Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Cilt 22, Sayı 3, 2017 ARAŞTIRMA

DOI:10.17482/uumfd.322853

KALIP YAYLARI İÇİN YORULMA TEST CİHAZI TASARIMI VE ANALİZİ

Kadir ÇAVDAR *

Tufan Gürkan YILMAZ *

Alınma: 21.06.2017; düzeltme: 06.10.2017; kabul: 15.11.2017

Öz: Metalik yaylar, birçok endüstriyel uygulamada kullanılan makine elemanlarıdır. Genellikle, makine parçalarını aynı konumda tutmak, darbeleri, titreşimleri azaltmak veya titreşim oluşturmak amacıyla kullanılırlar. Yaylar, dinamik çalışma koşulları altında maruz kaldığı yükler nedeniyle bazen aniden kırılırlar. Yayların çalışması esnasında, yorulmaya etki eden parametrelerin etkileri tam olarak bilinemezse yorulma kırılması tahmin edilenden daha kısa sürede olabilir ve sonuçta yoğun maddi kayıplar ortaya çıkabilir. Günümüzde malzemelerin yorulma davranışının anlaşılmasıyla ilgili birçok çalışma yapılmaktadır. Ancak bu çalışmaların çok azı yaylar üzerinedir. Bu çalışmada kalıp yayları ve helisel bası yayları esas alınmıştır. Literatürde yer alan yay yorulması ile ilgili araştırmalar incelenmiş ve bu çalışmalar belirlenen parametrelere göre gruplanarak analiz edilmiştir. Ardından yorulma araştırmalarının yapıldığı test cihazları detaylı şekilde incelenmiştir. Son olarak da yapılan analiz çalışmalarının ardından sentez çalışması ile yeni tip bir yay yorulma test cihazı tasarımı gerçekleştirilmiştir. Test cihazı tasarımında mevcut kalıp yayları incelenmiş ve buna göre test edilebilecek yaylar belirlenmiştir. Test cihazının çalışması esnasında oluşturması gereken kuvvet değerleri hesaplanarak yeni tasarlanan cihazın bilgisayar destekli analiz çalışmaları yapılmıştır. Tasarlanan yay yorulma test cihazının benzerlerine göre daha yüksek rijitlik, boy, sarım çapı ve tel kesiti gibi değişken parametrelerde daha fazla çeşitliliğe sahip olduğu görülmüştür. Böylece daha fazla değişik yayın test edilebileceği bu tasarımda, çalışma esnasında iş güvenliği açısından daha emniyetli ve daha sessiz çalışma ortamı sağlanabileceği de açıktır.

Anahtar Kelimeler: Yaylar, Yorulma, Sonlu Elemanlar Analizi

Design and Analysis of Fatigue Test Device for Die Springs

Abstract: Metallic spring is machine element commonly used in several industrial applications. Generally; springs are used in order to fix components of machines, to reduce impacts, vibrations and to help movement of the parts. Due to the cyclic loads which are exposed to springs during the operations, some failures occur in the springs. During the operations of springs, if parameters which impact of fatigue are not unknown, failures occur before the estimated lifetime, as a result of this, comprehensive material loss is occurred. Nowadays, many studies have conducted to the understanding of fatigue behaviors. However; small part of these studies are related with springs. In this study, die springs and the helical compression springs were considered. First, the previous studies on fatigue were investigated and defined parameters in these studies are analyzed. Then, fatigue test devices in literature are examined. Finally, a new test device is designed as a result of synthesis of these analyses. Forces occurred on test device during operations are calculated and computer aided finite element analysis are conducted. It has been found that the designed spring fatigue testing device has more variability in variable parameters such as more rigidity, length, winding diameter and wire cross section than similar ones. Thus, it is clear that this

* Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Görükle, 16059 Bursa.
İletişim Yazarı: Kadir Çavdar (cavdar@uludag.edu.tr)

design, which can be tested for more variety of transmissions, provides a safer and quieter working environment in terms of work safety during operation.

Key Words: Springs, Fatigue, Finite Element Analysis

1. GİRİŞ

Kalıp yayların daha verimli kullanılmaları için yorulma davranışlarının belirlenmesi yıllardan beri araştırmacıların konusu olmuştur. Metalik yaylar gibi değişken kuvvetlerin etkisi altında çalışan makine elemanlarında, oluşan gerilmelerin maksimum değerleri yerine bunların periyodik değişimi yani tekrarı önem taşır. Yayların şekil değiştirme ve yükleme karakteristikleri, kullanıldıkları uygulama alanlarına göre değişim gösterirler. Yaylar boyutlandırılırken bu karakteristiklere göre yay teli çapı, sarım çapı gibi parametreleri uygun yaklaşımlara göre belirlenir. Ancak, yayların ömürleri konusunda henüz yeterli çalışma literatürde yer bulamamıştır. Dinamik yüklemeye maruz kalan yaylar için yapılan tasarımlar da bu nedenle eksik kalmakta ve yay kırılması nedeni ile makine fonksiyon kayıplarına sıklıkla rastlanmaktadır. Özellikle kalıp yayları bu çalışmada ele alınmış, ömür tespitinin önemi ve bu alanda yapılabilecek çalışmalar vurgulanmıştır.

Hemen hemen bütün yaylar, tekrarlanan yükler altında çalışırlar. Bu nedenle yayların ve yay malzemelerinin yorulma özelliklerinin veya karakteristiklerinin tespiti çok önemli bir konudur. Yorulma özelliklerinin tespiti iç yapı ve malzeme yüzey şartlarına bağlıdır. Yay malzemeleri üzerine ASTM (American Society for Testing and Materials), ASME (The American Society of Mechanical Engineers) ve SAE (Society of Automotive Engineers) tarafından yapılan geniş çalışmalar bulunmaktadır. Yayların yorulma ömürleri genellikle yüzeyi metal tanecikleri ile dövme metodu (shot peening) sayesinde artırılabilmektedir.

Yayların ömürlerinin tespiti değişik şartlar altında belirli deneylerin uygulanmasıyla yapılabilmektedir. Bu deneylerde amaç, yayların tekrarlanan yükler altında ne kadarlık bir süre içinde kırılacağını veya yaylanma özelliğini kaybederek gevşeyeceğini belirlemektir. Deneylerde aynı malzemeden sarılmış ve özellikleri aynı 5 veya 10 yay, aynı şartlarda denenerek yorulma değerleri tespit edilir. Bu işlemde yükleme frekansı oldukça önemlidir. Çok yüksek frekanslarda çalışıldığında ısı açığa çıkar. Bu durumda basmaya ve çekmeye uğratılan yayın ilk birkaç sarımı diğer sarımlara nazaran daha erken yorulur ve erken kırılma meydana gelir. Yayların kırılmalarına genellikle yorulma sebep olduğundan, sıcak şekillendirilmiş yayların en kötü hali yüzeyin zayıflığıdır. Yorulma kırılması daha çok gerilme yoğunlaşmasının meydana geldiği bir yüzey düzgünsüzlüğünde başlar.

Bu nedenle çok yüksek frekanslarda deney yapılması pek tavsiye edilmemektedir. Bu konuda ASTM ve DIN uluslararası standartlarında deney hızlarının 200-500 dev/dak arasında olması tavsiye edilmektedir (Pıhtılı ve Özler, 1997).

Yorulma süreci üç aşamadır: Çatlağın başlamasına yol açan başlangıç yorulma hasarı, çatlağın ilerleyerek kalan kesitin uygulanan yükleri taşıyamayacak kadar zayıflaması ve kalan kesitin ani olarak kırılması. Malzemelerin sahip olduğu üniform olmayan böyle bir mikro yapıdan dolayı gerilmeler üniform olmayan bir şekilde dağılır. Gerilmelerin şiddetli olduğu bölgeler ise genellikle yorulma hasarlarının başladığı noktalardır. Genel olarak malzemelerin yorulma davranışını etkileyen faktörler; gerilme yığılmaları, malzemenin boyutu ve yüzey parametreleri olarak sıralanabilir. Kailas (2015), malzemelerde yorulmanın oluşumunu arıza olarak ortaya çıktığı aşamaları araştırmıştır. Bir sistemin bileşenleri, örneğin, aşırı deformasyon, kırılma, korozyon, belirli özelliklerinin bozulması (ısı, elektrik ya da manyetik) vb. birçok yönden arıza verebilir. Kailas'a göre arıza nedenleri şunlardır: Yanlış malzeme seçimi, yanlış işlem, yetersiz tasarım, bir bileşenin yanlış kullanımı ve yanlış bakım. Çalışmada ayrıca malzeme kırılmasının üç şekilde meydana gelebileceği açıklanmıştır: kırılgan/sünek kırılma, yorgunluk ya da ilerleme kırığı ve gecikmiş kırılma. Berger ve Kaiser (2006), helisel bası yaylarından 160 tanesini aynı anda test edebilen bir makine ile yorulma davranışını araştırmış

ve bu araştırmanın sonuçları çok yüksek devir rejiminde yorulma davranışının tecrübe etmişlerdir. Yayında açıklanan testlerde tel çapı 2-5 mm çapları aralığında, Si-Cr alaşımlı valf yayı telleri kullanılmıştır. Yorulma testinde 107 tekrardan itibaren 108 tekrar ve üstü değerlerde yorulma dayanımı düşüşe başladığı, bu sınır değerlere dikkat edilmesi gerektiği üzerinde durulmuştur. 107 tekrardan itibaren oluşan çatlak başlangıçlarının yüzeyin altında oluştuğu fark edilmiştir. Pyttel ve ark. (2013), 2006 yılında Berger ve Kaiser'in yaptığı araştırmanın devamı şeklinde nitelendirilebilir. Bu araştırmada helisel yayları bası testleri 40 Hz'de yapılmıştır. Test yayları 3 farklı malzemeden yapılmıştır: Yağda sertleştirilmiş SiCr, SiCrV alaşımlı supap (Valf) çeliği ve paslanmaz çeliktir. Yapılan testlerde d=3 mm tel çapında 500 adet ve d=1,6 mm tel çapında 900 adet yay, farklı gerilmelerde aynı anda test edilmiştir. Yay yorulma araştırmalarında d=3 mm için $N=10^9$ yük tekrar sayısından $N=1,5x10^9$ tekrar sayısına kadar test edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Optik mikroskop ve elektron mikroskobu ile kırık başlangıç ve davranışları metalografik mikro kesitler alınarak incelenmiştir. Bu araştırma değişik yay boyutları, değişken malzemeler, değişken bası şartlarında yayların kıyaslanması gibi bilgileri içermektedir. Yaylar için yapılan karşılaştırmalar sonucunda d=1,6 mm ve d=3 mm için P_s= %98 (Dayanım ihtimali) olup grafiklerle gösterimi yapılmıştır. Paslanmaz çelik tellerin haricinde yorulma gerilmesi d=3 mm değerinde d=1,6 mm'deki değerlerden büyüktür. Boyut etkisi incelendiğinde küçük tel çaplarında daha yüksek yorulma dayanımı olduğu görülmüştür. Sonsino (2007), yorulma dayanımını sabit ve değişken gerilmeler olarak alt dallara ayırmıştır. Parça tasarımı ve güvenliği açısından gerilme-tekrar sayısı eğrisi yüksek devirlerdeki testlerle incelemiştir. Yapılan araştırmalar, baskı sayısı arttıkça yorulma dayanımının azaldığını ispatlanmıştır (korozyon ve sıcaklık etkileri göz önüne alınmamıştır). Bileşenlerin yorulma tasarımında; σ-N eğrisinde kırılma noktalarına yorulma hatalarını önlemek için dikkat edilmesi gerektiği belirlenmiştir. Testler için servo-hidrolik yorulma test makinesi kullanılmış, yüksek devirli rejiminde 400 Hz ve 20 Hz'de test sonuçları verilmiştir. Testlerde oluşan kırılma noktasının malzemeye bağlı olduğu tespiti yapılarak Wöhler eğrisi çizilirken test frekansı f<50 Hz değeri referans alınmıştır. Puff ve Barbieri (2014), helisel yaylarda yükleme esnasında oluşan erken kırılmalara metalik olmayan içerik varlığının etkisini araştırmışlar ve yayın yorulma dayanımının azalışını daha iyi anlamak için analitik bir model ortaya koymuşlardır. İki boyutlu sonlu elemanlar metodu, bası işlemi esnasında malzeme yüzeyine yakın yerlerdeki artık gerilmeleri hesaplamak için kullanılmıştır. Belirlenen tasarım yükleri altında, stres yoğunluğunu incelemek için de bir üç boyutlu sonlu elemanlar metodu geliştirilmiştir. Pytell'e göre 10^7 tekrardan sonra yorulma dayanımında azalış görülmektedir. Berger ve Kaiser'in yaptığı deneylerde 10^7 tekrardan sonra yorulma eğiminin düştüğü gözlemlenmiş ve bu bilgilerden yararlanılmıştır. Sonsino ve Bathias da mikro homojenliğin bozulması durumunda gerçek yorulma limitine ulaşılacağı belirtilmiştir. Bu da σ-N eğrisinin yorulma dayanımındaki azalmanın belirlenmesindeki önemini göstermektedir. Serbino ve Tschiptschin (2013), su verme ile temperlenmiş ve östemperlenmiş süper temiz Cr-Si yüksek dayanımlı çeliklerin yorulma davranışını kıyaslamıştır. Malzeme olarak, tel çapı 3,70 mm olan CR-Si (DIN EN 54SiCr6) kullanılmıştır. Yorulma testleri $10^5<N_f<10^7$ ve $N_f>10^7$ şeklinde yapılmıştır. Verilen iki ısıl işlem için de çatlak başlangıcı ve yayılmasının benzer olduğu görülmüştür. Düşük beynitik yapıya sahip olan malzeme yüksek gerilme genliğinde (500 MPa) daha iyi performans göstermiştir. Düşük gerilmelerde (475 – 450 MPa) her iki malzemenin de toplam yorulma ömrünün benzer olduğu görülmüş ve iki ısıl işlemli yay için de stres genlik artışının yorulma ömrünü düşürdüğü belirlenmiştir. Kaiser ve Berger (2005), yaprak yayların değişik ısıl işlemlerle göstermiş olduğu dayanımları ve helisel yayların ısıl işlemlerle gösterdikleri dayanım ve yorulma ömürlerini incelemiştir. Sıcak şekillendirme ve ısıl işlemlerin çeşitli yüzey kusurlarını meydana getirebileceği vurgulanmıştır. Test yayları; DH, DM, VDSiCr ve TDSiCr malzemelerinden yapılmıştır. Yay malzemelerine dövme işlemi de uygulanmıştır. Paslanmaz çelik malzemeli yaylar dövme işlemi görmemiştir. DH yay çeliği, yüksek yorulma yükleri için tasarlanmıştır. DM ise, ortalama yorulma yükleri için tasarlanmıştır. X10CrNi188 (Malzeme:1.4310) ve

X7CrNiAl177 (Malzeme:1.4568) kullanılan paslanmaz çeliklerdir. Yorulma testleri iki farklı makine ile yapılmıştır. Yapılan testlerde, yaklaşık 35 adet kırılma $10x10^6$ ve $700x10^6$ aralığında meydana gelmiştir. Yaylarda çalışma esnasında oluşan hataların azaltılması ve telafi edilmesi için ekonomik ve etkili metot olan dövme yönteminin kullanılabileceği çalışmada belirtilmiştir. Bu araştırma sonucunda, çatlak başlangıçlarının çoğunun yay sarımının iç yüzeyinde oluştuğu, çatlakların büyük çoğunluğu 10^7 baskı değerinin üzerinde tel yüzeyinin altında meydana geldiği ve bu küçük çatlak başlangıçlarının kırılmaya sebep olduğu görülmüştür.
Kumar ve ark.(2002), kok fırın bataryalarında kullanılan helisel bası yaylarında meydana gelen korozyon yorulması nedeniyle oluşan kırılmaları incelemiştir. Bu kırılmalar, öngörülen ömrün çok altında meydana gelmektedir. Kömür ısıtma sırasında kok fırın bataryasındaki genleşme veya büzülmeleri dengelemek için kullanılan bu yayların analizleri için "X-ray diffraction" (XRD), "Energy Dispersive Spectroscopy" (EDS) ve "Scanning Electron Microscope" (SEM) kullanılmıştır. Dört aktif sarımı olan yayların malzemesi 51CrMoV4'dir. Kok fırınlarındaki bataryalarda bulunan helisel yaylar analiz edildiğinde, mikro yapı analizi ve sertlik analizlerinde yay malzemesinde herhangi bir bozulma gözlenmemiştir. Yüzey korozyonu "XRD" ve "SEM–EDS" ile analiz edilip, kükürt ve klor taşıyan bileşiklerin yüzeydeki artık gerilme kayıplarına sebep olduğu ve bunun da korozyon ile yorulmaya sebebiyet verdiği belirlenmiştir.
L. Del Llano-Vizcaya ve ark. (2005), kritik düzlem yaklaşımları, Fatemi-Socié ve Wang-Brown ve Coffin-Manson yöntemi kayma deformasyonuna dayanarak, sabit genlikli yük altında yayların yorulma ömürlerini tahmin etmek için kullanmıştır. Deneysel yorulma ömürleri, çok eksenli yorulma kriterleri metodu ile bulunan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Gerilme analizleri, sonlu elemanlar yazılımı ANSYS kullanılarak ve çok eksenli yorulma çalışması da yorulma yazılımı "nCode" kullanılarak yapılmıştır. Deneylerde, AISI MB yüksek karbon çeliği kullanılmıştır. 9,5 sarıma sahip boyu 153,6 mm, tel çapı 5,7 mm ve sarım çapı 44,4 mm olan yaya elektrik fırınında 400°C'de 20 dk gerilme giderme işlemi uygulanmıştır. Sabit ortalama gerilme $\tau_m = 254{,}9$ MPa olarak belirlenmiştir. Deneyler sonucunda, yorulma sınırı bu yay için yaklaşık 141 MPa olarak bulunmuştur. Kırılma analizlerinde, 7,5 aktif sarım olan yayda alttan 2,4'üncü sarımda kırılma meydana geldiği belirlenmiştir. L. Del Llano-Vizcaya ve ark. (2006), ısıl işlemin kalıntı gerilme ve yorulmaya etkisini inceleyip ısıl işlem zamanı ve sıcaklık değerinin kalıntı gerilme üzerinde etkilerini araştırmıştır. Numuneler, AISI MB malzeme yüksek karbon çeliğidir. Mekanik yayların üretim sürecinde oluşan, yüksek genlikli kalıntı gerilmelerin yay dayanımını ve kullanım ömrünü azalttığı belirlenmiştir. Stone (2014), üreticilerin tasarım aşamasında helisel bası yaylarının ömürlerini tahmin edebilmeleri konusu üzerinde çalışmıştır. Burada, modifiye "Goodman Diyagramları" yeterli öngörülen ömrü doğrudan hesaplanmasını kolaylaştırmak için modifiye edilmiştir. Çalışmanın sonuçları geleneksel grafik yöntemi ile kıyaslanarak sunulmuştur. Porteiro (2010), yaylar ile ilgili temel konuları inceleyip yeni yay tasarımı ve yay geliştirilmesi için esnek ve uygun yay tasarım programı hazırlamıştır. Yorulma ömrü, her malzeme için olduğu gibi yaylar için de çok önemli olduğundan yorulmanın da hesap programda yer alması gerekir. Bu çalışmada, birden fazla yayla testler yapılmış ve hesap programının sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yay uygulamaları için en gerçekçi eşik değerinin (mukavemet sınırı) $2x10^7$ çevrim değeri olduğu belirlenmiştir. Hazırlanan programın, istenen yorulma ömrünü elde etmede kullanılacak olan malzemeyi, daha küçük sarım çapı ve küçük yay teli gibi parametreleri kullanarak azaltmak için çözümler sunduğu belirtilmiştir. Puff ve ark. (2010) helisel yay süspansiyon sisteminde sayısal ve deneysel yöntemlerle yayların yorulma ömrünü hesaplamayı amaçlamışlardır. Hermetik kompresörlerde kullanılan helisel süspansiyon yayları, sistemin gürültü ve titreşim etkenleri göz önüne alındığında yorulmanın çok önemli etkileri vardır. Yük altındaki yaylar, duruş ve başlatma işlemleri sırasında salınımlı yer değiştirme yapmakta olduğu ve kompresör süspansiyonlarının ömrünün genellikle 500000 çevrim olarak hesaplandığı da belirtilmiştir. Analizlerde, sonlu elemanlar metodu kullanılmış ve süspansiyon yaylarının analizinde önemli gelişmeler sunulmuştur. Bu analizlerde, modele yay ve durdurucu arasındaki temas da dahil

edilip gerçek yükler kullanılmış ve sonuçta daha hassas gerilme değerlerine ulaşılmıştır. Subaşı ve ark.(2010) kalıntı gerilmelerin uygulanan imal yöntemine göre termal, mekanik ya da bunların birleşiminden kaynaklı oluştuğu ve uygulanan imalat yönteminin parçada nasıl bir kalıntı gerilme dağılımı oluşturacağının iyi bilinmesinin mühendislik hesapları açısından önemli olduğunu belirtmiştir. Yapılan çalışmada, AISI 4140 çeliğinden tornalandıktan sonra yağda 40, 45, 50 HRC değerlerinde sertleştirilmiş numunelerdeki kalıntı gerilme değerleri belirlenmiş ve hiç sertleştirilmemiş numunelerle karşılaştırılması yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda; 40, 45, 50 HRC değerlerinde sertleştirilmiş numunelerin yüzeylerinde sırasıyla 169, 299, 203 MPa çekme kalıntı gerilmesi oluştuğu, buna karşılık sertleştirilmemiş numune yüzeyinde ise, 211 MPa çekme kalıntı gerilmesi oluştuğu tespit edilmiştir. Sertleştirmenin malzeme yüzeyinde çekme kalıntı gerilmesi oluşturduğu, sertliğe göre değerinin değiştiği ve mekanik kaynaklı gerilmelerin termal kaynaklı gerilmelere göre daha baskın olduğu görülmüştür. Schuller ve ark. (2015) VDSiCr dövülmüş yay çeliğine yük oranının etkisi yüksek devirde yorulma (HCF) ve çok yüksek devirde yorulma (VHCF) göz önüne alarak incelemişlerdir. Ultrasonik yorulma test elemanları kullanılarak, σ-N grafiği çizilmiş yük oranları R= -1, R= 0,1 ve R= 0,5 alınmıştır. Kırılmalar ya $5x10^6$ çevrimi altında ya da $5x10^8$ çevrimi üzerinde meydana gelmiş ve bu değerler arasında kırılma oluşmamıştır. HCF rejiminde, çatlaklar özellikle yüzeyde olmaya başlamıştır. VHCF rejiminde, çatlak başlangıcı sadece iç bölgede tane sınırlarında, inklüzyon olarak veya nadiren matriste oluşmuştur. σ-N eğrisi 10^9 çevirimin üzerinde azalmaya devam eder. R= -1 için 10^{10}daki ortalama çevrim dayanımı 10^9a göre %5 daha düşük olduğu belirlenmiştir. Ortalama gerilmenin artmasının, malzemenin kırılmadan dayanabileceği tekrarlı gerilme değerini düşürdüğü görülmüştür. Pıhtılı ve Özler (1997) emniyetli bir şekilde çalışması istenen yayların gerilmeleri ve ömürlerinin tespitinin mühendislikteki önemi belirtmişlerdir. Çalışmada öncelikle yay malzemesindeki imalat hataları incelenmiş, yay yorulması ele alınmış ve daha sonra yay yorulma deneyleri açıklanmıştır. Kaiser ve ark. (2010) çalışmalarında üç farklı malzemeden yapılmış dövülmüş helisel yayların uzun süreli yorulma testlerinin araştırma sonuçlarını 10^9 çevrimine kadar izleyip sunmuştur. Test yayları; tel çapları 1,6 mm ve 3 mm olan, yağda sertleştirilmiş ve temperlenmiş SiCr, SiCrV alaşımlı valf yayı çelik telleri ve paslanmaz çelik telleridir. Ayrıca, yaylara son dövme işlemi de uygulanmıştır. SEM (Tarama Elektron Mikroskobu) ile kırık davranışını ve mekanizmasını incelemek için metalografik kesitler kullanılarak analizler yapılmıştır. Bu testlerde, çeşitli yay tipleri için çok yüksek devirde yorulma (VHCF) rejiminde farklı yorulma özellikleri ve farklı arıza mekanizmaları gösterdikleri bulunmuştur. VHCF testleri, yaklaşık 40 Hz'lik frekansta bir test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, Reicherter–Stiefelmayer yay test makinesi DV8-S2 kullanılmıştır. Tüm yay tiplerinde, VHCF rejiminde yorulma dayanımı düşmekte olduğu belirlenmiştir. σ-N eğrisi, SiCr ve SiCrV alaşımlı çeliklerin telleri aynı olduğunda, σ-N eğrisi 1,4568 paslanmaz çelik yay tellerinde daha dik bir eğim göstermiştir. 1,4568 paslanmaz çelik malzemeli yayda sürtünme kaynaklı yorulma kırılması meydana gelmemiştir. Malzeme etkisinin yanı sıra yay yapma sürecinin de özellikle yay dövme işleminin, yorulma açısından HCF ve VHCF rejiminde çok önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Nie ve ark. (2013) çalışmalarında yüksek dayanımlı dövme işlemi görmüş yay çeliği 3Cr13 için çok yüksek devir rejimlerindeki yorulma (VHCF) davranışını araştırmıştır. Elektro-parlatma (EP) ve dövme işlemi (SP) görmüş numuneler 20 kHz değerinde ultrasonik yorulma testleri ile analiz edilmiştir. Her iki numunede de düşük gerilme genliklerinde çatlak başlangıcının alt yüzeylerde başladığı gözlenmiş ve ayrıca ince taneli alanın (FGA) inklüzyon civarında oluştuğu görülmüştür. Gerilme yoğunluğu faktörü, iç çatlak yayılımını kontrol eden eşik değer olarak kabul edilmiştir. VHCF'de her iki tip numunelerde σ-N eğrisinde düşme meydana gelmiş ve yorulma ömrü değerinin alt yüzey için dövme işlemi görmüş numunelerde, elektro-parlatma numunelerine kıyasla düştüğü gözlenmiştir. FGA oluşumu, kararlı çatlak yayılımı eşik değeri altı, sürekli olmayan çatlak yayılımı süreci olarak adlandırılmıştır. Yorulma ömrü için Paris'in yasasını göz önüne alarak, çatlak yayılma oranı kullanılarak tahminler yapılmıştır ve metalik olmayan inklüzyon ortalama

boyutu σ-N eğrisi tahmini EP ve SP örneklerinin her ikisi için de deney sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür. Gönen ve ark. (2015) dikdörtgen kesitli kalıp yaylarının yerine daha ucuz ve daha az üretim maliyeti olan dairesel kesitli kalıp yaylarının kullanılmasını araştırmıştır. Yapılan çalışmada, eşdeğer özelliklerde kalıp yayları deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, elde edilen yorulma testi simülasyonunu çalıştırmak için sonlu elemanlar yöntemi yazılımına aktarılmıştır. Bu testlerin sonucunda elde edilen veriler, dairesel kesitli kalıp yayları ile dikdörtgen kesitli kalıp yaylarının aynı performansa sahip olmadığını ortaya koymuştur. Daha sonra yorulma testleri dairesel yaylarda, döküm polyamid malzeme arasına kılavuzlanarak dikdörtgen kalıp yaylarında uygulanan eşit yük değerleri alınarak tekrarlanmıştır. Yorulma ömürleri kıyaslandığında, dairesel kesitli dökme polyamid kılavuzlu kalıp yaylarının ömrünün, dikdörtgen kesitli kalıp yaylarının ömründen 1,5–2 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, döküm polyamid malzeme ile kılavuzlanmış dairesel kalıp yayı ömrü, normal dairesel kalıp yaylarından 5,68 kat daha fazla olduğu görülmüştür. Gönen ve ark. (2008) metalik yayların ömürlerini belirlemek üzere yorulma analizi yapılması amacıyla "Mekanik Yay Yorulma Test Cihazı" tasarlamış ve imal etmişlerdir. Yapılan cihazın önemli özelliği, aynı anda iki farklı sıkıştırma oranında yorulma analizi yapılmasına imkan vermesidir. Bu özelliği ile gerilme-ömür diyagramının çizilmesinde iki farklı noktanın belirlenmesi zaman kazandırmaktadır. Bu sistemde 8 bar basınç uygulayan bir kompresör kullanılmış ve 20 ile 200 mm aralığındaki yayların yorulma testleri, öngerilmeli ve öngerilmesiz olacak şekilde yapılabilmiştir.

Literatürde yer alan çalışmalara göre metalik yayların yorulma yorulma davranışını inceleyen çalışmalarda aşağıda verilen ortak öneriler tespit edilmiştir:

- Deneyler, benzer özelliklere sahip en az 5 veya 10 yay üzerinde yapılmalıdır.
- Deney hızının 200 ile 350 dev/dak arasında olmasına çalışılmalıdır. Uygun deney hızı 300 dev/dak'dır. Değişik çalışmalardaki deneyler için yüksek devirlere de çıkılabilir.
- İlk 1000 devirden sonra yorulma deneyi durdurularak yaylar kontrol edilmeli ve yük değerleri ayarlanmalıdır.
- Her bir yayın ortalama ömürlerini tespit etmek için en düşük ve en yüksek değerler ihmal edilerek birbirine yakın değerler esas alınır.
- Yaylar, 1800 dev/dak hızındaki alternatif akımlı elektrik motorundan alınan hareketle de denenebilir.
- Gerçek yorulma gevşemesi, gerilimin daha yüksek ve yoğun olduğu sarımın iç kısmında başlar.
- Deney makinesi ve yayların deneyden önce iyice yağlanmış olmaları gerekmektedir.

Eğer bir yay çalışma ömrü içerisinde 10000 çevrimden daha az çalışırsa yükleme durumu statik kabul edilir. Bu durumda yorulma yayın performansına etki etmez. Çalışma 10000 çevrimden daha fazla ise yorulmanın yay performansına etki ettiği düşünülür ve tasarımda hesaba katılır (Pıhtılı ve Özler, 1997).

Metalik yayların yorulma davranışını test etmek amacı ile bir cihaz tasarlamadan önce yapılan geniş literatür araştırması sonucunda tespit edilen bilimsel makaleler numaralandırılmış ve özetle yukarıda tanıtımı yapılan bu makalelerin birbiri ile ortak noktaları belirlenmiştir. Bu ortak noktalar, malzeme, frekans, ısıl işlem gibi başlıklar altında Şekil 1.'de verilmiştir.

İncelenen yay malzemesi	Makale No	Yay teli çapı d [mm]	Makale No	Yük tekrar frekansı [Hz]	Makale No	Ps Yayın kırılmadan çalışabilme olasılığı [%]	Makale No
SiCr	1,2,4,16	1	6	15	8,9	10	1,16
SiCrV	2,4,16	1,6	2,16	20	1,3,6	25	1
X7CrNiAl177	2,6	2	1,3,6	25	5	50	1,14,16
51CrMoV4	7	3	1,2,16	40	2,16	90	1,16
54SiCr6	5	3,7	1,5	110	5	98	2
VDSiCr	3,6,14	4	1,6	260	5		
X10CrNi188	6	5	1,6	310	5		
DH, DM	6	5,7	8,9	20000	18		
AISI MB	8						
UNS G41300	10						
Genel yay çeliği	11,12,15, 17,19,20						
AISI 4140	13						
3Cr13	18						

Ömür aralığı	Makale No	Yüzey işlemleri, ısıl i şlem	Makale N o	Analiz - Yöntem	Makale No
$10^5 < N < 10^7$	5	Yağda sertleştirme, temperleme, dövme, patentleme	2,6,14,16, 18	SEM/FEM	4,8,9,12, 19
$10^7 < N < 10^9$	1,3,5,6			Stereo Mikroskop	2,16
$N > 10^9$	1,6			Goodman Dyg., Kalıntı gerilme	10,11,13
				Ultrasonik yorulma testi	14
		Valf çeliği	1,2,4	Kırılma modları	15,17
		Ostemperleme	5	Dikdörtgen kesitli yay	19
		Su verme temperlem e	3,5	Çift sıkıştırma oranlı test/FEM	20

1: Berger ve Kaiser (2006), 2: B. Pyttel ve ark. (2013), 3: Sonsino (2007), 4: Puff ve Barbieri (2014), 5: Serbino ve Tschiptschin (2013), 6: K aiser ve Berger (2005), 7: Kumar ve ark. (2002), 8: L. Del Llano-Vizcaya ve ark. (2005), 9: L. Del Llano-Vizcaya ve ark. (2006), 10: Stone (2014), 11: Porteiro (2010), 12: Puff ve ark. (2010), 13: Subaşı ve ark. (2010), 14: Schuller ve ark. (2015), 15: Pıhtılı ve Özler (1997), 16: Kai ser ve ark. (2010), 17: Kailas (2015), 18: Nie ve ark. (2013), 19: Gönen ve ark. (2015), 20: Gönen (2008).

Şekil 1:
Yay yorulma çalışmalarının kriterlere göre sınıflandırılması

2. MATERYAL VE METOT

2.1 Yay Yorulma Cihazı Tasarım Süreci

Yay yorma cihazının tasarımında, genel bir makinenin tasarımında göz önüne alınması gereken konulara dikkat edilmiştir. Yüke maruz kalan parçalar dikkate alınarak malzeme seçimleri yapılmış ve imalat-montajın kolaylığı da göz önüne alınmıştır. Tasarlanan test cihazında temel amaç kalıp yaylarının deneysel yorulma analizi olup tasarım hesaplarında "Fibro" firmasının kalıp yayları kullanılmıştır. Söz konusu cihazın en ekonomik, güvenilir ve uzun ömürlü olacak şekilde tasarlanması gerekir. Böyle bir çalışmada bilimsellik, koordinasyon, malzeme-piyasa araştırması ve sağlanan verilerin sürekli olarak iyileştirilmesi beklenir. Makine tasarımının arkasında yatan düşünce, belirli işlem veya işlemler akışını yapabilecek bir ürünü tasarlamak ve gerçekleştirmektir. Bir makinenin tasarımında, başlangıçtan bitime kadar gerçekte adım adım bir süreç takip edilir. Bu süreç, ihtiyacın belirlenmesi ve bu ihtiyacın karşılanmasına karar verilmesi ile başlar. Geriye dönüşlerle tasarım ve istekler yeniden gözden geçirilir ve tekrarlanan işlemler dizisinin sonunda, süreç ihtiyaç ve imkânlara göre seçilmiş en uygun

çözümle tamamlanır. İhtiyacın belirlenmesinden sonra tasarlanacak makine ile ilgili kalite özelliklerinin tümünü kapsayan problemin tanımı aşaması gelir. Daha sonra gelen sentez aşamasında ise en iyi çözümlerin sentezi yapılır. Ancak sentez aşamasının analiz ve iyileştirme aşamasının verileriyle geri beslenmesi gerekir. Çünkü tasarım aşamasındaki sistem performansının kalite özellikleriyle uyum içerisinde olup olmadığının tespiti için analiz edilmesi gereklidir. Analiz ve iyileştirmede, sistemin ihtiyaca cevap vermediğinin görülmesi halinde sentez işlemi tekrar başlamalıdır. Geliştirme aşaması ise toplam tasarım süreci içerisinde çok önemli bir aşamadır. Geliştirme, başarılı bir tasarımın son ispatıdır. Burada, tasarımın ihtiyaçları gerçekten karşılayıp karşılayamadığı sorusuna cevap aranır. Tasarımın güvenilir olup olmadığı, benzer ürünlerle başarılı bir şekilde rekabet edip edemeyeceği, ürünün üretim ve kullanımının ekonomik ve ayrıca bakım ve ayarının kolay olup olmadığı, satışından bir kar sağlanıp sağlanamayacağı hususları araştırılır. Geliştirme aşamalarının sonunda tasarım son haline getirilir. Burada, makine parçaları üzerindeki ilişkinin tümünün görüldüğü bir montaj resmi ve parçalarının her birinin boyut ve özelliklerinin gösterildiği detay resimleri en son haliyle çizilir. Detay resimlerindeki boyut ve özellikler tolerans, yüzey kalitesi, işleme payı, malzeme ve uygulanacak ısıl ve kimyasal işlem gibi özellikleri kapsar. Son olarak, yapılan hesaplamalar ve her resim bir daha kontrol edilir. Son tasarımda herhangi bir hata yapıldığında üretim hatalı olacağından bu safhada yapılacak kontrol ve hataların giderilmesi çok önemlidir. İhtiyacı karşılayan ve en uygun şartları sağlayan ürün, sonuç aşaması olan sunuşta satışa ve kullanıma hazırdır (Burhan 2010).

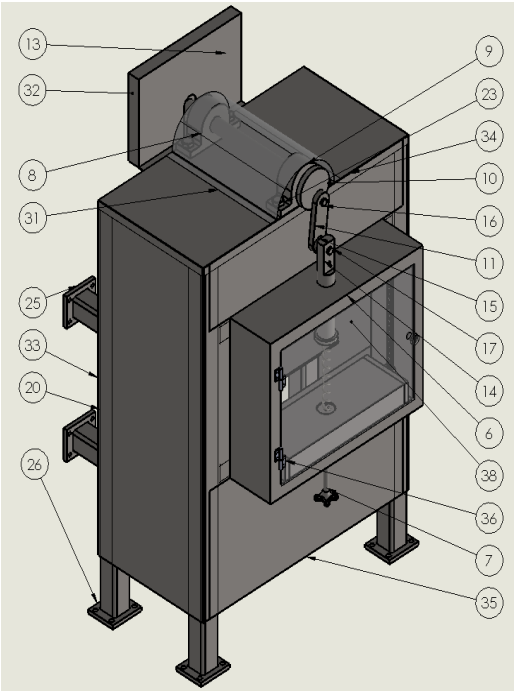
2.2 Cihazı Oluşturan Elemanların Tasarımı ve Ömür Hesapları

Tasarımın ilk aşamasında Fibro firmasının yay kataloğu incelenerek test edilecek kalıp yayları için üst sınır olarak F=1150 N belirlenmiştir. Belirlenen bu üst sınıra göre kataloglardan uygun görülen kalıp yay grubu test cihazında denenebilecektir. Test edilebilecek kalıp yayları, F=1150 N maksimum kuvvet sınırına kadar ve 25 mm'den 305 mm boy değerlerinde olup renk kodları ve diğer boyutları Tablo 1'deki gibi belirlenmiştir.

Test cihazının (Şekil 2) temel çalışma prensibi motordan gelen tahrik, kayış kasnak mekanizmasıyla, devri düşürüldükten sonra milin ucunda bulunan aparatlar ile dairesel hareketin eksenel harekete çevrilmesi ve son baskı elemanının (14) bu yükü yaya uygulanması şeklindedir. Burada, yay çapı 10 mm'den 40 mm'ye kadar ve yay boyu 25 mm'den 305 mm'ye kadar yaylar test edilebilmekte, alt tabladaki ayar cıvatası (7) kullanılarak istenen basma mesafesinde yaya baskı yapılması da sağlanmaktadır. Test bölmesine (6) yerleştirilen milimetrik cetvel sayesinde yayın sıkışma miktarı yani yaya uygulanacak olan kuvvet ayarlanabilmektedir.

Tablo 1. Test cihazında yorulma denemeleri yapılabilecek kalıp yayları

Çap	Ø 10	Ø12,5	Ø16	Ø20	Ø25	Ø32	Ø40	Ø50
Tür	YEŞİL (%100 STROK)	YEŞİL (%100 STROK)	YEŞİL (%100 STROK)	YEŞİL (%100 STROK)	YEŞİL (%80 STROK)	YEŞİL (%62 STROK)	YEŞİL (%45 STROK)	Test yapılamaz
	MAVİ (%100 STROK)	MAVİ (%100 STROK)	MAVİ (%100 STROK)	MAVİ (%100 STROK)	MAVİ (%62 STROK)	MAVİ (%30 STROK)	MAVİ (%30 STROK)	
	KIRMIZI (%100 STROK)	KIRMIZI (%100 STROK)	KIRMIZI (%100 STROK)	KIRMIZI (%50 STROK)	KIRMIZI (%30 STROK)			
	SARI (%100 STROK)	SARI (%100 STROK)	SARI (%100 STROK)	SARI (%50 STROK)				
Boy	L=25 mm'den L=305 mm'e kadar	L=25 mm'den L=305 mm'e kadar	L=25 mm'den L=305 mm'e kadar	L=25 mm'den L=305 mm'e kadar	L=25 mm'den L=305 mm'e kadar	L=38 mm'den L=305 mm'e kadar	L=51 mm'den L=305 mm'e kadar	L=51 mm'den L=305 mm'e kadar
Not: Bu tablodaki kalıp yayları için maksimum F=1150 N kuvvet gerekmektedir. Yay yorulma test cihazında bu yaylar ve strok değerleri için denemeler yapılabilir.								



Şekil 2:
Metalik yay yorulma cihazı

Tasarlanan yay yorma cihazı üç ana bölümden oluşmaktadır: 1-Test bölmesi: Yayların yataklandığı ve deneyin gerçekleştiği ana bölüm, 2-Tahrik grubu: Mil ve ara elemanlar vasıtasıyla yaylara kuvvet uygulanan bölüm, 3-Makine şasesi: Test bölmesi ile tahrik grubun monte edildiği sistemin dengesini sağlayan bölüm.

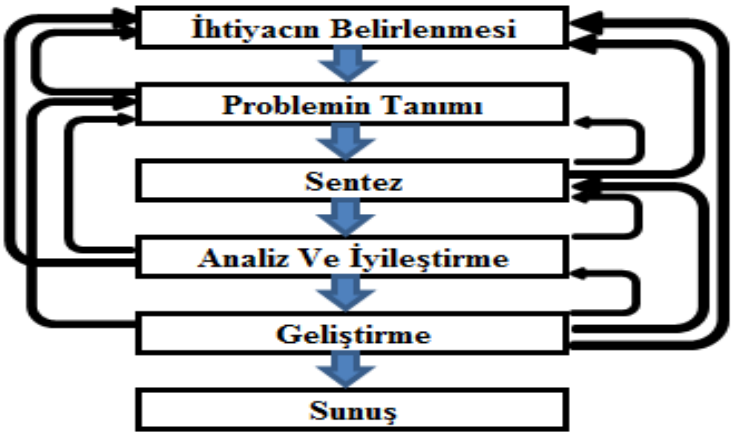
Yaylar, alt tablada yer alan bölmeye (6) yataklanmakta ve sabit kalmaktadır. Alt tablanın yataklanması ve hareketinin sağlanmasında lineer kızaklar (2) kullanılmıştır. Bu sayede, merkezleme ve yataklama yapılmakta aynı zamanda istenildiğinde tablanın hareketine de olanak sağlanmaktadır. Alt tablanın hareketi ise tablanın altında yer alan cıvata sistemi (7) ile sağlanmaktadır.

Test cihazı şu elemanlardan meydana gelmiştir: 1: Lineer kızak arabası, 2: Lineer kızak, 3: Lineer kızak arabası bağlantı cıvatası, 4: Lineer kızak bağlantı cıvatası, 5: Yay yataklama plakası, 6: Test Bölmesi, 7: Vidalı ayar mekanizması, 8: Makine gövdesi, 9: Mil yatağı, 10: Mil, 11: Lineer baskı elemanı, 12: Kama, 13: Büyük kasnak, 14: Yay baskı aparatı, 15: Ara bağlantı elemanı, 16: Mil için M14 cıvata bağlantısı, 17: Yay baskı aparatı için M14 cıvata bağlantısı, 18: Örnek yay, 19: M14 Somun, 20: Kare profil 80x80x5, 21: Gövde destek profili 40x40x4, 22: Test bölmesi montaj profili 80x80x5, 23: Yatak bağlantı cıvatası, 24: M24 somun, 25: Duvara sabitleme plakası, 26: Zemine sabitleme plakası, 27: Motor, 28: Motor montaj plakası, 29: Motor kasnağı, 30: Dar V kayış, 31: Mil ve yatak koruma sacı, 32-33: Kasnak-makine koruma sacı, 33: Makine yay koruma sacı, 34-35: Üst-alt kapak sacı, 36: Koruma kapak menteşesi, 37: Koruma kapak kilidi, 38: Test bölmesi koruma kapağı.

Şekil 3' de tasarım sürecinin akış diyagramı verilmiştir.

Tasarlanan cihaz için sonlu elemanlar yöntemi kullanan yazılımlar yardımı ile çeşitli analizler yapılmış ve cihazın dinamik davranışı ile dayanımı tespit edilmiştir. Öncelikle ANSYS Workbench programı kullanılarak modal analiz çalışmaları yapılmıştır. Tasarımda kullanılan tüm malzemeler çelik olarak tanımlanmış ve tasarlanan makinede parçalara uygun ağ yapısı oluşturulmuş, temas tanımları yapılmış ve sınır koşulları uygulanıp analiz yapılmıştır. ANSYS Workbench ortamında temas tanımı otomatik olarak tanımlanmaktadır. Ancak bu temas tanımları varsayılan ayarlara göre yapıldığı için, revize edilmesi veya manüel temas tanımı yapılması gerekmektedir. Model ağ yapısına örnek Şekil 4'te verilmiştir. Kare ve dikdörtgen

benzeri parçalarda hexahedral, oval, pah kırılmış vb. karmaşık yapılı parçalarda ise tetrahedral ağ yapısı kullanılmıştır.
Şekil 5'te görüldüğü gibi frekans 71,453 Hz olduğunda 1,5315 mm deplasman oluşmaktadır. Ancak sadece mod 1 incelense bile tasarımın uygun olduğu görülür. Çünkü yapılan tasarımda motor devri 950 dev/dak ve uygulanacak yay kuvveti F_y=1150 N'dur. Bu analizlerde hesaplamalar yapılırken öngörülmeyen şartlar düşünülerek kuvvet F_{maks}=2000 N olarak alınmıştır.



***Şekil 3*:**
Tasarım süreci

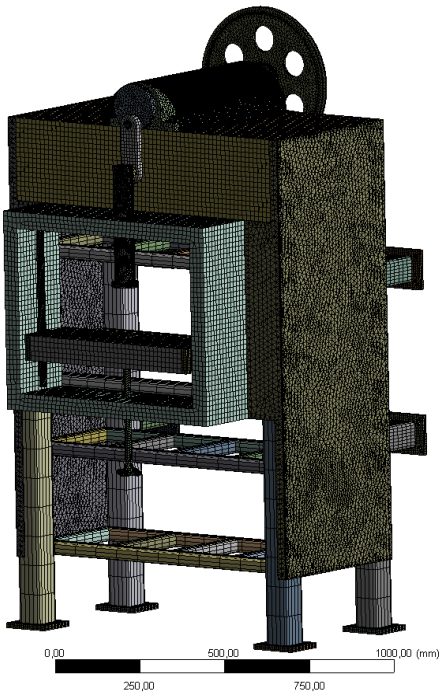
2.3 Statik Analizler

Yayların test çalışmaları esnasında kuvvet uygulandığında yay yataklama plakası ile bitişik halde bulunan ve yaya uygulanan kuvvete maruz kalacak olan vidalı ayar mekanizmasının statik analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde uygulanan kuvvet yine F_{maks}=2000 N alınmıştır. Analiz sonuçlarından da görüldüğü gibi vidalı ayar mekanizması, çalışma esnasında maruz kaldığı kuvvetlere karşı mukavemet göstermektedir (Şekil 6). Oluşan gerilme σ_{maks}=8,684 MPa olmakta ve malzemenin emniyet gerilmesi değerinin çok altında kalmaktadır.

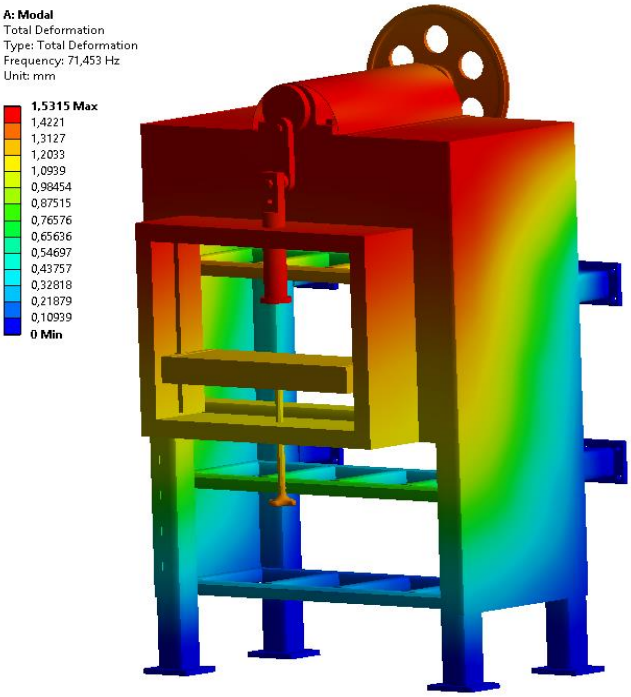
2.4 Kinematik Analizler

Mekanizmalar hareket halinde olduğundan dolayı, her değişen konumda hız ve ivmeler farklı olabilir. Tüm hareket boyunca hız ve ivmelerin bulunması için her açı ya da konumdaki değerlerin hesaplanması gerekir. Tüm açılardaki hız ve ivmeler bulunduğunda istenen uzuvun grafiklerini çizmek de mümkün olabilmektedir. Aynı zamanda mekanizmanın hareket simülasyonu da elde edilebilmektedir. Bu çalışmada, modal ve statik analizlerin ardından kinematik analizler de yapılmıştır. Öncelikle, "Rigid Dynamics" modülü kullanılarak sabitlenecek noktalar belirlenmiştir. Ardından, dönme hareketi yapacak temas noktaları ve lineer hareket yapacak bağlantılar tanımlanmıştır (Şekil 7).

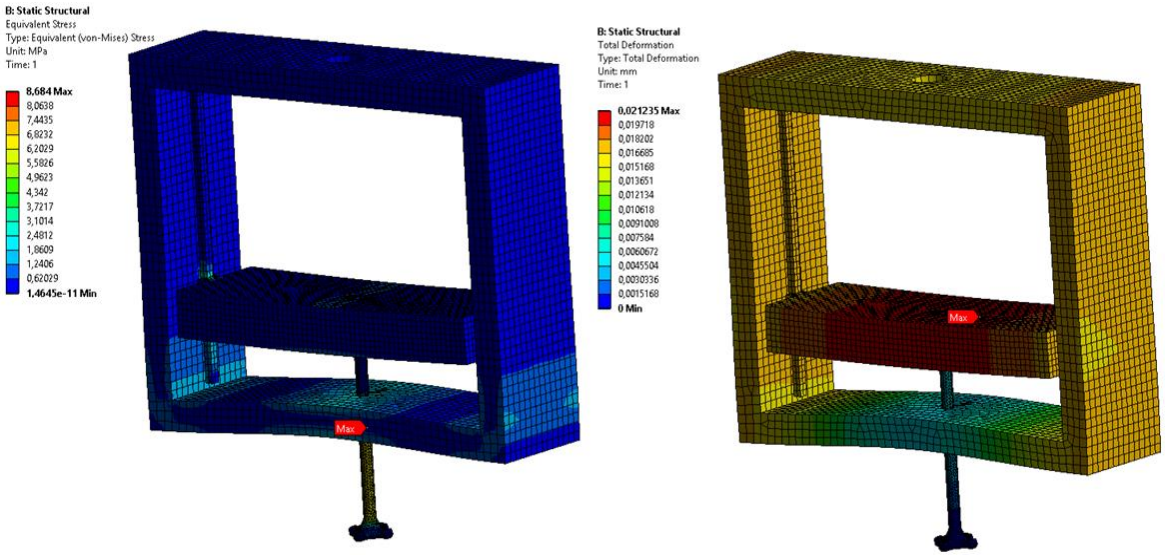
Yapılan kinematik analizlerde; yataklar, üst cıvata bağlantı noktası ve alt cıvata bağlantı noktası gibi kritik elemanlar incelenmiştir. Bir saniyelik zaman dilimi için inceleme yapıldığında, yataklarda 270,03 N ile 18,578 N aralığında kuvvet oluştuğu görülmüştür (Şekil 8). Üst bağlantı aparatının kinematik analiz sonuçlarında 268,13 N ile 16,723 N aralığında değerler elde edilmiştir. Bu değerler çok küçük değerler olup, emniyetli çalışma açısından bir problem oluşturmamaktadır. Alt bağlantı cıvatası için yapılan kinematik analiz sonuçları incelendiğinde de 218,02 N ile 4,7933 N aralığında kuvvetler oluştuğu görülmüştür. Yapılan analizler sonucunda bağlantı noktalarında oluşan kuvvetlerin sistemin çalışması açısından bir sorun oluşturmadığı ve emniyetli bir şekilde çalıştığı görülmüştür.



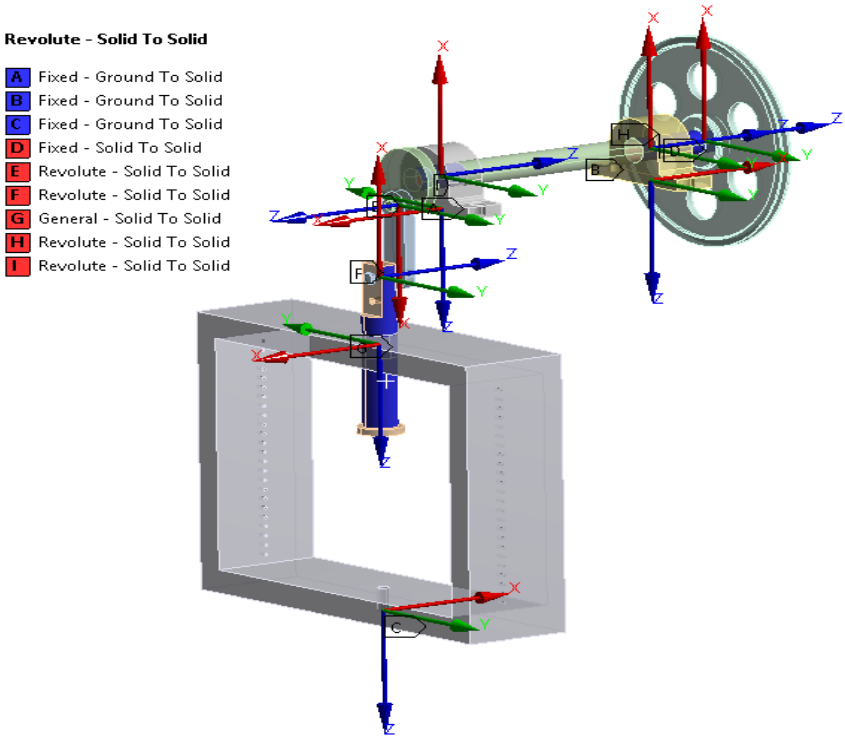
***Şekil 4*:**
Model ağ yapısı genel görünümü



Şekil 5:
Mod şekli (1. Mod shape)

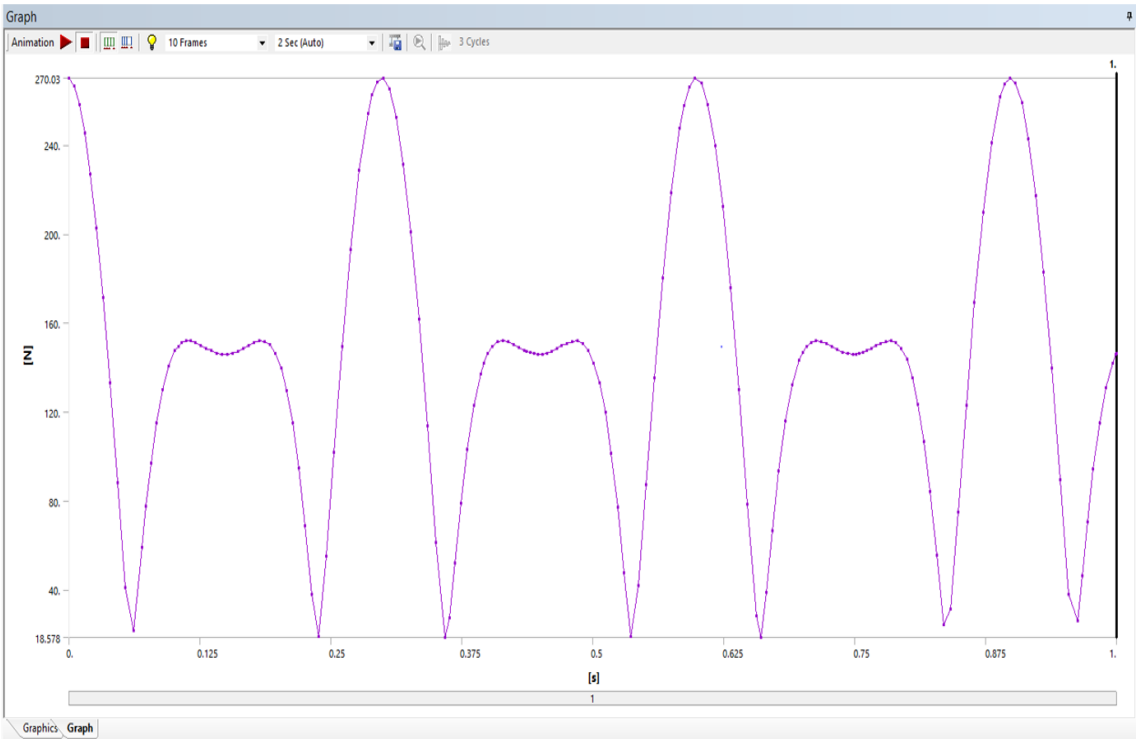


Şekil 6:
Vidalı ayar mekanizması statik analiz sonucu



.

Şekil 7.
Temas noktaları tanımlamaları



Şekil 8:
Yataklar için toplam kinematik analiz sonuçları

3. SONUÇLAR

Tasarlanan cihaz için gerçekleştirilen FMEA analizi sonunda aşağıda verilen konularda iyileştirmeler yapılabilir:

- Yay rijitliği ve sarım çapı arttıkça uygulanması gereken kuvvet de artmakta ve bunun sonucu olarak da cihazı oluşturan tüm parçalarının boyutları büyümektedir. Bu nedenle kalıp yaylarının çeşitlerinde bir sınırlamaya gitmek gerekir.
- Yay rijitliği ve sarım çapı parametreleri büyütüldüğünde, gerekli kuvveti sağlamak için kasnak çapı ve gerekli motor gücü de artmaktadır. Bu nedenle, sınır değerlerini aşan kalıp yaylarında cihaz kullanılamaz.
- Dönme hareketinin, eksenel harekete çevrildiği aparatlarda bronz yataklar kullanılmıştır. Bunların ömürlerine dikkat edilmelidir.
- Sistemdeki yaylara her kuvvet uygulandığında en fazla 100 mm yer değiştirme imkânı vardır.

Bu iyileştirme önerilerinin yanı sıra tasarlanan cihazın mevcut cihazlara göre üstünlükleri de şöyle sıralanabilir:

- Tasarlanan cihazla otomatik olarak kuvvet tekrar sayısı kaydedilebilir.
- 100 mm sabit baskı mesafesi olmasına rağmen, baskı miktarı mm cinsinden azaltılmak istendiğinde buna olanak sağlayacak şekilde 50 mm'lik strok ayar bölümü ve test bölümünde lineer kızak ile birlikte yataklanmış plaka mevcuttur. Kurs mesafesi hassas şekilde ayarlanabilmektedir.
- Kırılan yayın fırlamaması, milin, yatak ve kasnak gibi parçaların iş güvenliği tehlikesi oluşturmaması için cihazda yeterli önlemler alınmıştır. Cihaz benzerlerine göre daha az gürültüye neden olmaktadır.
- Yaylar kırıldığında cihaz otomatik olarak durabilmektedir.
- Daha fazla yay tipi için testler yapılabilmektedir. Özellikle kalıp yaylarının ve rijitliği

yüksek benzer helisel yayların da testleri cihazla yapılabilmektedir.

- Cihazın en büyük üstünlüklerinden biri öngerilmesiz çalışma olanağıdır. Yani yaylara tam değişken yükleme yapılabilmektedir.

Yapılan bu çalışmada, yay yorulma deneylerinin yapılması için öncelikle, Burhan'ın (2010) tezinde belirtilen cihazdaki sabit olan eksantrik mekanizması hareketli konuma getirilmiştir. Bunun için, eksantrik olan mil yerine milin ucuna yeni bir aparat tasarlanarak bu aparata koza delikleri açılıp aşağı-yukarı hareket mesafesi sağlanmıştır. Yaya baskı yapacak olan mil tasarlanan aparata bağlanılıp, motordan gelen tahrik, kasnaklar vasıtasıyla mili döndürdüğü zaman sistem çalışmakta ve yaya baskı kuvveti uygulamaktadır. Yayların uçlarına yayların kırıldığını tespit edebilmek için bir algılayıcı takılabilmektedir. Bu sayede yay kırılınca motor durmaktadır. İstenilen kurs mesafesi 100 mm ile sabitlenmiştir. Ancak, yay boyuna göre istendiğinde 50 mm mesafedeki diğer bölmeye bağlantı yapılıp farklı stroklarda yaya baskı yapılabilmektedir. Yay boyu değiştiğinde, alt tabladaki ayar mekanizması ile ayarlama yapılıp test yapılabilmektedir.

KAYNAKLAR

1. Babalık F.C. ve Çavdar K. (2016) Makine Elemanları Ve Konstrüksiyon Örnekleri, Dora Yayınevi, Bursa**.**

2. Bayraktar A. ve Türker T. (2005) Deneysel Modal Analiz Yöntemi İle Düzlem Çerçevelerin Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi, Deprem Sempozyumu, Kocaeli, 1035-1041.

3. Berger C. Kaiser B. (2005) Fatigue Behavior of Technical Springs, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 36(11), 685–696. doi: 10.1002/mawe.200500940

4. Berger C. Kaiser B. (2006) Results Of Very High Cycle Fatigue Tests On Helical Compression Springs, *International Journal of Fatigue*, 28(11), 1658–1663. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2006.02.046

5. Burhan M. (2010) Eksantrik Yay Yorulma Cihazının Tasarımı Ve İmalatı, Yüksek Lisans Tezi, UÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

6. Bozacı A. (2005) Makine Elemanları Cilt 1, Çağlayan Kitabevi, İstanbul.

7. Del Llano-Vizcaya L. Rubio-Gonzalez C. Mesmacque G. Banderas-Hernandez A. (2006) Stress Relief Effect on Fatigue And Relaxation Of Compression Springs, *Materials and Design*, 28(4), 1330–1334. doi:10.1016/j.matdes.2006.01.033

8. Del Llano-Vizcaya L. Rubio-Gonzalez C. Mesmacque, G. Cervantes-Hernandez, T. (2005) Multiaxial Fatigue And Failure Analysis Of Helical Compression Springs, *Engineering Failure Analysis*, 13(8), 1303–1313. doi:10.1016/j.engfailanal.2005.10.011

9. Gönen, D. Oral, A. Cakır C.M. (2008) Çift Sıkıştırma Oranlı Yay Yorulma Test Cihazı Tasarım ve İmalatı, *BAÜ FBE Dergisi*, 10(1), 98–108.

10. Gönen D. Oral, A. Cakır, C.M. (2015) Investigating The Benefits of Using Circular Die Springs Instead of Rectangular Die Springs, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 38(7), 799-812, 2015. doi: 10.1111/ffe.12269

11. Kailas S.V., (2015). Chapter 8: Failure. Erişim Adresi: http://engineering108.com/Data/Engineering/Mechanical/Material_Science/Module8.pdf (Erişim tarihi: 2015)

12. Kaiser B. Pyttel B. Berger, C. (2010) VHCF- Behavior of Helical Compression Springs Made of Different Materials, *International Journal of Fatigue*, 33(1), 23–32. doi:10.1016/j.ijfatigue.2010.04.009

13. Kaymaz İ., Alsaran A., Hacısalihoğlu İ. (2015). Yorulma. Erişim Adresi: http://muhserv.atauni.edu.tr/makine/akgun/Docs/makel/Yorulma.pdf (Erişim tarihi: 2015)

14. Kumar R.B. Das K.S. Bhattacharya D.K. (2002) Fatigue Failure of Helical Compression Spring in Coke Oven Batteries, *Engineering Failure Analysis*, 10(3), 291–296. doi: 10.1016/S1350-6307(02)00075-4

15. Nie B. Zhang Z. Zhao Z. Zhong Q. (2013) Very High Cycle Fatigue Behavior of Shot - Peened 3Cr13 High Strength Spring Steel, *Materials and Design*, 50, 503–508. doi: 10.1016/j.matdes.2013.03.039

16. Özkan M.T. Dündar K. Gümüş, F. (2009) Bilgisayar Destekli Helisel Yay Tasarımı ve Sonlu Elemanlar Analizi, *TÜBAV Bilim Dergisi*, 2 (2), 199-210, 2009.

17. Pıhtılı H. Özler L. (1997) Yay Tellerinde Yorulma ve Yorulma Deneylerinde İzlenecek Temel Esaslar, *Mühendis ve Makine*, 38 (445), 38-41, 1997.

18. Puff R. Barbieri R. (2014) Effect of Non-Metallic Inclusions on the Fatigue Strength of Helical Spring Wire, *Engineering Failure Analysis*, 44, 441–454. doi: 10.1016/j.engfailanal.2014.05.013

19. Puff R. Bortoli, D.G.M. Bosco J.R. (2010) Fatigue Analysis of Helical Suspension Springs for Reciprocating Compressors, *International Compressor Engineering Conference*, July 12-15, Joinville, SC, Brazil.

20. Porteiro J.L. (2010) Spring Design Optimization with Fatigue, Yüksek Lisans Tezi, University of South Florida, Florida, ABD.

21. Pyttel B. Brunner I. Berger C. Kaiser B. Mahendran, M. (2013) Fatigue Behavior of Helical Compression Springs at a Very High Number of Cycles, *International Journal of Fatigue*, 60, 101–109. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2013.01.003

22. Schuller R. Karr U. Irrach D. Fitzka M. Hahn M. Bacher-Höchst M. Mayer H. (2015) Mean Stress Sensitivity of Spring Steel in The Very High Cycle Fatigue Regime, *Journal of Materials Science*, 50(16), 5514–5523. doi: 10.1007/s10853-015-9098-6

23. Serbino E.M. Tschiptschin A.P. (2013) Fatigue Behavior of Bainitic and Martensitic Super Clean Cr–Si High Strength Steels, *International Journal of Fatigue*, 61, 87–92. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2013.12.007

24. Sonsino C.M. Kaiser B. (2006) Course of SN-Curves Especially in The High-Cycle Fatigue Regime with Regard to Component Design and Safety, *International Journal of Fatigue*, 29(12), 2246–2258. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2006.11.015

25. Stone R. (2014). Fatigue Life Estimates Using Goodman Diagrams. Erişim Adresi: http://mw-ind.com/pdfs/GoogmanFatigueLifeEstimates.pdf (Erişim tarihi: 2015)

26. Subaşı M. Kafkas F. Karataş Ç. (2010) AISI 4140 Çeliğinde Sertlik Ve Kalıntı Gerilme İlişkisi, *2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi*, Kasım 11-12, Balıkesir.

27. Şahin S., Yorulma ve Aşınma (2015). Erişim Adresi: http://www2.cbu.edu.tr/salim.sahin/makine/malzeme_secimi/dersnotlari/6_ders.pdf (Erişim tarihi: 2015)