

## Aksiyomatik Tasarım Yaklaşımli Helisel Yay Dizaynı: Vaka Çalışması

### *Helical Spring Design with Axiomatic Design Approach: Case Study*

Mehmet Akif KARTAL<sup>1</sup> , Ahmet FEYZİOĞLU<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Uzaktan Eğitim Uygulama ve Araştırma Merkezi

10200 Bandırma, Balıkesir

<sup>2</sup>Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği, Üretim Planlama ve Kontrol Bölümü 34722

Kadıköy, İstanbul

#### Öz

Aksiyomatik Tasarım yaklaşımı, farklı nesnelere vaka çalışması yapılarak gerçekleştirilmektedir. Bu vaka çalışmasında ki gerçekleştirilen ana hedef; tasarım aşamasında göz önüne alınan dayanımı da hesaba katarak yaydaki kütleyi ve üzerinde oluşan kesme gerilmelerini en aza indirmektedir. Bu yay problemi; Aksiyomatik Tasarım metodolojisinin bağımsızlık aksiyomu kullanılarak incelenmektedir. Ayrıca, semangularity (anlamsallık) ve reangularity (doğrusallık) kavramları kullanılmaktadır. Bu kavramlarla birleşik ve ayrışık çözümleri bulmak amacıyla tasarım matrisleri oluşturuldu. Aksiyomatik tasarımda bir takım kabul edilebilir tasarım parametreleri değerleri gözlemlenmiştir. Bu parametreler uygun toleranslar verilerek kabul edilmiştir. Grafikselleştirilmiş sonuçların birbiriyle uyumlu olup olmadığını görmek amacıyla kontrol edilmiştir. Sonuç olarak; tasarım için kabul edilebilir özellikli, minimum maliyetli, dayanıklı ve sağlam bir yay tasarımı gerçekleştirilerek farklı sınır değerlerindeki değişimler irdelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Aksiyomatik Tasarım, Mekanik Yay, Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri

#### Abstract

The Axiomatic Design approach was carried out by making case studies with different objects. The main goal achieved in this case study is; to minimize the mass in the spring and the shear stresses that occur on it, taking into account the strength considered along the design phase. This spring problem; is examined using the independence axiom of the Axiomatic Design methodology. In addition, the concepts of semangularity and reangularity were used. Design matrices were created to find unified and separate solutions for these concepts. Some acceptable values of design parameters were observed in the decoupled design. These parameters have been accepted by giving appropriate tolerances. Graphical and numerical results were checked to see if they were compatible with each other. In conclusion; For the design, the changes in different limit values were examined with performing an acceptable, minimum cost, durable and robust spring design.

**Keywords:** Axiomatic Design, Mechanical Spring, Multi-criteria Decision Making Methods

## I. GİRİŞ

Günümüzde üretim sektöründe yer alan firmalar ürün tasarımı aşamasında birçok hedeflerin karşılanmasını gereklilik olarak görmektedir. Birçok çok amaçlı yaklaşımlar bu nedenle kullanılmaktadır ve aktif bir şekilde kullanılmaya devam etmektedir. Ürün tasarımı esnasında, yeni metodlar karar verme sürecinde yardımcı olmak için geliştirilmiştir. Suh'un Aksiyomatik Tasarım modeli en çok kabul görenlerindedir. Ayrıca ürün tasarımı esnasında, dayanımın tasarım hesaplarına dahil edilmesi ideal bir çözüm olarak kabul edilir. Bu kabullenmelere karşın birçok girişim, ürünün sağlamlığını arttırmakla beraber ürün geliştirme ve test aşamalarını da etkileyerek pozitif katkılarda bulunmaktadır. Tasarımcılar tarafından parçaların tasarımı gerçekleştirilirken; bütün boyutlara tolerans değerleri atanmalı ve buna ek olarak bütün girdi ve çıktılarının değişkenlikleri dikkate alınmalıdır. Atanan toleranslar, en azından istatistiksel açıdan sistemin girdilerinin varyasyonlarına rağmen beklenen sonuçlara yönelik

çalışmaları sağlamak zorundadır. Genellikle tolerans değerlerinin atamasını sağlayan tasarım mühendisleri ile üretimin kontrolünü sağlayan üretim mühendisleri arasında tolerans kaynaklı bir tür çatışmalar gerçekleşmektedir. Bu çatışmanın çözümü ancak tasarım mühendislerinin atanacak toleransları optimizasyon probleminde kullanmasıyla bulunabilmektedir. Üretim toleranslarına bağlı kalınarak, diğer toleranslarda esneklikler sağlanabilmektedir. Böylelikle sistemin çıktısını nasıl etkilediği anlaşılabilir.

Bu çalışmada, tasarım aşamasında matematiksel modellemenin sağlamlık ve dayanıma entegrasyonu ile birlikte bir yay tasarımı problemi çözülecektir. Bu problem çözümünde Aksiyomatik Tasarım yaklaşımı yeni belirlenen çoklu hedefler ile tamamlayıcı bir şekilde formüle edilecektir.

### 1.1. Literatür Araştırması

Aksiyomatik Tasarım; 20. Yüzyılın son çeyreğinde ilk zamanlarda ürün tasarımına yönelik gelişmelerle ilgili olarak ortaya atılmıştır. Ürünlerin yanı sıra sistemi, organizasyonları, imalat, esnek üretim sistemlerini, hücreli üretim ve ergonomi gibi birçok alana etki etmiştir ve çalışmalar yapılmaya başlamıştır [1]. Cochran ve Reynal; imalat sistemlerinin tasarımlarını gerçekleştirmek amacıyla Aksiyomatik Tasarım kullanmışlardır. Gerçekleştirilen çalışmada Aksiyomatik Tasarım iki farklı işlevsel gereksinim, farklı üretim sistemleri için performans analizini gerçekleştirmek amacıyla kullanılmıştır [2]. Suh ve arkadaşları; endüstriyel anlamda müşteri talepleri sonucunda alternatif bir üretim sisteminin tasarımını Aksiyomatik Tasarım (AD) metodu kullanılarak gerçekleştirmişler [3]. Babic; Suh' un geliştirdiği Aksiyomatik Tasarım metodu vasıtasıyla Flexible Manufacturing System (FSM-Esnek İmalat Sistemi-EİS) tasarımı amacıyla geliştirilen bir zekâ sistemini (FLEXY) içeren çalışmalar gerçekleştirmişler [4]. Bröte ve diğerleri hücreli üretim çalışmalarında Aksiyomatik Tasarım metodundan faydalanmışlar [5]. Cochran ve arkadaşları; üretim konusunda organizasyon yapısında yalın yönetim ve değişim yönetimi prensiplerini kullanarak Aksiyomatik Tasarım metodu yöntemi ile oldukça faydalı bir üretim sistemi tasarımı hedeflemiştir. Gerçekleştirilen çalışmada üretim sistemi küçük, hareket kabiliyeti yüksek ve tek merkezden yönetilme gereksinimi duyulmayan üretim sistemlerine dönüştürülebilir bir çalışma ortaya koymuşlardır [6]. Chen ve diğerleri; hücreli üretim performansını iyileştirmek adına bir tür simülasyon aracılığı ile Aksiyomatik Tasarım metodu vasıtasıyla bir tür karar destek sistemi geliştirmişler [7]. Werneman ve diğerleri; Aksiyomatik Tasarım metodu aracılığıyla operasyonel gelişim prototipi geliştirmişler [8]. Cha ve Moon; AD metodu aracılığıyla hava değişim-dağıtım sistemi tasarlamışlardır [9]. Engelhardt; sistem ve ürün geliştirilmesi hususunda Aksiyomatik Tasarım metodundan faydalanmışlar [10].

Suh; Aksiyomatik Tasarım amaç ve uygulamaları içerisinde tasarımı gerçekleştiren kişilere mantıksal ve teoriksel fikir verme süreçleri sunmuştur. Yapılan çalışmada tasarım hususunda gerçekleştirilen çalışmalara bilimsel anlamda bir yapı taşı olmuştur [11]. Cotoia ve Johnson; gerçekleştirdiği araştırmada sistemlerin belirli bölgelerinde problem oluşturan bir prosesi incelemiş ve prosesi AD metodu prensiplerinden faydalanarak çözmeye çalışmışlardır [12]. Baxter ve diğerleri; Aksiyomatik Tasarım metodu kuralları aracılığı ile tedarik zincirinin birçok parçalarının ekonomik değerlerinin ve ulaştırılma süreçlerinin analizlerinin yorumlanmasını gerçekleştirmişler [13]. Housmand ve Jamshidnezhad; Yalın Üretim Sisteminin kavramsal tasarımı ile ilgili yaptığı çalışmada Aksiyomatik Tasarım metodunu kullanmıştır [14]. Hwang ve diğerleri; AD yönteminin fonksiyonel ihtiyaçlarını karşılaştırılarak bu ihtiyaç kriterlerinin bağımsızlığının, tasarım kalitesinin etkilerinin belirlenmesine yönelik önem kriterlerinin belirlenmesini incelemiş ve çalışmalar yürütmüştür [15].

Kim; Aksiyomatik Tasarım metodu aracılığı ile üretim sistemlerinin tasarımı ve ürün tasarımının geliştirilmesini amaçlamıştır. Yapılan çalışmada yeni ürün gelişimi prosesinde tasarımı olumsuz etkileyen problemleri tasarımın iyileştirilmesi adına belirlemeye çalışmış, bu problemleri en aza indirmek ve oluşabilecek sorunları çözmeyi hedeflemiştir [16]. Durmuşoğlu ve Kulak; hücreli üretim tasarımı için aksiyomatik tasarım yönteminden faydalanmış ve bu alanda geliştirmeleri içeren bir rehber sistem ortaya çıkarmışlardır [17].

Pappalardo ve Naddeo; Aksiyomatik Tasarım metodu aracılığı ile hata etkileri analizi hususunda çalışmalar gerçekleştirmişler [18]. Yaşar ve diğerleri; Bilgi Yönetimi konusunda Aksiyomatik Tasarım metodunu kullanmış olup bilgi yönetim sistemi geliştirmişler [19]. Kulak ve diğerleri; hücreli üretim sistemi kurulumu için çok kapsamlı bir yol haritasını Aksiyomatik Tasarım metodu vasıtasıyla gerçekleştirmişler [20]. Kabadurmuş ve Durmuşoğlu; yalın üretim sistemi türlerinden birisi olan kanban (çekme) üretim kontrol sisteminin tasarımı için Aksiyomatik Tasarım metodundan faydalanmışlar [21]. Tarcan; bir grup dizüstü bilgisayar sistemi oluşturmuş ve seçimini gerçekleştirmek adına Aksiyomatik Tasarımın Bilgi Aksiyomunu kullanmıştır [22].

Thielman ve Ge; mühendislik sistemlerinin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi konusunda Aksiyomatik Tasarım metodunu uygulamışlardır [23]. Birgün; yalın üretime geçiş aşamalarında değer akışını haritalandırmak adına AD metodundan faydalanmıştır. Yapılan çalışmada endüstriyel fayda sağlayan firmalara üretimin daha verimli ve sistematik çalışmasını gerçekleştirecek bir rehber sistem oluşturmuştur [24]. Yılmaz; yaptığı çalışmada kent içi toplu taşıma

sisteminin tasarımının oluşturulmasında AD metodundan faydalanmıştır [25]. Özel ve Özyörük; beyaz eşya faaliyet gösteren firmalar için ısı rezistansı üretimi gerçekleştiren tedarikçiler arasından seçim yapmışlardır. Bu seçimi gerçekleştirmek adına analitik hiyerarşi prosesi ve aksiyomatik tasarım metodundan faydalanmıştır [26]. Özyiğit; yaptığı çalışmada belirlenmiş değerler ışığında bir grup kontrol sistemi belirlemiş ve bunlar içerisinde en iyi kontrol sistemi seçimini ve tasarımını AD metodu kullanarak gerçekleştirmiştir [27].

Özel ve Özyörük; hiyerarşik tedarikçi firma seçimine yönelik yapılan çalışmada Aksiyomatik Tasarım metodundan faydalanmış olup, bu seçimi gerçekleştirmek adına bilgi aksiyomunu kullanmışlardır. Yapılan çalışmada bir tür karar destek sistemi oluşturmuşlardır ve tedarikçiler arasında en az bilgi içeriğine sahip tedarikçi firmayı seçmeye yönelik bir sistem oluşturmuşlardır [28]. Gülen ve Birgün; Key-Value Store olarak adlandırılan veri depolama paradigması modeli için kurumsal bilgi sistemi alanında Aksiyomatik Tasarım metodundan faydalanmışlardır [29]. Birgün ve Kulaklı; müşteri merkezli bilgi yönetimi oluşturmak adına Aksiyomatik Tasarım metodundan faydalanmışlardır [30].

Kanbur ve Birgün; yeni kariyere geçiş danışmanlığının geliştirilmesi adına bilimsel anlamda bir yapı taşı oluşturmak adına kavramsal bir modeli Aksiyomatik Tasarım metodu aracılığı ile incelemişlerdir [31]. Çebi ve diğerleri; bütünleşmiş bakım ve onarım sisteminde Aksiyomatik Tasarım metodunun Bilgi Aksiyomu aracılığıyla incelemişlerdir. Gerçekleştirilen çalışmada endüstriyel fayda sağlayan gemiler için daha geniş kapsamlı ve daha etkin bakım-onarım sistemi oluşturmuşlardır [32]. Urbanic ve diğerleri; tersine mühendislik yöntemiyle üretilmesi planlanan bir parçanın üretiminde Aksiyomatik Tasarım metodu kullanmışlardır. Gerçekleştirilen çalışmada çoklu üretim için tasarım değişkenlerini belirleyen ve tasarımı iyileştiren, çok fonksiyonlu, sağlıklı, güvenilir, data devşirmek amacıyla oluşturulmuş bir sistem tasarımı geliştirilmişlerdir [33]. Çelik ve Er; Aksiyomatik Tasarım metodu vasıtasıyla model seçim dizilimini gerçekleştirmişlerdir [34]. Çelik ve diğerleri; Aksiyomatik Tasarım ve bulanık TOPSIS sistemi vasıtasıyla deniz taşımacılığı şebekesinde rekabetçi ve yarışmacı sistem kurmayı hedeflemişlerdir [35]. Bang ve diğerleri; Aksiyomatik Tasarım metodu vasıtasıyla parça üretimi aşamasında kullanılan soğutma sıvılarının güçlendirilmesinde nanoakışkan materyal tasarımının yeniden oluşturulmasını gerçekleştirmişlerdir [36].

Özbek; Aksiyomatik Tasarım metodu aracılığı ile plastik enjeksiyon makinelerinin seçimini incelemiştir [37]. Yavuz; yaptığı çalışmada makine ekipman seçimine yönelik araştırmalarını Aksiyomatik Tasarım aracılığı ile tamamlamıştır [38]. Güngör; endüstride

oldukça geniş bir alana sahip olan sızdırmaz conta malzemesinin seçimine yönelik yaptığı çalışmada Aksiyomatik Tasarım metodundan yararlanmıştır [39]. Ulutürk ve diğerleri; savunma alanında yaptığı çalışmada yenilikçi ürün gelişimini Aksiyomatik Tasarım metoduna bağlı olarak incelemiş ve ürün geliştirme anlamında bir sistem tasarımı ortaya koymuştur [40].

Çözümlere göre kütle ve kayma gerilimi arasında bir denge vardır. Yayın kütlesi bobin sayısı arttıkça artar. Öte yandan kayma gerilmesi bobin sayısı arttıkça azalmaktadır. Kısıtlamaları karşılayan en iyi tasarım çözümü 9 bobinden oluşmaktadır. İki metodoloji  $N = 9$ 'a göre karşılaştırıldığında, çok amaçlı aksiyomatik ve gürbüz tasarım çözümü, elde edilen tolerans aralığı ile daha optimal ve sağlam çözüm seti vermektedir. Gelecekteki iyileştirmeler için aksiyomatik tasarım yaklaşımına farklı metodolojiler entegre edilebilir. Bu sayede sistem gürültü faktörlerine karşı daha sağlam ve dayanıklı olacaktır.

## II. MATERYAL VE METOD

### 2.1. Metodoloji- Çoklu Hedef Tasarımı

Gerçek hayatta karşılaşılan mühendislik problemlerinde, çözümler nadiren tek bir amaca yöneliktir. Optimize edilmesi gereken birçok hedef mevcuttur. Bunlardan sadece birinin optimize edilmesi hedefin zayıflamasına yol açabilir [41]. Tüm hedeflerin karşılandığı bir çözüm elde edebilmek için farklı kriterleri göz önünde tutmak gerekir. Çok amaçlı tasarım yaklaşımı, her tasarım kriterine dayalı bir ölçütün atanmasını sağlar [42]. Mühendislik problemlerinde her çözüm bu şekilde değerlendirilir.

### 2.2. Aksiyomatik Tasarım

Aksiyomatik Tasarım; tasarımı yapan kişilerin kötü tasarımlarda meydana gelen problemlere odaklanmasını sağlamayı hedefleyen bir yöntemdir. Bu yöntemde asıl amaç; tasarımı gerçekleştirecek kişileri daha yaratıcı hale getirmek, yapılan araştırmaları daha verimli hale getirmek, yapılan deneme-yanılma oranlarını en aza çekmek, en iyi dizayna karar verebilmektir. Doğruluğu ispat edilmeyen veya ispat edilmeye gerek duyulmayan doğruluğu kabul edilen önermelere aksiyom ya da postulat denilmektedir. Aksiyomatik Tasarım metodunun kökeninde iki temel aksiyoma dayanmaktadır ve bu aksiyomlar bağımsızlık ve bilgi aksiyomu olarak bilinmektedir. Bağımsızlık aksiyomu fonksiyonel ve fiziksel alandaki karar verme prosesinde önem arz etmektedir. Bilgi aksiyomu ise üretimsel faaliyetlerde daha çok seçim amaçlı kullanılmaktadır. Bu tasarım yönteminde, müşteri ihtiyaçları fonksiyon gereksinimlerine çevrilir (Functional Requirements-FRs). Daha sonra her bu fonksiyon gereksinimlerine (FR) uygun bir tasarım parametresi (Design Parameter-DP) atanır [1]. Bu atama aksiyomatik tasarım yaklaşımının bağımsızlık aksiyomuna göre yapılır. Bağımsızlık aksiyomunda; tasarım parametrelerinin ve fonksiyonel

gereksinimlerinin, diğer fonksiyonel gereksinimleri etkilemeden karşılık gelen fonksiyonel gereksinimleri karşılamak için tasarım parametrelerinin ayarlanabileceği şekilde ilişkili olduğunu belirtmektedir. Zikzak çizmek; fonksiyon gereksinimlerini tasarım parametrelerine dönüştürmede sıralı bir şekilde kullanılan bir sistemdir. Burada fonksiyon hiyerarşileri kullanılır. Dönüşüm en yüksek kademeden en alt kademeye doğru ayrı ayrı ağaç fonksiyonunun her kademesinde yapılır. Tasarım parametreleri ve fonksiyonel gereksinimler arasındaki etki alanları arasındaki bu değişim herhangi bir karışıklık yaratmadan veya gereksiz öğeleri azaltarak gerçekleşir.

Bilgi aksiyomunda; en iyi tasarım ve en az bilgi içeriğine sahip bir işlevsel ayrışık tasarım olduğunu bildiren temel aksiyomlardan biridir. Asgari bilgi demek; üretim, dağıtım ve ürünle ilgili diğer işlemleri takip etmenin nispeten daha kolay olduğu anlamına gelmektedir. Buna ek olarak simetrisinin olması da bilgi içeriğini azaltabilmektedir. Bu yöntemde; matematiksel hesaplamalar en iyi tasarımı bulmak için yapılır. Bu hesaplamalar, yay örneğinde bir sonraki bölümlerde sunulacaktır.

### 2.3. Yay Tasarım Örneği

Aksiyomatik Tasarım yaklaşımında, probleme yönelik üç tasarım parametresi ile sıkıştırma yayı tasarlanacaktır. Probleme yönelik üç tasarım parametresi (DP); tel çapı (d), bobin çapı (D), ortalama ve aktif rulo (Na) sayısıdır. Burada 62.3 N çalışma yükü (P) altında 12.7 mm sapma ( $\delta_{max}$ ) ile 44.45 mm' lik serbest uzunluğu (Lf) olması gereken uygulamada bu yay kullanılması planlanmıştır. Tasarım gerilimi ( $\tau_d$ ) en az 896.31 MPa olmalıdır ve yayın katı uzunlukta izin verilen maksimum gerilimi ( $\tau_a$ ) de 1034.21 'den daha az olmamalıdır. Yay 15.24 mm çaplı (D) bir deliğe monte edilecek ve yay için aşırı gerilim dalgalarının ( $f_n$ ) sıklığı en az 100 Hertz (Hz) olması gerekmektedir. İnaktif bobin sayısı; Q 2' dir. Aynı zamanda, uygun rulo açıklık ve eğim açısının  $\alpha$  temin edilmesi istenir. Yukarıda belirtilen diğer şartları sağlayan, kütle ve işletim yükü altında kesilme baskısı en az olacak şekilde yay tasarlanmalıdır. Bu problemi formüle etmek için, aşağıda yer alan malzeme özellikleri, Goel ve Singh sabitlerine dayalı olarak kullanılmıştır [43]. Bunlar; kayma modülü G(80.85 GPa); kütle yoğunluğu  $\rho$ (7888.77 kg/m<sup>3</sup>); yerçekimi sabiti g(9.81 m/s<sup>2</sup>) ve özgül ağırlığı  $\gamma$  (77.389kN/m<sup>3</sup>) olarak atanmıştır.

İleride ki hesaplamalarda kullanılan ve Shigley 'den alınan yay formülleri [44]:

Yay İndeksi (C)

$$C = \frac{D}{d} \quad (1)$$

Eğim (p)

$$p = \frac{(L_f - 2d)}{N} \quad (2)$$

Kayma Modülü (G)

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (3)$$

Bobin Açıklığı (cc)

$$cc = \frac{(L_0 - L_s)}{N_a} \quad (4)$$

Yay Sabiti (k)

$$k = \frac{G d^4}{8D^3 N_a} \quad (5)$$

Maksimum Sapma ( $\delta_{max}$ )

$$\delta_{max} = L_f - L_s \quad (6)$$

Maksimum Yük ( $P_{max}$ )

$$P_{max} = k \cdot \delta_{max} \quad (7)$$

Kayma Gerilmesi ( $\tau_{max}$ )

$$\tau_{max} = \frac{8DP}{\pi d^3} \quad (8)$$

Wahl Düzeltme Faktörü ( $K_w$ )

$$K_w = \frac{4D - d}{4D - 4d} + \frac{0.615d}{D} \quad (9)$$

Düzeltilmiş Maksimum Kayma Gerilmesi ( $\tau_{max}'$ )

$$\tau_{max}' = K_w \tau_{max} \quad (10)$$

Yay Kütleli (M)

$$M = \frac{1}{4(N + Q)\pi^2 D d^2 \rho} \quad (11)$$

Doğal Frekans ( $f_n$ )

$$f_n = \frac{d}{2\pi D^2 N_a} \sqrt{\frac{G}{2\rho}} \quad (12)$$

Eğim Açısı ( $\alpha$ )

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{p}{\pi D} \right) \quad (13)$$

Son olarak; problem açıklamalarındaki kısıtlamalar:

$$\frac{8PD^3 N}{G d^4} = 12.7, \quad (14)$$

$$\frac{d}{2\pi D^2 N} \sqrt{\frac{G}{2\rho}} \geq 100 \quad (15)$$

$$\frac{L_0 - L_s}{N} \geq \frac{d}{10} \quad (16)$$

$$\frac{8PD}{\pi d^3} \left( \frac{(4D - d)}{(4D - 4d)} + \frac{0.651d}{D} \right) \leq 896.31 \text{ N/m}^2 \quad (17)$$

$$\frac{d G (L_f - dN)}{\pi D^3 N} \left( \frac{(4D - d)}{(4D - 4d)} + \frac{0.651d}{D} \right) \leq 1034.21 \quad (18)$$

$$\frac{(N + Q)\pi^2 D d^2 \rho}{4} \leq 385 \quad (19)$$

$$D + \left( \frac{11}{10} \right) d \leq 15.24 \text{ mm} \quad (20)$$

$$\frac{D}{d} \geq cc \quad (21)$$

N negatif tamsayı olduğunda. Buna ek olarak;

$$d > 1.27 \text{ mm} \quad (22)$$

$$2d < D < 25.4 \text{ mm} \quad (22)$$

Yukarıdaki kısıtlamalardan kaynaklı olarak; üç adet Fonksiyonel Gereksinimler (FRs) çizilir.

Bunlar: Kütle (M); Kayma Gerilmesi ( $\tau_{max}$ ) ve Sapma ( $\delta$ )'dır.

#### 2.4. Denklemlerin Türetilmesi

Bu bölüm içerisinde matematiksel modeller sunulacaktır. Bu modellerle Fonksiyonel Gereksinimlere (FRs) bağlı olarak kesme gerilmesi ve kitle denklemleri yanı sıra reangularity ve semangularity ilişkileri elde edilmiştir.

Yukarıda belirtilen üç adet fonksiyonel gereksinimlerden, iki tanesi oldukça önem arz etmektedir. Bunlardan ilki yay kütesidir. Yay kütesi maliyeti doğrudan etkileyen bir faktördür. İkinci olarak kayma gerilmesidir. Kayma gerilmesi herhangi bir kopmaya yol açacak olan bükülmeden kaynaklı olarak meydana gelebilmektedir. Yukarıda belirtilen sapma ise tolere edilebilmektedir.

Bu iki önemli Fonksiyonel Gereksinimler (FRs): Kütle (M) ve Kayma Gerilmesidir.

( $\tau_{max}$ );

$$M = \frac{1}{4N_T \pi^2 D d^2 \rho} \quad (23)$$

$$\tau'_{max} = \frac{8PD}{\pi d^3} \left( \frac{(4D-d)}{(4D-4d)} + \frac{0.651d}{D} \right) \quad (24)$$

Bu iki fonksiyonel gereksinimler için, iki adet Tasarım Parametresi ( $DP_1$ ) ve  $DP_2$  seçildi.

Bunlar; Bobin Çapı (D) ve Tel Çapı (d) 'dır.

$$DP_1 = D \quad (25)$$

$$DP_2 = d \quad (26)$$

Aksiomatik denklem olarak;

$$\begin{Bmatrix} M' \\ \tau'_{max} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} \quad (27)$$

Yukarıda yer alan denklemde sol taraf; boyutsuz formda fonksiyonel gereksinimleri belirtir. "x" ve "y" sırasıyla kablo çapı ve sargı çapının boyutsuz formlarıdır.

Denklemin sağ tarafında yer alan 2x1 matrisi, boyutsuz formda tasarım parametrelerini belirtir.

Denklemden yer alan 2x2 matrisi ise tasarım matrisidir, A; Lineer olmayan fonksiyonel gereksinimler ve tasarım parametreleri olarak yer alır. A matrisinin Aij elemanları olarak ifade edilebilir;

$$A_{ij} = \frac{\partial FR_i}{\partial DP_j} \quad (28)$$

Bu A matrisinin elemanlarını;

$$A_{11} = y^2 z \quad (29)$$

$$A_{12} = 2xyz \quad (30)$$

$$A_{21} = \frac{K'_w(X,Y)}{y^3} \quad (31)$$

$$A_{22} = -3x \frac{K'_w(X,Y)}{y^4} \quad (32)$$

Bu bağıntılara ek olarak tasarım parametreleri (DP) ve fonksiyonel gereksinimler (FRs) arasındaki ilişkinin boyutsuz formları şu şekilde hesaplanabilmektedir:

$$M' = xy^2 \quad (33)$$

$$\tau'_{max} = \frac{x}{y^3} K_w(X,Y) \quad (34)$$

Denklemlerde yer alan "x" ve "y" değerleri atanmasının amacı; A tasarım matrisinin bir diagonal (uncoupled) ya da üst veya alt üçgen (deuncoupled) matrisine indirgenmesidir [45].

Problemde optimum çözüm bulma konusunda yardımcı olmak için, fonksiyonel parametrelerin bağımsızlığını kuantize edebilmek için iki temel kavram yer almaktadır. Bu kavramlar reangularity ve semangularity olarak adlandırılır. Reangularity, R, aşağıda yer alan denklem aracılığı ile elde edilir [1].

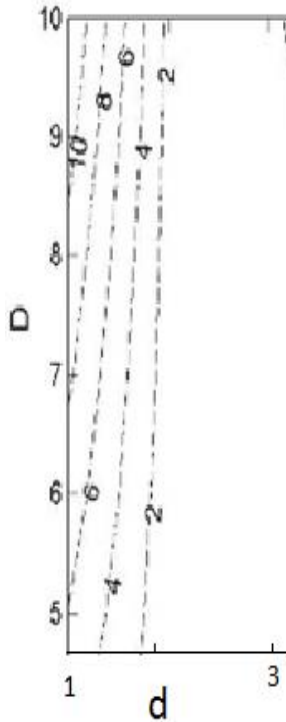
$$R = \left[ 1 - \frac{(A_{11}A_{12} + A_{21}A_{22})^2}{(A_{11}^2 + A_{21}^2) \cdot (A_{12}^2 + A_{22}^2)} \right]^{1/2} \quad (35)$$

Ek olarak, Semangularity, S,

$$S = \frac{|A_{11}|}{(A_{11}^2 + A_{21}^2)^{1/2}} \cdot \frac{|A_{22}|}{(A_{12}^2 + A_{22}^2)^{1/2}} \quad (36)$$

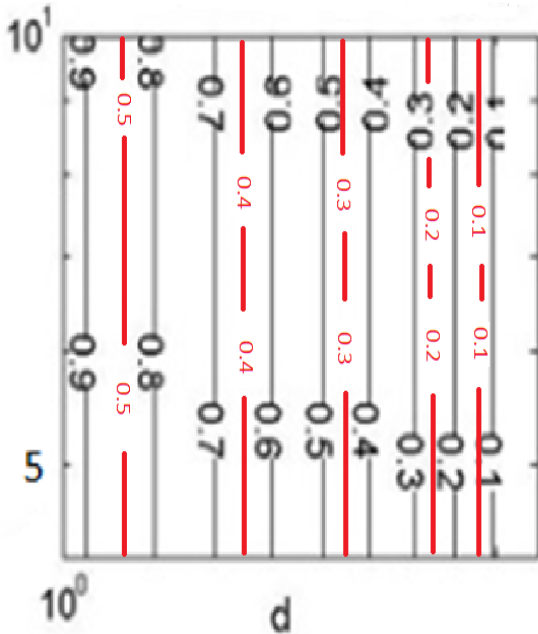
Eğer R ve S, 1'e eşit ise; tasarım uncoupled tasarımdır. Uncoupled tasarım çözümü en iyi ve verimli çözümdür. Buna rağmen nadiren elde edilebilmektedir. Bu çözüm için tasarım matrisine karşılık gelen matris; diagonal matristir. Eğer R, S'ye eşit olduğunda ve 1'e eşit olmamak kaydıyla; tasarım yaklaşımı decoupled tasarımdır. Decoupled tasarım yaklaşımı da kabul edilebilir bir çözüm türüdür. İlgili tasarım matrisi üst ve alt üçgen matrisidir [45]. Kütle dizini ve tasarım parametrelerinin (DP) şekli çözüm yaklaşımları uncoupled ve decoupled tasarım yaklaşımları olduğu durumlarda alanları görmek adına kullanılabilir (Şekil 1).

Eğer fonksiyonel gereksinimler (FRs) çizgileri (contour) birbirlerine dikey olup, tasarım parametreleri (DP) eksenine paralel ise, burada bir tür uncoupled tasarım yaklaşımı çözümü olduğu anlamına gelmektedir [1]. Şekil 1 'de de görüldüğü gibi bu problem adına bir çözüm bulunmamaktadır.



Şekil 1: MATLAB’de çizilmiş kütle hatları (kg)

MATLAB ‘de eksen olarak kullanılan tasarım parametreleri (DP) ile açısallık ve anlamsallık konturları çizildi (çizgileri oluşturuldu) (Şekil 2.).



Şekil 2: Doğrusallık ve Anlamsallık Kontörleri

Şekil 2’de Reangularity (Doğrusallık) siyah çizgiler ile; Semangularity (Anlamsallık) kırmızı çizgiler ile; D ve d log- ölçeğinin çizgileri [mm] ölçülerde belirtilmiştir. Şekil 1’ de belirtildiği üzere; 2 adet fonksiyonel gereksinimler (FRs) genel olarak coupled tasarım yaklaşımıdır. Bununla beraber şekil 2 ve 3 ‘den tasarım parametreleri (DP) alanında S ve R 1 ‘e yaklaşırken

belirli alanlar görülebilmektedir. Bu alanlar; iki kritik fonksiyonel gereksinimlerin (FRs) decoupled tasarım olduğu alanlardır. Görüldüğü gibi, S=1.778 mm ve R=15.24 mm R çapında d ve D değerlerine yakındır.

Denklem 27’de Fortran’ da tasarım matrisi (A) ile kontrol edildiğinde, iki adet decoupled çözüm değeri verir. Bir sonraki adım olarak; sapma ( $\delta$ ) ve aktif bobinler sayısı (N); sırası ile üçüncü fonksiyonel gereksinimler (FRs) ve tasarım parametreleri (DP) olarak eklenir.

$$z = N \quad (37)$$

Sapma ( $\delta$ ) ‘nın boyutsuz formu;

$$\delta' = \frac{x^3 z}{y^4} \quad (38)$$

şeklinde hesaplanır.

Aksiyomatik tasarım denklemin karşılık gelen eşitlik;

$$\begin{Bmatrix} M' \\ \tau_{max}' \\ \delta' \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} \quad (39)$$

Buradan sonuçla;

$$A_{ij} = \frac{\partial FR_i}{\partial DP_j} \quad (40)$$

$$A_{11} = y^2 z \quad (41)$$

$$A_{12} = 2xyz \quad (42)$$

$$A_{13} = xy^2 \quad (43)$$

$$A_{21} = \frac{K'_w(X, Y)}{y^3} \quad (44)$$

$$A_{22} = -3x \frac{K'_w(X, Y)}{y^4} \quad (45)$$

$$A_{23} = 0 \quad (46)$$

$$A_{31} = \frac{3x^2 z}{y^4} \quad (47)$$

$$A_{32} = -\frac{4x^3 z}{y^5} \quad (48)$$

$$A_{33} = \frac{x^3}{y^4} \quad (49)$$

Denklem 39’da yer alan tasarım matrisini;

$$x=5$$

$$y=7$$

$$z=9 \text{ değerleri ile Fortran’ da çözümler elde edilmiştir.}$$

decoupled tasarım çözümleri elde edilmiştir.

$$[A] = \begin{bmatrix} X & X & X \\ 0 & X & 0 \\ X & X & 0 \end{bmatrix} \quad (50)$$

X sıfır olmayan değerler. Boyutsuz x, y, z, değerleri dönüştürmede DP;

D=12.7 mm

d=1.778 mm

N=9 değerlerini vermektedir.

Eğer Denklem 39 daha sembol bir şekilde yazılırsa;

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & X \\ 0 & X & 0 \\ X & X & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix} \quad (51)$$

Buna ek olarak fonksiyon gereksinimler aşağıdaki gibi de yazılabilir:

$$FR_1 = C_1 DP_1 + C_2 DP_2 + C_3 DP_3 \quad (52)$$

$$FR_2 = C_2 DP_2 \quad (53)$$

$$FR_3 = C_1 DP_1 + C_2 DP_2 \quad (54)$$

Tasarım parametreleri (DP) ve fonksiyonel gereksinimler (FRs) arasındaki bağımsızlığı Denklem 51; Denklem 52 ve Denklem 53 göstermektedir. Denklem 51' de kütle, tasarım parametrelerinin üç faktörden de etkilendiği belirtilmiştir. Sapma, tel çapı ve bobin çaplarını etkiler. Bununla beraber, aktif rulo sayısı (Denklem 53) bağımsızdır. Çözüm için gerçekleştirilen analiz aracılığıyla kazanılan bağımsızlıklar; tasarım açısından büyük avantajlar sağlamaktadır. Sırasıyla FR2, FR3 ve FR1 sağlanarak tasarım gerçekleştirilebilmektedir.

### III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma için çözümler; Aksiyomatik Tasarım ve çok amaçlı bir tasarım yaklaşımı kullanılarak belirlenmiştir. Aksiyomatik Tasarım çalışmasında; tasarım parametreleri ve fonksiyonel gereksinimler için optimum değerler Tablo 1' de belirtilmiştir. Çözümlenelerde Denklem 50, Denklem 51, Denklem 52 ve Denklem 53'ten yararlanılmıştır.

**Tablo 1:** Aksiyomatik Tasarım yaklaşım çözümü

| D [m] | d [m] | N # | Def. [mm] | Mass [g] | Stres [MPa] | Frekans [Hertz] | Spr. Höl [m] | Spr. İndex |
|-------|-------|-----|-----------|----------|-------------|-----------------|--------------|------------|
| 12.7  | 1.778 | 9   | 11.684    | 22.226   | 432.92      | 302.5           | 14.65        | 7.14       |

Genel olarak; yay indeksi oranı 6 ile 12 arasında değişim gösterir ve bu kısıtlama karşılandı. Frekans değerinin 100 Hertz' den fazla olması arzulanan bir değişkendir ve bu kısıtlama da karşılandı. Son olarak, en önemli kısıt; yay delik çapı  $\bar{D} = 15.24 \text{ mm}$  'den küçük olmalıdır.

Uygun toleransları bulmak adına güçlü tasarım çözümleri ile desteklemeler sağlandı. Farklı tolerans aralıkları her aralık için maksimum ve minimum kütle ve kayma gerilmesi değerleri hesaplanarak denemeler

gerçekleştirildi. İstenen %95'lik güvenilirlik nedeni ile; nominal fonksiyonel gereksinim değerlerinden uygun sapmayı sağlayan en küçük tolerans aralığı hesaplandı. Nominal tasarım parametreleri ile beraber bu tolerans aralığı Tablo 2' de verilmiştir. Eğer bu tasarım parametrelerin değerleri bu aralıkta kalırsa, fonksiyonel gereksinimleri oluşturan değerler gürültü faktörü için yeterli duyarsızlık göstermektedir.

**Tablo 2:** Çok amaçlı Aksiyomatik Tasarım yaklaşımı çözümleri

| ÇOK AMAÇLI TASARIM YAKLAŞIMI        |       |       |     |          |          |             |               |              |           |
|-------------------------------------|-------|-------|-----|----------|----------|-------------|---------------|--------------|-----------|
| $T_D = 0.1$<br>$T_d = 0.02$<br>[mm] | D [m] | d [m] | N # | Def. [m] | Mass [g] | Stres [MPa] | Freq. [Hertz] | Spr. Höl [m] | Spr. İnd. |
| Nom.                                | 12.70 | 1.78  | 9   | 11.68    | 22.226   | 432.922     | 302.50        | 14.656       | 7.14      |
| Min.                                | 12.60 | 1.75  | 9   | 11.94    | 21.318   | 447.883     | 303.02        | 14.526       | 7.19      |
| Max.                                | 12.80 | 1.80  | 9   | 11.17    | 23.133   | 418.718     | 301.98        | 14.785       | 7.10      |

Ayrıca, Tablo 3'te çok amaçlı ve aksiyomatik tasarım durumlarının gürbüzlük entegre çözümleri karşılaştırılmıştır.

**Tablo 3:** Çok amaçlı aksiyomatik ve sağlam parametre yaklaşımlarının çözümleri

| Çok Amaçlı Aksiyomatik Tasarım ve Sağlam Parametre Yaklaşımları                               |        |       |     |         |        |            |             |             |            |
|---|--------|-------|-----|---------|--------|------------|-------------|-------------|------------|
| $T_D = 0.5$<br>$T_d = 0.05$<br>□m   | D m    | d m   | N # | Def. mm | Mass g | Stress MPa | Freq. Hertz | Spr. Höl mm | Spr. İndex |
| Nominal   | 12.7   | 1.778 | 9   | 11.684  | 22.226 | 432.92     | 302.5       | 14.656      | 7.14       |
| Min   | 12.192 | 1.722 | 9   | 11.43   | 19.958 | 454.364    | 318.866     | 14.092      | 7.05       |
| Max   | 13.208 | 1.828 | 9   | 11.684  | 24.494 | 412.858    | 287.679     | 15.22       | 7.22       |
| Tablo 3 Devamı - Çok Amaçlı Sağlam Parametre Yaklaşımları $T_D = 0.15$<br>□m, $T_d = 0.05$ □m |        |       |     |         |        |            |             |             |            |
|   | D m    | d m   | N # | Def. mm | Mass g | Stress MPa | Freq. Hertz | Spr. Höl mm | Spr. İndex |
| Nominal   | 13.030 | 1.752 | 9   | 13.208  | 22.226 | 460.363    | 283.267     | 14.935      | 7.43       |
| Min   | 12.877 | 1.701 | 9   | 14.478  | 20.865 | 495.319    | 281.605     | 14.732      | 7.31       |
| Max   | 13.182 | 1.803 | 9   | 12.192  | 23.587 | 428.785    | 284.777     | 15.164      | 7.57       |

| İkinci Yaklaşım Çözümü $T_D = 0.12$ mm, $T_d = 0.025$ mm |        |       |     |         |        |            |             |                |              |
|--|--------|-------|-----|---------|--------|------------|-------------|----------------|--------------|
|  | D mm   | d mm  | N # | Def. mm | Mass g | Stress MPa | Freq. Hertz | Spring Hole mm | Spring Index |
| No minimal   | 13.106 | 1.930 | 13  | 13.208  | 36.741 | 352.529    | 308.387     | 15.24          | 6.79         |
| Min  | 12.98  | 1.905 | 13  | 13.462  | 35.833 | 363        | 310.314     | 15.087         | 6.77         |
| Max  | 13.233 | 1.955 | 13  | 12.954  | 38.102 | 342.462    | 306.476     | 15.392         | 6.82         |
| Üçüncü Yaklaşım Çözümü $T_D = 0.1$ mm, $T_d = 0.025$ mm  |        |       |     |         |        |            |             |                |              |
|  | D mm   | d mm  | N # | Def. mm | Mass g | Stress MPa | Freq. Hertz | Spring Hole mm | Spring Index |
| No minimal   | 13.03  | 1.981 | 13  | 11.684  | 38.555 | 326.329    | 320.215     | 15.21          | 6.58         |
| Min  | 13.132 | 2.006 | 13  | 11.938  | 37.194 | 336.188    | 321.098     | 15.34          | 6.61         |
| Max  | 12.928 | 1.955 | 13  | 11.43   | 39.916 | 316.814    | 319.321     | 15.08          | 6.55         |

Tablo 3'e göre, çok amaçlı ve aksiyomatik tasarım yöntemleri entegre olduğunda; bobin çapı için tasarım toleransı ( $T_D$ ) 0.1 mm ve tel çapı için ( $T_d$ ) 0.025 mm'dir. Bir diğer ifade ile; fonksiyonel gereksinimlerde eğer bobin çapı (D) 12.6 mm ve 12.8 mm arasında; tel çapı (d) 1.753 mm ve 1.803 mm arasında ise burada hızlı bir değişim olmadığıdır. Böylece sistemin sağlamlığı ve dayanıklılığı geliştirilmiş olup, gürültü faktörlerine duyarlılıkta azalmış olur.

Ayrıca, tasarıma çok yönlülük katan bağımsız aksiyom tasarımı, karşılandı. Bunlar; bobinin metodolojik seçimi, tel boyutları ve bobin sayısı tarafından sağlanan en az üretim maliyetleri ile birlikte bütün avantajlı özellikleridir.

#### IV. SONUÇ

Bu çalışmada, çok amaçlı aksiyomatik tasarım yaklaşımı, mekanik yay tasarımı araştırması ile örneklendirildi. Aksiyomatik Tasarım, sağlam parametre tasarımı ve çok amaçlı tasarım yaklaşımları, tasarım aşamasında sağlamlık ve dayanıklılık entegrasyonu ile yayın kütle ve kayma gerilmesinin en aza indirilmesi ile bağlantı kurulmuştur.

Aksiyomatik bir tasarım probleminde, eğer tam sistem matrisi üçgen bir matris oluşturacak şekilde yeniden sıralanabiliyorsa, yüksek seviyeli birleştirilmiş tasarım, ayrıştırılmış bir tasarım olarak ele alınabilir. Bu, yüksek düzeyde bir miktar bağlantı sergileyen sistemlerin bazı aralıklarda ayrıştırılabilmesi için bir

çözüm yolunu açıklamaktadır. Bu çalışmada olduğu gibi bazı düzeylerde ayrıştırılmış az sayıda tasarım alternatifi bulunmaktadır. Daha sonra etkili bir şekilde ayrıştırılmış tasarım için uygun aralık seçilir ve tasarım çözümü için kullanılabilir.

Gürültü faktörlerine karşı sistem sağlamlığının geliştirilmesine yönelik bazı tasarım metodolojilerinin aksiyomatik tasarım yöntemine entegre edilmesi isteniyorsa, iki strateji ile açıklanabilir. İlk olarak, tüm FR'lerin uygun DP'ler tarafından karşılanması koşuluyla, gürültü faktörlerine duyarlılığı azaltan veya gözlemlenen gürültü faktörü değişimini azaltan FR'lerle birlikte bir dizi FR'nin artırılmasıyla sistem sağlamlığı artırılır. İkinci olarak, gürültü faktörlerindeki değişiklikleri karşılayan tasarım parametreleri eklenerek sistem sağlamlığı artırılır. Bu stratejiler, gürültü faktörlerine duyarlılığı kontrol eden ve dolayısıyla sistem tasarımcısının sistem geliştirilirken istenen ilişkileri sürdürmesine yardımcı olan tasarımın önemli özelliklerini vurgulamaktadır.

Aksiyomatik tasarıma ilişkin bu çalışma, aksiyomatik sistem tasarımına yönelik yöntemlerin geliştirilmesinde başarıya ulaşmış olsa da sunulan teoremlerin kullanımı, tasarım araçlarına entegre edilmeleri halinde büyük ölçüde artacaktır.

Önerilen yöntemlerin etkinliğini ölçmek için, FR sağlamlığını sağlayacak değişken DP'lere sahip bir sistem tasarlamak gerekir. Diğer bir olasılık ise sağlamlık yöntemlerini kullanarak ve kullanmadan bir sistem tasarlamak ve ardından Taguchi yöntemleri gibi bir parametre optimizasyon yöntemiyle ilerlemektir. Bu nedenle olayın çözümü çok amaçlı sağlam tasarım metodolojisi kullanılarak incelenmiştir. Daha sonra farklı metodolojilerin çözümleri birbirleriyle karşılaştırıldı. Çözümlere göre kütle ve kayma gerilimi arasında bir denge vardır.

**Tablo 4:** Yapılan Çok Amaçlı Aksiyomatik Tasarım Çalışması ile Literatür Çalışmalarının Karşılaştırılması

| D mm   | d mm   | N # | Def. mm | Mass g | Stress MPa | Freq. Hertz | Spring Hole mm | Spring Index |
|--------|--------|-----|---------|--------|------------|-------------|----------------|--------------|
| 12.7   | 1.778  | 9   | 11.684  | 22.226 | 432.921    | 302.5       | 14.656         | 7.14         |
| 12.192 | 1.7272 | 9   | 11.43   | 19.958 | 454.364    | 318.866     | 14.092         | 7.05         |
| 13.208 | 1.8288 | 9   | 11.684  | 24.494 | 412.858    | 287.679     | 15.22          | 7.22         |

Yayın kütlesi bobin sayısı arttıkça artar. Öte yandan kayma gerilmesi bobin sayısı arttıkça azalmaktadır. Kısıtlamaları karşılayan en iyi tasarım çözümü 9 bobinden oluşmaktadır. İki metodoloji N = 9'a göre



karşılaştırıldığında, çok amaçlı aksiyomatik ve gürbüz tasarım çözümü, elde edilen tolerans aralığı ile daha optimal ve sağlam çözüm seti vermektedir. Gelecekte yapılacak iyileştirmeler için, farklı metodolojiler aksiyomatik tasarım yaklaşımına entegre edilebilir. Daha sonra yapılacak çalışmaların katkılarıyla, sistem; gürültü faktörlerine karşı daha sağlam ve duyarısız olacaktır. Yapılan çok amaçlı aksiyomatik tasarım çalışması ile literatür çalışmalarının karşılaştırılması Tablo 4'te verilerek çalışmaya aktarılmıştır.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümünde hazırlanmış "Multiobjective Axiomatic And Robust Design Approaches To Mechanical Spring Design" adlı yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] Suh, N.P.; *"The Principles of Design"*, Oxford University Press, New York, USA(1990).
- [2] Cochran, D. S.; Reynal, V. A.: "Axiomatic Design of Manufacturing Systems", *The Lean Aircraft Initiative Report Series*, RP96-05-14, Mass. Institute of Technology (1996).
- [3] Suh, N.P.; Cochran, D.S.; C.L. Paulo.: "Manufacturing System Design", *Annals of the CIRP*, 47, 2 (1998) 627–639.
- [4] Babic, B.: "Axiomatic Design of Flexible Manufacturing Systems", *International Journal of Production Research*, 37, 5 (1999) 1159-1173.
- [5] Bröte, S.; Cochran, D. S.; Mierzejewska, A.; Carrus, B.; Rupp, S.; Smith, J.: "Integrating the Production Information System with Manufacturing Cell Design A Lean, Linked Cell Production System Design Implementation, Global Mobility Database", *Society of Automotive Engineers Inc.*, USA. 13 (1999).
- [6] Cochran, D. S; Eversheim, W.; Kubin, G.; Sesterhenn, M. L.: "The Application of Axiomatic Design and Lean Management Principles in the Scope of Production System Segmentation", *The International Journal of Production Research*, 38, 6 (2000) 1377-1396.
- [7] Chen S.J.; Chen.; L.C.; Lin,L.: "Knowledgebased Support for Simulation Analysis of Manufacturing Cells", *Computers in Industry*, 44 (2001) 33-49.
- [8] Werneman, A.; Kjellberg, A.; Adman, M.: "Application of Axiomatic Design in Operational Development", Proceedings of ICAD 2000, First International Conference on Axiomatic Design, Cambridge, MA (ICAD 020) (2000)1-8.
- [9] Cha, S. W.; Moon, Y. R.: "Using Axiomatic Approach for Development of New Concept Design and Manufacturing", Proceedings of ICAD 2000, First International Conference on Axiomatic Design, Cambridge, MA (ICAD 035) (2000) 83-86.
- [10] Engelhardt, F.: "Improving Products and Systems by Combining Axiomatic Design", Quality Control Tools and Designed Experiments, Proceedings of ICAD 2000, First International Conference on Axiomatic Design, Cambridge, MA, (ICAD037), (2000) 93-105.
- [11] Suh, N.P.: *"Axiomatic Design: Advances and Applications"*, Oxford University Press, New York, USA (2001).
- [12] Cotoia, M.; Johnson S.: "Applying the Axiomatic Approach to Business Process Redesign", *Business Process Management Journal*, 7, 4, (2001) 304 – 322.
- [13] Baxter, J. E.; Agouridas, V.; McKay, A.; Pennington, A.: "Supply Chain Design: An Application of Axiomatic Design", Proceedings of ICAD2002, Second International Conference on Axiomatic Design, Cambridge, MA (ICAD012) (2002). 1-7.
- [14] Houshmand, M.; Jamshidnezhad, B.: "Conceptual Design of Lean Production Systems through an Axiomatic Design", Proceedings of ICAD 2002, Second International Conference on Axiomatic Design, Cambridge, MA (ICAD 033) (2002) 1-12.
- [15] Hwang, Y. D.; Cha, S. W. ; Kang, Y. J.: "Tool Development for Evaluation of Quantitative Independency Between FRs in Axiomatic Design", *International Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, 3, 2 (2002) 52-60.
- [16] Kim, Y.: "A Decomposition Based Approach To Integrate Product Design And Manufacturing System Design", Proceeding of Third International Conference on Axiomatic Design, Haziran 11 – 24 (2004) Seul.
- [17] Kulak, O.; Durmuşoğlu, B.; Tüfekçi, I.: "A Complete Cellular Manufacturing System Design Methodology Based On Axiomatic Design Principles", *Computers & Industrial Engineering*, 48, 4 (2005) 765–787.
- [18] Pappalardo, M.; Naddeo, A.: "Failure Mode Analysis Using Axiomatic Design And Non-Probabilistic Information", *Journal of Materials Processing Technology*, (2005) 1423-429.
- [19] Yasar, E. A.; Durmuşoğlu, M. B.; Dinçmen, M.: "Design of a Knowledge Management System Based on Axiomatic Design Principles", 35. International Conference on Computers and Industrial Engineering (2005) 2115-2130.
- [20] Kulak, O.; Durmuşoğlu, B.; Tüfekçi, I.: "A Complete Cellular Manufacturing System Design Methodology Based On Axiomatic Design Principles", *Computers & Industrial Engineering*, 48, 4 (2005) 765–787.
- [21] Kabadurmuş, Ö.; Durmuşoğlu, M. B.: "Aksiyomlarla Tasarım İlkelerini Kullanarak Çekme/Kanban Üretim Kontrol Sistemlerinin

- Tasarımı”, V. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu, Ticaret Üniversitesi, İstanbul (2005) 313-317.
- [22] Tarcan E.: “*Evaluation Of Sub-Component Alternatives In A Product Design*”, Yüksek Lisans Tezi, MÜ İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul (2005).
- [23] Thielman, J.; Ge, P.: “Applying Axiomatic Design Theory to the Evaluation and Optimization of Large-Scale Engineering Systems”, *Journal of Engineering Design*, 17, 1 (2006) 1-16.
- [24] Birgün, S.: “Aksiyomlarla Tasarım Yoluyla Değer Akışı Haritalandırma”, Yöneyem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği XXVI. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı (2006) 35-40.
- [25] Yılmaz, E.: “Aksiyomlarla Tasarım İlkeleri Yardımıyla Kentiçi Toplu Taşıma Sistemlerinin Tasarımı”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 11, 1, (2006) 9-26.
- [26] Özel, B.; Özyörük, B.: “Aksiyomatik Tasarım ve Analitik Hiyerarşi Prosesi ile Tedarikçi Seçimi”, VI. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu, İstanbul Kültür Üniversitesi (2006) 189-203.
- [27] Özyiğit, A.: “*Axiomatic Design Approach To Control Systems Design*”, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul (2006).
- [28] Özel, B.; Özyörük, B.: “*Bulanik Aksiyomatik Tasarım Yaklaşımı İle Hiyerarşik Bir Tedarikçi Seçim Modeli*”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara (2007).
- [29] Gülen, K. G.; Birgün S.: “Creating Value in Enterprise Information System: KVS Model”, State of the Art & Business Management a Handbook for Educators, Consultants and Practitioners, Tectum Verlag (2007) 148-176.
- [30] Birgün, S.;Kulaklı, A.: “*Aksiyomlarla Tasarım İlkeleriyle Müşteri Merkezli Bilgi Yönetimi Stratejisinin Oluşturulması*”, Sıtkı Gözölü’ye Armağan, Çağlayan Basımevi (2007) 245-255.
- [31] Kanbur, F.; Birgün, S.: “Yeni Kariyere Geçiş Danışmanlığı İçin Kavramsal Bir Model: Fatra”, *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*,7,13 (2008) 117-137.
- [32] Çebi, S.; Çelik, M.; Kahraman, C.: “Gemi Sistemleri İçin Entegre BakımOnarım Yönetimi Gereksiniminin Analizi”, *Havacılık Ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, Temmuz, 3, 4 (2008) 17-24.
- [33] Urbanic R. J.; Maraghy, W.H.: “Using Axiomatic Design With The Design Recovery Framework To Provide A Platform For Subsequent Design Modifications”, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 1 (2009) 165–171.
- [34] Metin Celik, M.; Er, I.D.: “Fuzzy Axiomatic Design Extension For Managing Model Selection Paradigm In Decision Science”, *Expert Systems with Applications* 36 (2009a) 6477–6484.
- [35] Metin Celik, M.; Cebi, S.; Kahraman, C.; Er, I.D.: “Application Of Axiomatic Design and TOPSIS Methodologies Under Fuzzy Environment For Proposing Competitive Strategies On Turkish Container Ports In Maritime Transportation Network”, *Expert Systems with Applications* 36 (2009b) 4541–4557.
- [36] Bang, I.C.; Heo, G.: “An Axiomatic Design Approach In Development Of Nanofluid Coolants”, *Applied Thermal Engineering* 29 (2009) 75–90.
- [37] Özbek, İ., “*Plastik Enjeksiyon Makinesi Seçiminde Aksiyomatik Tasarım Yaklaşımı*”, Yüksek Lisans Tezi. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2013).
- [38] Yavuz, M., “*Makine Ekipman Seçimine Aksiyomatik Tasarım Yaklaşımı*”, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010
- [39] GÜNGÖR, F., "Sızdırmaz Conta Malzemesinin Aksiyomatik Tasarım Metoduyla Seçilmesi," *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, vol.4, pp.1-10, 2017
- [40] Ulutürk, İ., Yurdakul, M. ve İç, Y.T., “Aksiyomatik tasarım yöntemi ile yenilikçi ürün geliştirilmesi”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 987-1002, (2020).
- [41] Rao, S.S.: *Engineering Optimization – Theory and Practice*. Wiley (1996).
- [42] Deb, K.: Multi-objective optimization. In: Burke, E.K.; Kendall, G. (eds.) – *Search Methodologies: Introductory Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques*, pp.403-449. Springer, New York (2005).
- [43] Goel, P.S.; Singh, N.: A modeling approach for integrated durability engineering and robustness in product design. *Computers Ind. Eng.* (1997). doi:10.1016/S0360 8352(97)00110-1
- [44] Shigley, J.E.; Mischke, C.R.: *Mechanical Engineering Design*, 6th edn. McGraw-Hill, Singapore, (2001).
- [45] Suh, N.P.; Rinderle, J.R.: Qualitative and quantitative use of design and manufacturing axioms. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* (1982). doi:10.1016/S00078506(07)63323-X