştir. Alüminyum parçalar için maksimum 85 MPa, çelik parçalarda ise maksimum 210 MPa gerilme değeri hesaplanmıştır. Şekil-10'da yapısal analiz sonuçları kol ve yataklar için gösterilmektedir. Şekilde gerilmeler eşdeğer Von Mises cinsinden MPa olarak verilmiştir. 50 kg test kütlesi ile 200 rpm açısal hızda ve 1 g düşey ivme durumunda düzeneğin uçlarında 13.5 mm'lik deplasman oluşmakta olup güvenli seviyededir (Şekil-11).



Şekil 9. Yapısal analiz sonlu elemanlar çözüm ağı modeli



Şekil 10. Modal analiz sonucu bulunan ilk eğilme modu- deplasman değerleri normalize edildi[30]



Şekil 11. Yapısal analiz sonuçları [30]

Yapısal açıdan klasik deterministik ürün geliştirme süreciyle DFSS arasında belirgin bir fark görülememektedir. DFSS araçlarının kullanılmasının sadece önceliklendirme ve teknik isterler belirleme açısından bir katkısı olduğu fakat FEA analizlerinin gerekliliği ve sonuçları açısından fark yaratmadığı açıktır.

6.2. HAD ve Taguchi sağlam parametre tasarımı

Proje başında yapılan mühendislik hesapları, ivme, test kütlesi, yataklardaki sürtünme kayıpları ve akış kaynaklı dirençleri hesaba katarak 1.5 güvenlik katsayısıyla sistemi döndüren elektrik motorunun 7 kW'lık bir güce ihtiyacı olduğunu belirlemiştir. Ürün ile ilgili maliyet hesaplarında motor ve rulmanlı yataklar bu bilgi doğrultusunda seçildi. Oysa QFD çalışması bize, işletme maliyetlerinin müşteri açısından önemli bir karar aracı olduğunu göstermektedir. Bu aşamada işletme maliyetleri olarak öncelikle, test sırasında sistemin çekmekte olduğu enerji değerlendirilmiştir. Dönen sistemin ve tüm parçaların güvenlik sebebiyle bir yapı içerisinde yer alması gerekmektedir. Bu yapının şekli ve detayları, çekilen enerjiyi doğrudan etkilemektedir. En iyi ve kötü çözüm arasında üç kata varan oranlarda enerji ihtiyacı oluşmaktadır. Bu sebeple en düşük enerji harcamasını sağlamak amacıyla, kapalı muhafaza geometrisi, üst kapağın yapısı, yükseklik, bariyer çapı ve yapının tabanla olan boşluk miktarını değişken olarak tanımlandığı bir deney tasarımı yapılmıştır. Ortogonal L18 deney tasarımı matrisinde, bariyer çapı iki seviye, diğer parametreler üç seviye olarak modellenmiştir [43-44]. Deneyler parametreleri Tablo-7'de verilmiştir.

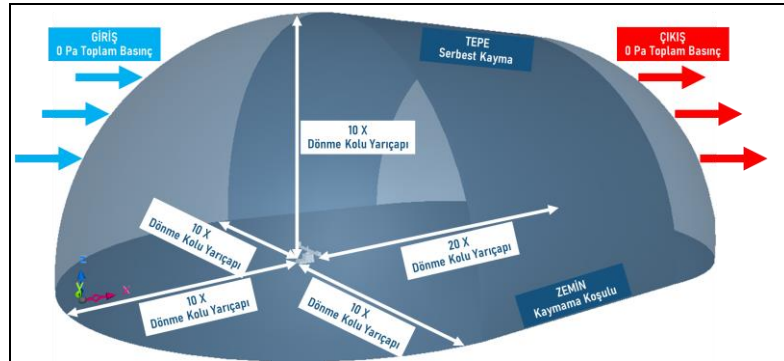
Deneyler, kurgulanan geometrileri kullanarak oluşturulan HAD analizleri olarak gerçekleştirilmiştir. HAD çalışmaları, öncelikle test

platformunun çevresinin açık olduğu ortamda hedef dönme hızlarını sağlamak için gerekli olan shaft gücü değerinin hesaplanması ile başlatılmıştır. Hesaplama hacmi boyutu, her ekseninde dönme kolunun 10 katı olarak alınmıştır (Şekil-12). Analiz için oluşturulan çözüm ağı, 7,2 milyon elemandan oluşmaktadır (Şekil-13). Analizler test ağırlığı olması ve olmaması durumu için tekrarlanmıştır. Analiz yaklaşık 4000 çevrim sonunda 10^{-5} seviyesinde bir yakınsamaya ulaşmaktadır. Yüksüz durumda (test numunesi ve karşı ağırlık olmadığı durumda) sistemi 190 rpm'lerde döndürmek için gerekli güç değeri yaklaşık 398 W olarak hesaplanmıştır. 50 kg'lık test numunesi ile birlikte gereken güç 2686 W'a çıkmaktadır. Kol üstündeki basınç değişiminin 474 Pa değerine kadar çıktığı bulunmuştur.

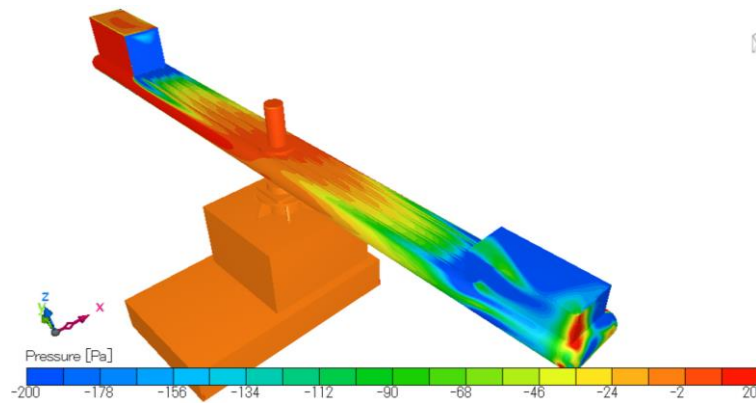
Deney tasarımında Tablo-7 de verilen L18 ortogonal matrisi kullanılarak sistemin çektiği güç değerleri toplanmıştır. Toplanan veriler Minitab yazılımı ile analiz edilmiştir [38]. Gerçekleştirilen Taguchi analizi sonucunda S/N değerlerinin minimum olması için gerekli parametreler belirlenmiştir. İlk aşamada “BariyerYüksekliği*TabanBoşluğu, BariyerYüksekliği*Üst kapama, BariyerYüksekliği*Geometri, Taban Boşluğu*Üst kapama, Taban Boşluğu*Geometri, Üst kapama*Geometri” etkileşimleri istatistiki olarak anlamsız çıktığı için değerlendirme dışı bırakılmıştır. Çekilen enerjinin minimum olması durumunda “Bariyer çapının 3.4 m, bariyer yüksekliğini 1.2 m, taban boşluğunun olmadığı, üst kapamanın olduğu ve geometrinin ongen olduğu seçeneğin en düşük güç ihtiyacı doğuracağı görülmüştür. Belirtilen değişkenlerin etkisi Şekil-14’da verilmektedir.

Tablo 7. Deney tasarımı ve tasarım parametreleri

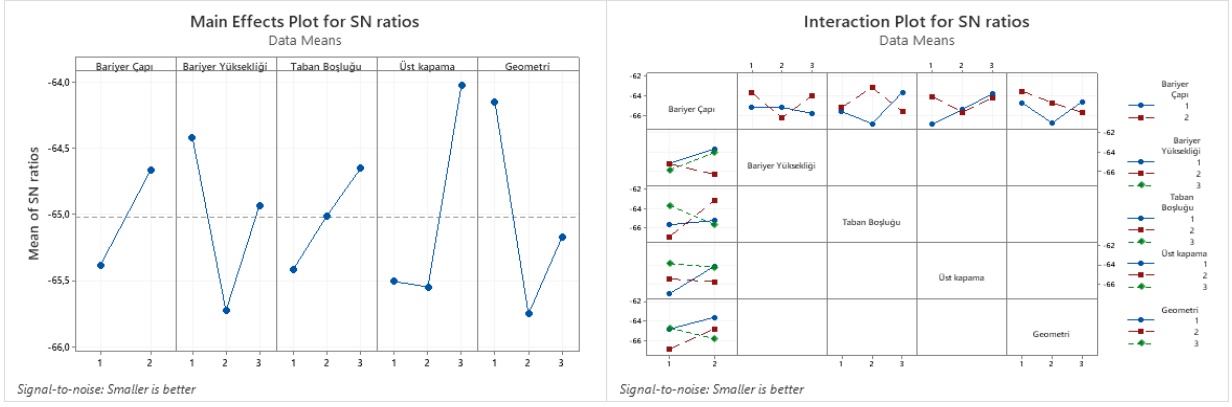
Geometri	Bariyer Çapı, m	Bariyer Yüksekliği, m	Üst Kapama	Taban Boşluğu, mm	Şaft Gücü- W
Sekizgen	3.4	1.2	Yok	0	1512
Dairesel	3.4	1.2	Tel Örgü	50	2217
Ongen	3.4	1.2	Kapalı	100	1090
Dairesel	3.4	1.5	Yok	0	1999
Ongen	3.4	1.5	Tel Örgü	50	2040
Sekizgen	3.4	1.5	Kapalı	100	1470
Sekizgen	3.4	2	Tel Örgü	0	2217
Dairesel	3.4	2	Kapalı	50	1430
Ongen	3.4	2	Yok	100	1200
Ongen	4	1.2	Kapalı	0	1080
Sekizgen	4	1.2	Yok	50	2061
Dairesel	4	1.2	Tel Örgü	100	2321
Ongen	4	1.5	Tel Örgü	0	1650
Sekizgen	4	1.5	Kapalı	50	1760
Dairesel	4	1.5	Yok	100	2275
Dairesel	4	2	Kapalı	0	1350
Ongen	4	2	Yok	50	1190
Sekizgen	4	2	Tel Örgü	100	1850



Şekil 12. Hesaplama hacmi gösterimi [30]



Şekil 13. HAD Analizi – 190 rpm dönme hızında açık ortamda basınç dağılımı



Şekil 14. Taguchi analizi ana parametrelerin etkileri ve birbirleri ile etkileşimleri

Yapılan HAD analizlerinde, yukarıda belirtilen çözümün 1020 W güç çektiği hesaplanmıştır. Değer, QFD çalışmasında en yüksek önem derecesine sahip teknik özellik için hedeflenen değere (1000 W) oldukça yakındır.

Klasik ürün geliştirme sürecinde test sırasında çekilen güç miktarının ürüne katkısı ihmal edilmiştir. Oysa QFD çalışması, ürünün kullanıcısı olan test merkezleri açısından bu faktörün en önemli faydayı sağladığı görülmektedir. Normal bir mühendislik yaklaşımı ile kanat formunun en büyük etkiyi oluşturacağı düşünülür. Oysa doğru kurgulanan bir deney tasarımı sonucunda bariyer çapı, bariyerlerin yerden yüksekliği, taban boşluğu ve geometrinin de çekilen güce önemli bir katkı yaptığı görülmektedir. Aynı güvelik katsayısı kullanılması durumunda bile elektrik motor gücünde %80'lik bir azalma olmaktadır. Bu hem ilk yatırım maliyetinde belirgin bir iyileşme sağlamak hem de işletme maliyetlerini azaltmaktadır.

6.3. Güvenlik Analizleri

QFD çalışmasında, test sisteminin etrafında oluşturulan kapalı hacmin, enerji verimliliği

açısından önemli bir katkısının olmasının yanında birincil fonksiyonu kaza durumlarında insan sağlığını garanti altına alan güvenli bir bölge oluşturmaktır. Burada en kritik durum, test kütlesi veya karşı ağırlığın kopup, koruma duvarını aşması durumudur. Güvenlik çalışmasının amacı, toplamda 50 kg ağırlığa sahip karşı ağırlıkların 1.25 m dönme yarıçapında ve yaklaşık 200 rpm hızla dönerek bir bariyere çarpması sonucu oluşacak hasarın boyutunu belirlemektir. Bu analiz, bariyerin dayanıklılığını değerlendirmek ve elde edilen sonuçlara göre gerekli önlemleri almayı hedeflemektedir. Penetrasyon analizleri, gerek malzemenin lineer olmayan karakteristik özellikleri, gerekse yüksek gerinim hızlarında oluşan yırtılmanın modellenmesi açısından oldukça ileri seviye sonlu elemanlar analizleri olarak değerlendirilmektedir. LS-DYNA, penetrasyon analizlerinde kullanılan ve malzemenin doğrusal olmayan karakteristik özelliklerinin tanımlanabildiği bir yazılımdır. Çalışmada ilk aşamada mevcut durum incelenmiş ve elde edilen veriler doğrultusunda iyileştirmeler yapılarak yapı güvenli hale getirilmiştir. Kullanılan metodoloji Şekil-15'de verilen aşamalardan oluşmaktadır.



Şekil 15. Penetrasyon analizleri metodolojisi

Sonlu elemanlar çözüm ağı oluşturmada iki farklı malzeme modeli kullanılmıştır. Yapının ana taşıyıcı ve mukavemet unsuru olan dik profiller için plastik deformasyon sebebiyle pekleşmeyi hesaplamalara dahil edecek şekilde Johnson-Cook malzeme modelinin basitleştirilmiş bir versiyonu kullanılmıştır [45]. Bu modelde gerinim hızı ve sıcaklık etkilerini modelin dışında bırakılarak, sadece akma ve gerinim sertleştirilmesine bağlı parametreler kullanılmıştır. Malzeme modeli test ile elde edilen sonuçları sağlayacak şekilde eğri uydurma yöntemi ile oluşturularak, A , B ve n malzeme sabitleri elde edilmiştir. LS-DYNA yazılımında MAT_098_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK malzeme kartı, belirtilen gereksinimleri karşılamaktadır ve basitlik, etkinlik ve geniş uygulanabilirlik gibi avantajları nedeniyle tercih edilir. Bu kart, malzeme davranışını tanımlamak için sınırlı sayıda parametre kullanır ve özellikle plastik deformasyon davranışını, yüksek hızlı ve yüksek sıcaklık koşullarında iyi yansıtır. Ayrıca, LS-DYNA gibi popüler simülasyon yazılımlarıyla entegre çalışabilir, bu da endüstriyel ve akademik uygulamalarda geniş bir kullanımı destekler. Bu nedenlerle, MAT_098_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK malzeme kartı, malzeme davranışının etkili bir şekilde modellenmesi için yaygın olarak tercih edilir.

$$\sigma_y = A + B \times \varepsilon_p^n \quad (7)$$

σ_y : Akma gerilmesi

ε_p : Efektif plastik gerinim

A , B , n : Malzeme sabitleri

Profillerin arasındaki sacların modellenmesi, LS-DYNA simülasyon yazılımı üzerinden MAT_024_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY malzeme kartı kullanılarak yapılmıştır. Karşı ağırlıklarda ise, MAT_098_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK malzeme kartı tercih edilmiştir. Tüm yapılar için kullanılan malzeme modelleri ve parametreler Tablo-8'de verilmiştir.

Sınır koşullarını belirlemeden önce, 50 kg'lık karşı ağırlıklar, LS-DYNA üzerinden 6 serbestlik derecesinde serbest olarak modellenmiştir. Söz konusu ağırlıklar, 1.25 metrelik bir yarıçapta dönerek sistemi terk ederken iki farklı senaryo üzerinde durulmuştur. Bu senaryolarda özellikle, bariyer duvarının giriş tarafından desteklenmeyen kısımlarında gerçekleşebilecek çarpışma durumları incelenmiştir. Bu modelleme süreci, parçanın hareketi ve çarpma etkisinin detaylı bir şekilde analiz etmeyi hedeflemektedir. Çarpışma noktasının belirlenmesi ve oluşturulan karşı ağırlıkların konumlandırılmasının ardından yaklaşık olarak 200

rpm'lik dönme hızı ve dönme yarıçapı dikkate alınarak 25.8 m/s'lik bir çizgisel hız INITIAL_VELOCITY_GENERATION kartı kullanılarak her ağırlık için tanımlanmıştır. Hız tanımlaması yapılırken cisim üzerinde bir koordinat eksenini oluşturulmuş ve söz konusu karttaki hız değeri x ekseninde tanımlanmıştır. 50 kg ağırlığındaki karşı ağırlıkların bariyerle muhtemel temasını belirlemek için AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE kontak kartı algoritması kullanılmıştır. Ağırlıklar ile bariyer arasındaki temas için statik sürtünme katsayısı 0.3, dinamik sürtünme katsayısı ise 0.2 olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, bariyerin kendi içindeki teması için AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE kontak kartı kullanılmıştır. Üretim ve maliyet açısından ilk aşamada uygun görülen kalınlıklarla yapılan analizlerde karşı ağırlıklar duvarlarda yırtılmalara sebep vermiştir.

Söz konusu yırtılmalar sonucunda, karşı ağırlıklar kapama duvarını geçememiş olmakla birlikte daha sistemin güvenli hale getirilmesi amacıyla tasarım ekibi tarafından optimizasyon çalışmasının devam edilmesine ve yırtılma olmayacak kalınlıkların belirlenmesine ve uygulanmasına karar verilmiştir (Şekil-16). Yapılan iterasyonlar sonucunda duvarlarda yırtılma olmayacak şekilde tasarım güncellenmiştir.

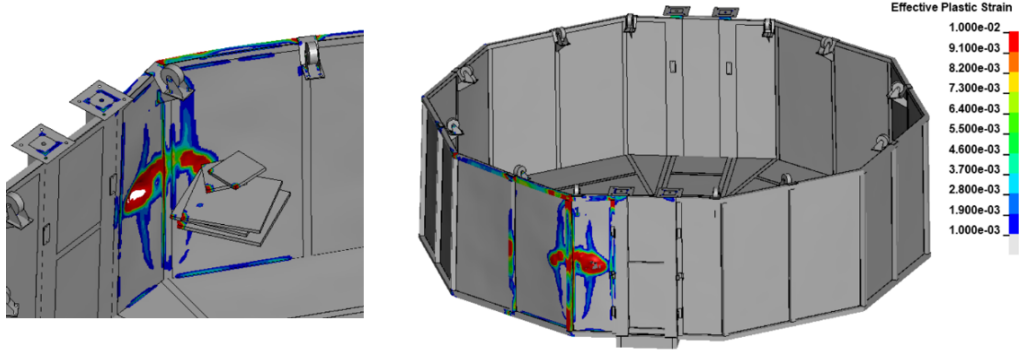
7. DOĞRULAMA AŞAMASI

Tasarım FMEA, kavramsal tasarım ve detay aşamaları sonucunda oluşturulan tasarım doğrulama planı aşağıda özetlenmektedir. Doğrulama planının oluşturulmasında ilk aşama QFD ve kalite evi çalışması olmuştur. Belirlenen teknik isterler önem sırasına göre ele alınıp, hedef değerler rakip analizleri ile belirlenmiştir. Aynı zamanda kavramsal tasarım aşamasında yapılan tasarım FMEA analizi ile risk oluşturan tasarım faktörlerinin değerlendirilmesi yapılmış ve riski azaltacak aksiyonlar oluşturularak, kavramsal tasarım ve detay tasarım çalışmaları bu faktörler ışığında ilerletilmiştir.

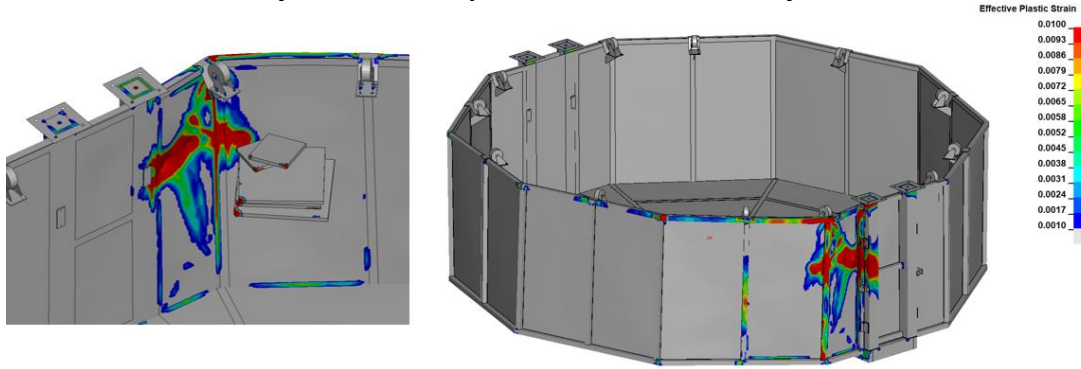
Doğrulama aşamasında santrifüj test sisteminin fonksiyonel çalışması, istenilen doğal frekans değerlerinin sağlanması ve güç ihtiyacının belirlenmesi önemli doğrulama adımları olarak görülmektedir. Bu özellikler fiziksel testler ile doğrulanmıştır. Modal test için kolun her iki tarafına 50 kg'lık test plakaları bağlandıktan sonra bir tarafa Dytran 3233A, ICP tip, 5 g, 3 eksenli bir ivme ölçer bağlanmıştır. Yapılan çekici ile tahrik sonucunda sistemde oluşan ivme değerleri IMC veri toplama sistemi ile toplanıp, analiz edilmiştir. Yapının düşey ekseninde ilk modu 9.3 Hz de görülmüştür. Şekil-18'de modal test sonuçları görülmektedir.

Tablo 8. Kullanılan malzeme model parametreleri

Profiller			Ağırlık		Kapama Sacları		
RO	Yoğunluk	7.85E-09	7.35E-09		RO	Yoğunluk	7.85E-09
E	Elastisite Modülü	2.00E+05	2.10E+05		E	Elastisite Modülü	2.12E+05
PR	Poisson Oranı	0.30	0.30		PR	Poisson Oranı	0.29
VP	Oran Etkilerinin Formülasyonu	1.00	1.00		SIGY	Akma Gerilmesi	265.00
A	Giriş Sabiti	448.00	255.98		ETAN	Tanjant Modülü	662.86
B	Giriş Sabiti	782.00	162.58		FAIL	Başarısızlık Bayrağı	0.22
N	Giriş Sabiti	0.562	0.257				
C	Giriş Sabiti	0.0247	0.0220				
PSFAIL	Başarısızlık Anında Elastik Plastik Gerinim	0.22	0.22				



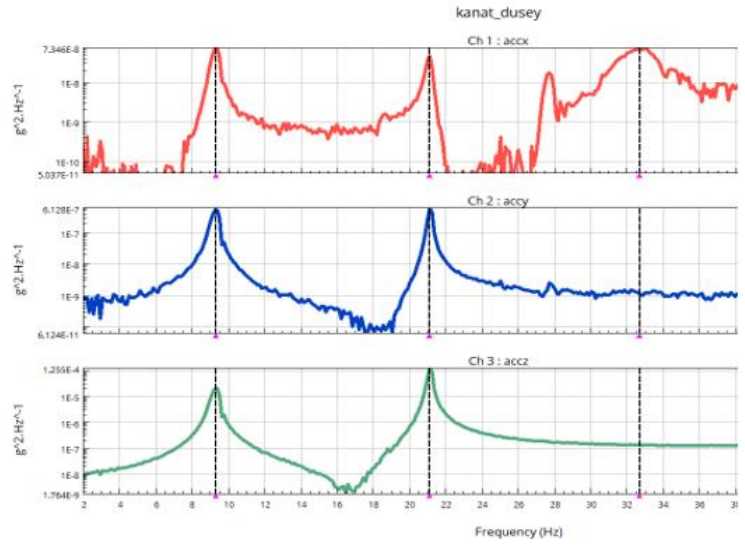
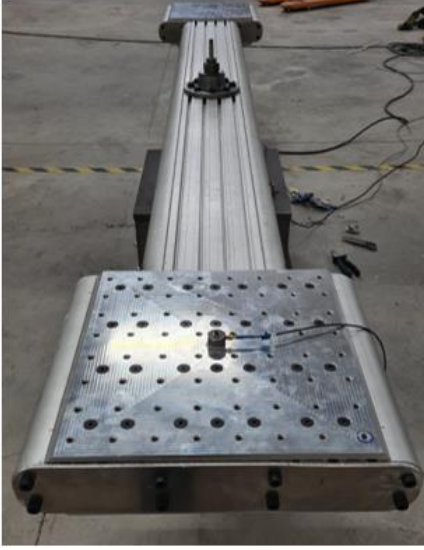
Şekil 16. Penetrasyon analizleri ilk tasarım sonuçları



Şekil 17. Penetrasyon analizleri iyileştirilmiş tasarım sonuçları

Tablo 9. Tasarım doğrulama planı

Teknik özellik tanımı	Hedef Değer	Test Yöntemi
Harcanan güç	1000 W	Fonksiyonel Test 50 kg kütle, 50 g ivme ve 200 rpm de motorun çektiği gücün ölçülmesi, 1100 W
Güvenlik Çemberi	Yırtılmayacak	Penetrasyon analizleri
İvme Değeri	50 g	Fonksiyonel Test 50 kg kütle ile 200 rpm çıkma
Mukavemet	Güvenlik faktörü 1.5	FE Analizleri
Sistemin Doğal Frekansı	7.5 Hz	Modal test sonuçları, ölçülen değer 9.3 Hz
Test Numunesi Ağırlığı	50 kg	Fonksiyonel Test 50 kg kütle ile 200 rpm çıkma
Maks. İvmeye Çıkma Süresi	5 dakika	Fonksiyonel Test 50 kg kütle ile 200 rpm çıkma 4.5 dakika
Ses seviyesi	60 dbA	
Anomali Tespit Sistemi	İvme ölçer kullanımı	Yaklaşım sensörü eklendi
Maks. İvmede Çalışma Süresi	60 dakika	Fonksiyonel Test 50 kg kütle ile 200 rpm çıkma 60 dakika çalışma
Test Numune Boyutları	200x200x200	Yerinde muayene



Şekil 18. Modal test sonuçları, kanat düşey eksenindeki veriler

Diğer fonksiyonel testler sistemi 200 rpm dönme hızında çalıştırarak gerçekleştirilmiş ve toplanan veriler Tablo-6'da özetlenmiştir.

8. DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Santrifüj statik ivme test düzenekleri savunma, havacılık ve uzay sistemlerinde sıklıkla kullanılan elektronik kutuların maruz kaldıkları yüksek yapısal ivmeler altında fonksiyonel ve dayanım açısından kabul ve doğrulama çalışmaları için önemli bir ihtiyacı karşılamaktadır. Bu sistemlerin hem ürün hasarları hem de kullanıcı personel açısından yüksek güvenilirlik kriterlerine sahip olması gerekmektedir. Bunu gerçekleştirirken sisteme dahil edilen koruyucu yapıların sistem performansını hangi yönde etkileyeceği önemli bir bilgi olmaktadır. Test sistemleri düşük adetlerde ve özel ihtiyaca yönelik sistemler oldukları için, DFSS metodu ile ilk seferde doğru tasarım yaklaşımının kullanılması, ortaya çıkacak yüksek düzeltme ve iyileştirme maliyetleri, zaman kayıpları ve fonksiyonel isterlerin sağlanamamasının önüne geçeceği için dikkatlice uygulanmalıdır. Bu çalışmada ileri seviye ürün tasarımlarında uygulanan DFSS metodunun öne çıkan araçları olan QFD, DFMEA, DOE, Taguchi sağlam parametre tasarımı ve ileri mühendislik çözümleri kullanılarak hızlı ve etkin bir test sistemi tasarlanmıştır.

Proje başında klasik ürün geliştirme süreci uygulanacağı düşünülerek, 23,200 € personel maliyeti öngörülmüştü. DFSS sürecinde özellikle CFD analizleri ve optimizasyon çalışmaları sebebiyle mühendislik iş gücü harcaması 27,240 € olarak gerçekleşti. %18'lik bir artış oluştu. Ürün maliyetini oluşturan satın almalar 10,500 € olarak öngörüldü fakat optimizasyon çalışmaları sonucunda 9,790 €

olarak gerçekleşti. Aslında güvenlik açısından yapılan kapamanın oluşturduğu işçilik dahil 3,000 €'luk harcamayı dahil etmezsek, DFSS ile üründe %50 seviyesinde bir maliyet azaltma gerçekleşmiştir. Toplam proje maliyeti, revizyonların minimize edilmesi ve maliyet azaltma aksiyonları doğrultusunda 37,700 € olarak gerçekleşmiştir. Oluşan toplam maliyet kazancı %21 olmuştur. İlave mühendislik analizleri revizyon sürelerini ortadan kaldırdığı için toplam proje takviminde bir değişiklik olmamıştır.

Bu çalışmada özellikle geleneksel tasarım sürecinde prototip ürün üzerinde gerçekleştirilen iyileştirme çalışmaları, ileri mühendislik yazılımları ile sanal ortamda incelenmiş olup, projenin erken aşamalarında tekno-ekonomik sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan maliyete etkiyen tasarım değişiklikleri ile test için gerekli elektrik motoru kapasitesi, rulmanlar, şaft boyutları ve kullanılacak enerji miktarı belirgin seviyede azaltılarak verimli bir test altyapısı elde edilmiştir. Alınan aksiyonlar tasarımlara uygulandıktan sonra sistemin üretimi tamamlanarak kullanıma sunulmuştur. Yapılan doğrulama testleri sırasında herhangi bir revizyona ihtiyaç duyulmamış dolayısıyla süreçte kullanılan tasarım yöntemlerinin etkinliği, ilk seferde doğru ürün hedefinin sağlandığı gösterilmiştir.

CENTRIFUGAL STATIC ACCELERATION TESTER DEVELOPMENT WITH DFSS METHOD

The centrifugal static acceleration test systems are crucial for testing high acceleration levels due to operational loads in aviation, space and defense platforms. In this study, development steps were achieved using the design for six sigma method. In the first stage, customer requirements were transformed into technical requirements with the

Quality Function Deployment performed. In the second stage, with the design failure mode and effect analysis and conceptual design studies, the potential design vulnerabilities were identified and solutions developed. In the following step, orthogonal experimental design and Computational Fluid Dynamics simulations were performed for the safe and stable operation of the test platform and the reduction of the power requirement that will occur during the tests. Throughout the study, the right design at the first time was aimed by using design for six sigma tools such as quality function deployment, design of experiments, Taguchi robust parameter design, p-Diagram and design failure mode and effect analysis. In the light of the generated data, the detailed design of the test platform was completed. With the validation studies, the static acceleration test system was implemented. The effectiveness of the DFSS was compared to the classical Stage-Gate method by investigating the project performance parameters.

Keywords: DFSS, Stage-Gate method, QFD, Design FMEA, Design of experiment, Taguchi robust design parameters, Centrifugal acceleration tester

KAYNAKLAR

- Cooper, R.G., Stage-Gate Systems: A New Tool for Managing New Products. *Business Horizons*. (1990)
- Cooper, R.G., Winning with new products: Doing it right. *Ivey business journal*, 64 (2000) 6: 54-60.
- Dzulinski, A.C., Braghini Junior, A., Chiroli D.M.G., Design for Six Sigma: A Review of the Definitions, Objectives, Activities, and Tools *Engineering Management Journal* 35(2023) 2 :161-180.
- Bhat S., Antony J., Gijo E.V., Koul R, Cudney E A., Chakraborty A., A study on critical failure factors of Design for Six Sigma in Indian companies: results from a pilot survey. *TQM Journal* 35(2023) 4:1072-1093. <https://doi.org/10.1108/TQM-03-2022-0103>
- Yang, K., El-Haik, B. "Chapter 3- Design for Six Sigma" in *Design for Six Sigma:A Roadmap for Product Development*, McGraw-Hill, New York, 2003
- Aşçı, M.G., *Tasarımda Altı Sigma Araçları ve Sanayide Bir Uygulaması*, M.S. thesis, Uludağ Üniversitesi, 2017
- Sheikh, M., Rafique, S.M., The Use of Design for Six Sigma (DFSS) Methodology in Product Design, *Proceedings of the World Congress on Engineering* Vol I, London, U.K, 2013
- Mishra, N., Rane, S.B., Prediction and improvement of iron casting quality through analytics and Six Sigma approach. *Int J Lean Six Sigma* 10(2019) 189–210. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-11-2017-0122>
- Birgören, B., *İstatistiksel Kalite Kontrolü* (Cilt 3). Nobel Yayınları, 2020
- Su F.M., Su C.T., TFT-LCD Contrast Ratio Improvement by Using Design for Six Sigma Disciplines *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 33(2020) 1.
- Rafiee V., Faiz, J., Robust Design of an Outer Rotor Permanent Magnet Motor Through Six-Sigma Methodology Using Response Surface Surrogate Model *IEEE Transactions on Magnetics*, 55(2019) 10
- Nada, O.A., Elamy, M., Salman, M.M., Khader, K.M., Deabs A.A., Using design for six sigma to develop an innovative porous tibial implant and assessing the proposed design using finite element. *Results in Engineering*, 27 (2025) [doi/10.1016/j.rineng.2025.106646](https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106646)
- Rane, S.B., Bidikar, S.G., Potdar, P.R., Reliability improvement of moulded case circuit breaker using Design for Six Sigma. *International Journal of Quality & Reliability Management* 42 (2025) 7: 2085-2120. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-07-2024-0215>
- Su, C.T., Su, F.M., Yield improvement in color filter manufacturing using Taguchi methods and TRIZ's substance-field analysis, *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.*, 8(2018) 12:2198–2212
- Francisco, M. G., Junior, O. C., & Sant'Anna, A. M. O. (2020). Design for Six Sigma integrated product development reference model through systematic review. *International Journal of Lean Six Sigma*, 11(4), 767–795. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-05-2019-0052>
- Shojaie, A. A., Kahedi, E. Auto parts manufacturing quality assessment using design for six sigma (DFSS), case study in ISACO company. *International Journal of System Assurance Engineering and Management* (2019)
- Jain, I., Boxless bus bar system for distribution boxes: a novel design for efficiency, security, and reliability, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 2024. <https://doi.org/10.1007/s12008-024-01847-6>
- Wang, T.J., Hwang, S.K., Combustion system design of a genset diesel engine by using dfss methodology, *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 20(2019) 3: 539–547. <https://doi.org/10.1007/s12239-019-0051-6>
- Bidikar, S.G., Rane, S.B., Potdar, P.R., Product development using Design for Six

- Sigma approach: case study in switchgear industry. *Int J Syst Assur Eng Manag* 13 (2022)1:203–230.
<https://doi.org/10.1007/s13198-021-01199-4>
20. Francisco, M.G., Canciglieri Junior, O., Marcio, A., Santanna, O., Roadmap for product development based on design for six sigma method *International Journal of Lean Six Sigma* 14(2023) 5:989-1009
<https://doi.org/10.1108/IJLSS-06-2022-0131>
 21. Bashir, H., Ojiako, U., An integrated ISM-MICMAC approach for modelling and analysing dependencies among engineering parameters in the early design phase. *J Eng Des* (2020) 31:461–483
<https://doi.org/10.1080/09544828.2020.1817347>
 22. Erdil, N.O., Arani, O.M., Quality function deployment: more than a design tool, *International Journal of Quality and Service Sciences*, 2018. <https://doi.org/10.1108/IJQSS-02-2018-0008>
 23. Mazlum, Y., *Kalite Fonksiyon Yayilimi (KFY) Yaklaşımı ile Entegratör Bilişim Teknolojisi Şirketlerinde Müşteri Memnuniyetinin Artırılması*, M.S. thesis, Kırıkkale Üniversitesi Endüstri Mühendisliği, 2019.
 24. Akdag, H.C., İmer, H.P., Ergin, K.N., Internal customer satisfaction improvement with QFD technique, *Business Process Management Journal*, 22 (2016) 5:957–968.
 25. Cordeiro, E.C., Barbosa, G.F., Trabasso, L.G., A customized QFD (quality function deployment) applied to management of automation projects, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87 (2016) 5(8):2427–2436.
 26. Fahma, F., Iftadi, I., Putri, N.A., Customer requirement analysis of driver's seat design using Quality Function Deployment (QFD) case study : City Car, *Joint International Conference on Electric Vehicular Technology and Industrial, Mechanical, Electrical and Chemical Engineering* (2015)173–177.
 27. Ford FMEA Handbook, 2003, Version 4.0
 28. Segismundo, A., Cauchick, A., Miguel, P., Failure mode and effects analysis (FMEA) in the context of risk management in new product development: a case study in an automotive company, *Int J Qual Reliab Manag* 25 (2008) 899–912.
<https://doi.org/10.1108/02656710810908061>
 29. Shaker, F., Shahin, A., Jahanyan, S., Developing a two-phase QFD for improving FMEA: an integrative approach, *Int J Qual Reliab Manag* 36 (2019)1454–1474.
<https://doi.org/10.1108/IJQRM-07-2018-0195>
 30. Taguchi, G., Chowdhury, S., Taguchi, S., *Robust Engineering*. McGraw Hill, New York, USA, 2000.
 31. Silva, M.B., Carneiro, L.M., Silva, J.P.A., Oliveira, I.S., Filho, H.J.I., Almeida, C.R.O., An application of the Taguchi method (Robust design) to environmental engineering: Evaluating advanced oxidative processes in polyester-resin wastewater treatment, *American J. Analytical Chemistry* 5 (2014) 13: 828–837.
 32. Gopalsamy, B. M., Mondal, B., Ghosh, S., Taguchi method and ANOVA: An approach for process parameters optimization of hard machining while machining hardened steel, *J. Scientific & Industrial Research* (2009) 68:686–695.
 33. İç, Y.T., Ülke, İ., Çelik, Y., Yurdakul M., Diyaframla Sac Şekillendirme İşleminde 15-5PH Malzeme İçin Sayısal ve Deneysel Tasarım Yöntemleri Kullanılarak Geri Esnemenin İncelenmesi. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi* 22(2024) 2: 93-102
<https://doi.org/10.56193/matim.1543433>
 34. Gürbüz, H., Baday, S., Hamarat, İ., CNC Tel Elektro Erozyon Tezgâhında Tel Elektrot Özelliklerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin Taguchi Yöntemiyle Modellenmesi. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi* 16(2018) 1: 20-29
 35. Moir I., Seabridge, A., Chapter 13- Environmental Conditions in *Aircraft Systems*, John Wiley & Sons, Third Ed. West Sussex, 2008.
 36. Sause, G. R., Jasiuniene, E., Environmental and Operational Influences in *Structural Health Monitoring Damage Detection Systems for Aerospace*, Springer, 2021
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-72192-3>
 37. MIL-STD-810-G Method 513,6 Acceleration, Department of Defense, USA,
 38. Pedrammehr, S., Najdovski, Z., Abdi, H., Nahavandi, S., Design methodology for a hexarot-based centrifugal high-G simulator, *IEEE International Conference on Systems* (2017) Banff, Canada
 39. Alkayis, M.H., Onur, M.I., Laboratory-scale geotechnical centrifuge test system design and consolidation behavior analysis, *Arabian Journal of Geosciences* 15(2022) 995.
<https://doi.org/10.1007/s12517-021-09375-3>
 40. Zhou, Y.G., Sun, Z.B., Chen, Y.M., Zhejiang University benchmark centrifuge test for LEAP-GWU-2015 and liquefaction responses of a sloping ground. *Soil Dyn Earthq Eng* 113 (2018) 698.
 41. Koziol, S., Derlukiewicz, D., Method of assessing the quality of the design process of construction equipment with the use of DFSS

- (design for Six Sigma). *Automation in Construction* 22 (2012) 223–232.
42. Kılıç, N., Demir, R., Osso, C., Özcan, S., Özen, S., İleri Mühendislik Yöntemleri ile Statik İvme Test Düzeneği Tasarımı, 11. Savunma Teknolojileri Kongresi, Ankara, 2024
43. Myers, R.H., Montgomery, D.C., Anderson-Cook, C.M., *Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. John Wiley & Sons, Hoboken, 2009.
44. Minitab User's Guide 2: Data analysis and quality tools. Release 13, State College, 2000.
45. Johnson, G.R., Cook, W.H., A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. In: *Proceedings of the 7th international symposium on ballistics*, Hauge, (1983) 541–547.