



## DİŞLİ KUTULARINDA PARAMETRELERİN HACİM VE MUKAVEMETE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Metin ZEYVELİ <sup>a,\*</sup>, Hamit SARUHAN <sup>b</sup>, Cevdet GÖLOĞLU <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Karabük Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümü, Karabük

<sup>b</sup> Düzce Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümü, Düzce

### ÖZET

Dişli kutularının tasarımı karmaşık bir süreç olup kullanma yeri ve amacına göre farklılık gösterir. Dişli tasarımında minimum hacim ve dişliler için eşit mukavemet elde edilmesi tasarımın en temel kıstaslarından birini oluşturmaktadır. Bu çalışmada iki kademeli düz, helis ve konik dişli çark mekanizmalarının tasarım ve mukavemet analizi araştırılmıştır. Tasarım işleminde, minimum malzeme hacmi (MMH) ve minimum kutu hacmi (MKH) olmak üzere iki hacim kriteri dikkate alınmıştır. Hacim kriterlerinde elde edilen iletim oranları ve kademelerdeki gerilmelerde incelenmiştir. Dişli tasarım işlemi analitik yaklaşım ile iletim oranı ve modül değişkenlerinin taranması ve bunlara bağlı diğer parametrelerinin bulunması şeklinde yapılmıştır.

Dişli tasarımında, diş sayılarının değişiminin hacim ve oluşan gerilmeler üzerinde doğrudan etkilerinin olduğu görülmüştür. Sistemde oluşan gerilmeler açısından MMH kriterinde kademelerde oluşan gerilmeler arasındaki farkın daha az olduğu gözlemlenmiştir. Dişli tasarımında kademeler arasında iletim oranlarının büyükten küçüğe doğru dağılması yaklaşımı özellikle MMH kriterinde elde edilmiştir. Bu şekildeki dağılımın kademeler arasında birbirine yakın mukavemet değerlerinin sağlanmasına katkı sağladığı görülmüştür. Elde edilen verilerden MMH kriterinin; boyutlandırma, iletim oranı dağılımı, sistemde oluşan eğilme ve yüzey basıncı gerilmelerinin dağılımı açısından en uygun değerleri verdiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Dişli çark; İletim oranı; Hız kutusu hacmi; Dişli mukavemeti.

## INVESTIGATION OF PARAMETERS EFFECTS TO VOLUME AND STRENGTH IN GEARBOXES

### ABSTRACT

Design of gearboxes is a complex process and it varies place to use and objective. One of the key design criteria in designing gear is to obtain minimum volume and equal strength in gear trains. In this study, design and strength analysis of spur, helical and bevel gears in two stages configuration have been investigated. In design process two volume criteria, Minimum Material Volume (MMV) and Minimum Box Volume (MBV), have been taken into consideration. The transmission ratios and the strengths obtained in the stages have also been investigated. Gear design process has analytically been performed such that the various transmission ratios and modules are iteratively tested.

In designing gear, it has been seen that the variations in teeth numbers have a direct effect on the volumes and strengths obtained. From the occurring strength point of view, it has been observed that the strength differences in the stages are smaller in MMV criterion. A distribution from larger to smaller in transmission ratios has been obtained in MMV criterion. It has been discovered that it helps assist in obtaining closer strength values between the stages. Finally, it has been proved from the data obtained MMV is more appropriate criterion from the viewpoints of dimensioning, distribution of transmission ratios, distribution of bending strength and contact stress occurred in the gearbox system.

**Keywords:** Gear; Transmission ratio; Gearbox volume; Gear strength.

**\*E-posta:** [m\\_zeyveli@hotmail.com](mailto:m_zeyveli@hotmail.com)

## 1. GİRİŞ

Endüstride birçok alanda kullanılan dişli çarklar, kullanma amacı ve yerlerine göre tasarımları da farklılık göstermektedir. Bazı yerlerde dişlilerin sessiz çalışması istenirken bazı yerlerde ise hafiflik ve küçük hacimli tasarımlar ön plana çıkmaktadır. Dişli çarkların veya dişli kutularının tasarımlarını etkileyen en önemli parametreler dişli parametreleridir. Diş genişliği, modül, mukavemet değerleri, diş sayısı gibi dişli parametrelerinin yanında kademelerin iletim oranları dişlilerin boyutlandırılmasında etkili olan önemli bir parametredir.

Literatür araştırmalarına bakıldığında dişli çarklar ile ilgili birçok araştırma yapılmıştır. Ancak dişli çark tasarımlarında özellikle dişli çark kademelerindeki iletim oranlarının, dişli kutusu hacmi ve dişli çark malzeme hacmi üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalar yok denilecek kadar azdır. Literatürde, dişli çarkların geleneksel tasarımı, tasarımın otomatikleştirilmesi ve hata teşhisi, optimal tasarım metodolojisinin geliştirilmesi, boyutsal tasarım ve analiz çalışmaları vardır [1–6]. Bununla birlikte dişli çark sistemlerinde tasarımdaki birçok süreci içine alan, belirli bir amaca yönelik çalışmalarda vardır. Çalışmaların temelinde yapay zeka teknikleri olup, uygulama amaçlarına göre bu tekniklerde farklılık göstermektedir. Genetik Algoritmalar, Yapay Sinir Ağları ve bunların birleşiminden oluşan karma sistemler son yıllarda dişli çark mekanizmalarının tasarım ve optimizasyonu çalışmalarında çok kullanılan yaklaşımlar olarak karşımıza çıkmaktadır [7–15].

Dişli çark tasarım işleminde öncelikle amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. Amaç fonksiyonu olarak dişli çark mekanizmasının MMH ve MKH dikkate alınmıştır. Amaç fonksiyonu, dişli çark mekanizmasını oluşturan modül, diş sayısı ve diş genişliği değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak modellenmiştir. Sınırlama fonksiyonları ise dişli çark mekanizmasının mukavemet hesaplamalarına bağlı olan ve amaç fonksiyonunun sağlanmasında kullanılan eşitlikler şeklinde modellenmiştir. Tasarım sürecinde, belirli bir dişli giriş gücü, hızı ve iletim oranına bağlı olarak çıkış devri ve hızı bulunmaktadır. Bu işlem gerçekleştirilirken kademeler arasındaki iletim oranları, başlangıçta belirlenmiş olan giriş ve çıkış parametrelerini sağlayacak şekilde düzenlenmektedir. Kademeler arasındaki iletim oranları, kademeleri oluşturan dişli çarkların boyutlarının değişimini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle sabit giriş ve çıkış değerleri için sabit bir toplam çevrim oranının kademeler arasındaki dağılımının dişli çark kademelerinin hacimlerini ve dişli kutusunun hacmini nasıl etkilediği çalışma kapsamında incelenmiştir. Dişli çarkı

oluşturan modül, diş genişliği vb. parametrelerinde nasıl bir değişim gösterdikleri araştırılmıştır. Dişli tasarımında her zaman minimum hacim elde edilmesinin uygun olup olmadığı araştırılmıştır. Minimum hacmin elde edilmesi bazı durumlarda kademelerde oluşan kuvvetlerin, momentlerin daha çok artmasına ve dişli çarkların kısa sürede hasara uğramasına sebep olabilmektedir.

## 2. ANALİTİK YAKLAŞIMLI ÇÖZÜM

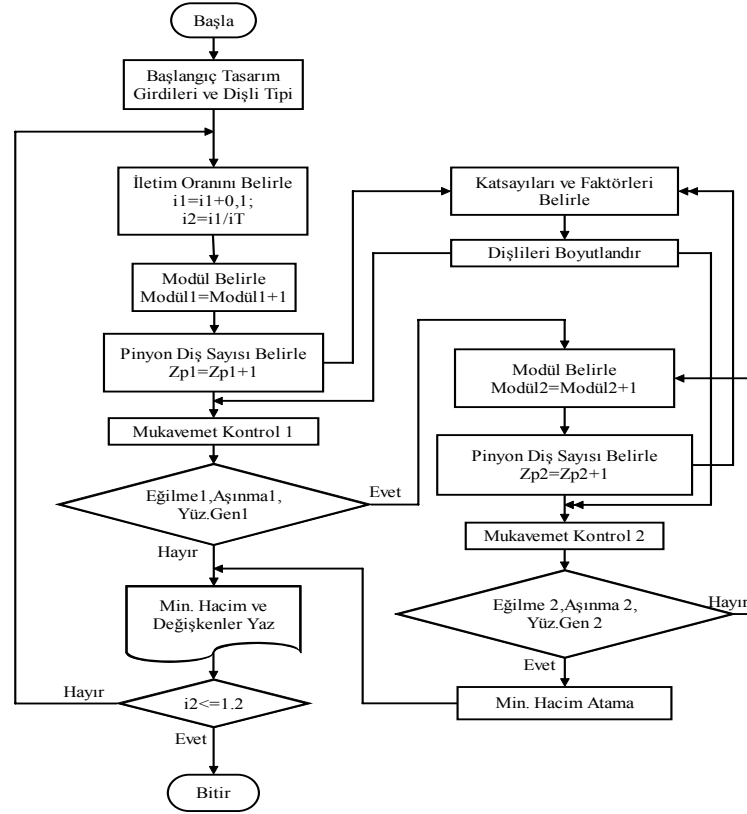
Bilindiği gibi modellemedeki hedef, belirli bir amaca yönelik olarak fonksiyon oluşturmaktır. Oluşturulan fonksiyon ise modelleme yapılmak istenilen problemin değişkenlerinden oluşmaktadır. Çalışmada düz dişli çarklar, helis dişli çarklar ve konik dişli çarklar, dişli tipine bağlı olarak farklılık gösteren dişli değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak modellenmiş ve çözümü yapılmıştır. Analitik yaklaşımli çözümde başlangıç parametreleri olarak motor gücü, giriş devri, çıkış devri ve dişli tipi girdi olarak kullanılmaktadır. Bu girdilere bağlı olarak önce dişli çark mekanizmasının toplam iletim oranı ( $i_t$ ) belirlenir. Birinci kademe iletim oranı  $i_{12}=1.2$  değerinden başlayarak belirlenir ve her  $i_{12}$  iletim oranı için  $i_{34}$  iletim oranı, toplam iletim oranını sağlayacak şekilde belirlenir. Sonrasında modül değişkeni ve pinyon diş sayısı seçilerek bu değerlere bağlı mukavemet kontrolleri yapılarak sistem emniyetli sınırlar içerisinde ise birinci kademeden hacim değerleri hesaplanarak ikinci kademeye geçilir. Bu işlem iletim oranı, modül ve pinyon diş sayısı değişkenlerinin sınır değerlerinin her bir değeri için tekrarlanarak devam etmekte ve sonucunda iki kademeli bir mekanizmanın minimum hacim değerleri ve parametreleri elde edilmektedir. Ayrıca minimum hacimlerdeki gerilme değerleri de veri olarak bulunmaktadır. Analitik yaklaşımli çözüm işleminin akış şeması Şekil 1 'de görülmektedir.

Tasarım işleminde, dişli tiplerinin değişkenlerine bağlı olarak amaç fonksiyonlarını veren denklemler oluşturulmuştur. Dişli çark mekanizmalarının tasarımları (düz, helis, konik) aralarında fark olmakla birlikte temelde aynıdır. Bu nedenle burada faktörler açısından düz ve helis dişli çarklardan daha çok farklılık gösteren konik dişli çarkların amaç ve sınırlama fonksiyonları verilmiştir. Buna göre iki kademedeki oluşan konik (konik-düz) dişli çark mekanizmasının amaç fonksiyonları;

$$F_{\min.\text{malz}} = \left[ 0.785 \left( (m_{o1} Z_1)^2 + (m_{o1} Z_2)^2 \right) b_1 + 0.785 \left( (m_2 Z_3)^2 + (m_2 Z_4)^2 \right) b_2 \right] \quad (1)$$

$$F_{\min.\text{kutu}} = \left[ \left( m_{o1} Z_1 + \frac{m_{o1} Z_2}{2} + \frac{m_2 Z_3}{2} + m_2 Z_4 \right) \left( \frac{(m_{o1} Z_1) + (m_2 Z_4)}{2} \right) (b_1 + b_2) \right] \quad (2)$$

şeklinde elde edilir. Burada;  $F_{min.malz}$ . MMH'ni,  $F_{min.kutu}$  MKH amaç fonksiyonunu ifade etmektedir. Sınırlama fonksiyonları ise eğilme dayanımı sınırlaması, aşınma dayanımı (yüzey basıncı) sınırlaması, yüzey genişliği sınırlaması, modül sınırlaması (1-5.5), pinyon diş sayısı sınırlaması ( $17 \leq z_{1,3} \leq 24$ ), çark diş sayısı sınırlaması ( $35 \leq z_{2,4} \leq 145$ ) şeklinde dikkate alınmış olup aşağıda verilmiştir. Düz, helis ve konik dişli çark tasarımında kullanılan sabit değişkenler **Tablo 1**'de verilmiştir.



**Şekil 1.** Analitik yaklaşımli çözüm akış şeması.

$$g_1(x) = K_d K_{fel} K_c Ft_1 - \varepsilon b_1 m_{o1} (0,55 \sigma_K) \leq 0 \quad (3)$$

$$g_2(x) = K_d K_{f2} K_c Ft_2 - \varepsilon b_2 m_2 (0,55 \sigma_K) \leq 0 \quad (4)$$

$$g_3(x) = K_{s1} F_{t1} \left( \frac{Z_{e2} + Z_{e1}}{Z_{e1}} \right) - b_1 m_{o1} Z_{e2} (P_{em})^2 \leq 0 \quad (5)$$

$$g_4(x) = K_{s1} F_{t2} \left( \frac{Z_4 + Z_3}{Z_3} \right) - b_2 m_2 Z_4 (P_{em})^2 \leq 0 \quad (6)$$

$$g_5(x) = ((10 m_{o1}) - b_1) \leq 0 \quad (7)$$

$$g_6(x) = (b_1 - (40 m_{01})) \leq 0 \quad (8)$$

$$g_7(x) = ((10 m_2) - b_2) \leq 0 \quad (9)$$

$$g_8(x) = (b_2 - (40 m_2)) \leq 0 \quad (10)$$

$$g_9(x) = (17 - z_{1,3}) \leq 0 \quad (11)$$

$$g_{10}(x) = (z_{1,3} - 24) \leq 0 \quad (12)$$

$$g_{11}(x) = (35 - z_{2,4}) \leq 0 \quad (13)$$

$$g_{12}(x) = (z_{2,4} - 145) \leq 0 \quad (14)$$

**Tablo 1.**

Dişli çark giriş ve katsayı değerleri.

Çalışma Şartı ve Sabit Değişkenler	Değeri
Giriş gücü, (kW).	7,5
Giriş devri, (dev/dak).	1800
İletim oranı, (i).	Düz, Helis:21; Konik: 30
Malzeme (Sementasyon çeliđi)	16MnCr5
İmalat yöntemi	Hassas işçilik
Tahrik sistemi	Elektrik motoru
Dişli yüzeyinin Brinell sertliđi, (N/mm <sup>2</sup> ).	1460
Malzemenin kopma dayanımı, (N/mm <sup>2</sup> ).	1100
Çalışma (işletme) faktörü, (K <sub>o</sub> ).	1,25
Kavrama oranı, (ε).	1,6
Çentik faktörü, (K <sub>c</sub> ).	1,5
Dinamik faktör (K <sub>d</sub> )	1.1
Malzeme faktörü, (K <sub>m</sub> ) (N/mm <sup>2</sup> ).	271,11
Yuvarlanma noktası katsayısı, (K <sub>α</sub> ).	1,76
Diş uzunluk (kavrama) katsayısı, (K <sub>ε</sub> ).	0,79

Burada  $F_{t1,2}$  birinci ve ikinci kademenin teğetsel kuvvetini,  $K_{s1} = K_d (K_m K_\alpha K_e)^2$  olup aşınma dayanımı sabitleri katsayısını,  $Z_{e1,e2} = Z / \cos \delta_1$  şeklinde birinci ve ikinci kademenin eşdeğer diş sayısıdır.  $K_{fe}$  teorik eşdeğer diş sayısına karşılık gelen form faktörü,  $m_{o1,2}$  birinci ve ikinci kademelerin ortalama modülleri,  $Z_{1,3}$  birinci ve ikinci kademe pinyon dişlisi diş sayısı,  $Z_{2,4}$  birinci ve ikinci kademe çark dişlisi diş sayısı,  $b_{1,2}$  birinci ve ikinci kademelerin pinyon ve çark dişlisi genişlikleri,  $p_{em} = (0,25 - 0,3) H_B$  şeklinde emniyetli yüzey basıncını,  $g_1$  ve  $g_2$  birinci ve ikinci kademenin eğilme dayanımını sınırlamasını,  $g_3$  ve  $g_4$  birinci ve ikinci kademenin aşınma dayanımını sınırlamasını,  $g_5$  ve  $g_6$  birinci kademenin yüzey genişliği sınırlamasını,  $g_7$  ve  $g_8$  ikinci kademenin yüzey genişliği sınırlamasını,  $g_9, g_{10}$  birinci ve ikinci kademenin pinyon diş sayısı sınırlamasını,  $g_{11}, g_{12}$  birinci ve ikinci kademenin çark diş sayısı sınırlamasını ifade etmektedir

### 3. İLETİM ORANI DAĞILIMI

İletim oranının dağılımı dişli parametrelerini etkileyen önemli bir parametredir. İletim oranı dağılımı aynı zamanda dişlilerde meydana gelen gerilme değerlerini de etkilemektedir. Bu nedenle Analitik yaklaşımlı çözümde doğrudan tarama yöntemi kullanılarak ilk olarak iletim oranının dağılımı ve sonrasında diğer dişli parametrelerinin dağılımı yapılarak dişli tasarımı elde edilmiştir (Şekil 1). Tarama işleminde modül, diş sayısı ve diş genişliği parametreleri verilen sınır değerler arasında işleme tabi tutulmuştur [16]. Dişlilerin eğilme ve aşınma mukavemet değerleri de tasarımda sınırlamalar olarak işlem görmüştür. Bu veriler altında gerçekleştirilen çözüm işlemi sonucunda, iletim oranının her bir değişimine karşılık gelen modül, diş sayıları ile diğer sınırlama fonksiyonlarını karşılayan MMH ve MKH tasarımları elde edilmiştir. Bu tasarım metodolojisi düz, helis ve konik dişli çark mekanizması tasarımları için farklılıkları da dikkate alınarak yapılmıştır.

Düz dişli çarklarda, iki kademeli bir tasarım için gerçekleştirilen çözümde iletim oranının ve buna bağlı olarak elde edilen diğer dişli parametrelerinin dağılımı Tablo 2’de görülmektedir. Düz dişli çarklarda dişli genişliği katsayısı ( $\varphi_m$ )  $18 \leq \varphi_m \leq 23$  aralığında dikkate alınıp çözüm gerçekleştirilmiştir (17). Tablo 2’de düz dişli çark tasarımında elde edilen tasarım değişkenleri ve kademelere ait hacim değerleri de görülmektedir.  $A_{01}, A_{02}$  kademelerin eksenler arası mesafesini ifade etmektedir.

Düz dişli çark tasarımı, birinci kademe iletim oranına karşılık gelen, birinci ve ikinci kademelerin hacim değerleri ile toplam kademe hacim değerinin değişimi Şekil 2’de görülmektedir. Burada görüldüğü gibi

başlangıçta birinci kademe iletim oranı düşük ve buna bağlı olarak ikinci kademe iletim oranı büyüktür. Başlangıçta birinci kademe hacim değeri çok küçük olurken ikinci kademe hacim değeri oldukça büyük çıkmaktadır. Bu değerlerin sonucu toplam kademelerin hacim değerleri de büyük çıkmaktadır. Ancak iletim oranının kademeler arasındaki değişimi neticesinde, birinci kademe iletim oranı  $i_{12}=5,3$  değerini alırken  $i_{34}=3,96$  değerini almaktadır. Bu iletim oranları için elde edilen kademelerin oluşturduğu toplam malzeme hacim değeri en küçük değeri almaktadır.

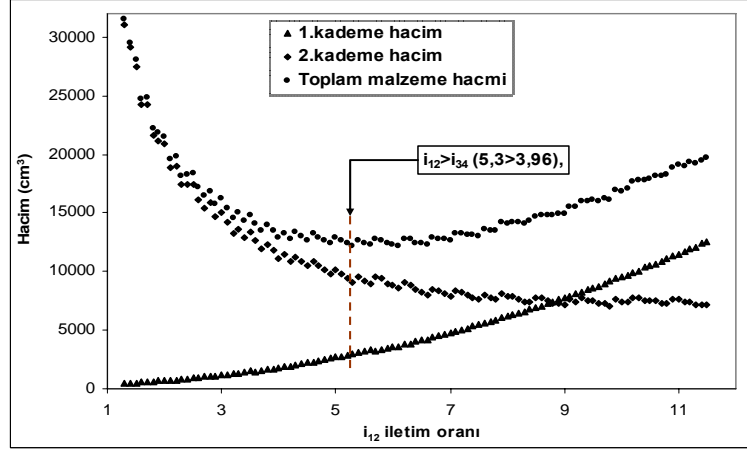
**Tablo 2.**

Düz dişli çark tasarım parametreleri

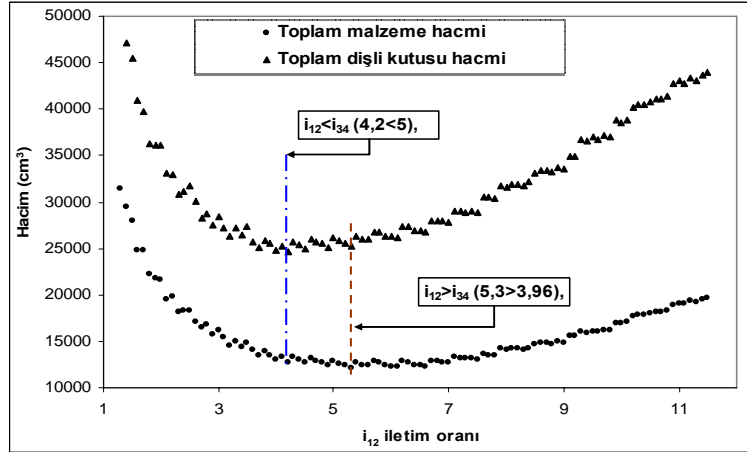
I. Kademe							II. Kademe							Toplam Hacim	
$i_{12}$	$m_1$	$Z_1$	$Z_2$	$b_1$	$A_{01}$	$MMH_1$	$i_{34}$	$m_2$	$Z_3$	$Z_4$	$b_2$	$A_{02}$	$MMH_2$	$MMH$	$MKH$
<b>4.2</b>	<b>2.25</b>	<b>25</b>	<b>105</b>	<b>40.5</b>	<b>146.25</b>	<b>1960.04</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>21</b>	<b>105</b>	<b>72</b>	<b>252</b>	<b>10831.94</b>	<b>12791.99</b>	<b>24643.96</b>
4.3	2.25	25	108	40.5	149.63	2064.82	4.88	4	22	107	72	258	11265.11	13329.94	25701.74
4.4	2.25	25	110	40.5	151.88	2136.28	4.77	4	22	105	72	254	10874.45	13010.73	25350.19
4.5	2.25	25	112	40.5	154.13	2209.03	4.67	4	22	103	72	250	10491.02	12700.05	25000.9
4.6	2.25	25	115	40.5	157.5	2320.57	4.57	4	23	105	72	256	10918.76	13239.33	26066.07
4.7	2.25	25	117	40.5	159.75	2396.54	4.47	4	23	103	72	252	10535.33	12931.87	25711.64
4.8	2.25	25	120	40.5	163.13	2512.91	4.38	4	23	101	72	248	10159.13	12672.04	25486.31
4.9	2.25	25	122	40.5	165.38	2592.09	4.29	4	23	99	72	244	9790.17	12382.26	25135.47
5	2.25	25	125	40.5	168.75	2713.29	4.2	4	24	101	72	250	10205.25	12918.54	26203.24
5.1	2.25	25	127	40.5	171	2795.69	4.12	4	24	99	72	246	9836.29	12631.98	25847.25
5.2	2.25	25	130	40.5	174.38	2921.72	4.04	4	24	97	72	242	9474.56	12396.28	25620.43
<b>5.3</b>	<b>2.25</b>	<b>25</b>	<b>132</b>	<b>40.5</b>	<b>176.63</b>	<b>3007.34</b>	<b>3.96</b>	<b>4</b>	<b>24</b>	<b>95</b>	<b>72</b>	<b>238</b>	<b>9120.07</b>	<b>12127.41</b>	<b>25268.02</b>

Şekil 3'de görülen grafikte ise düz dişli çark için malzeme hacmi ile dişli kutusu hacim değerinin değişimi görülmektedir. Burada ise dişli kutusu hacminde, birinci kademe iletim oranı  $i_{12}=4,2$  değerini alırken  $i_{34}=5$  değerini almaktadır. Bu iletim oranları ile elde edilen kutu hacmi boyutları, iletim oranları içerisinde elde edilen en küçük dişli kutusu hacmini oluşturmaktadır. Ancak dişli çark tasarımlarında literatürde geçen ve deneye dayalı formül ile ifade edilen bir kabul vardır [16]. Buna göre birinci kademelerin iletim oranının ikinci kademelerin iletim oranından büyük olması istenmektedir. Bu yaklaşım

ile dişli çark kademeleri arasında minimum hacim ve eşit mukavemet elde edileceği belirtilmektedir. Dişli çark tasarımı bu ifade yaklaşık değer olarak  $i_{12} = 1,2\sqrt{i_{top}}$  şeklinde ifade edilmiştir [17].



Şekil 2. Düz dişli çark için iletim oranına göre hacim değişimi.



Şekil 3. Düz dişli çark, iletim oranına göre malzeme ve dişli kutusu hacmi değişimi.

Helis dişli çarklarda, düz dişli çarklarda olduğu gibi belirli giriş parametreleri için çözülmüş, tasarım parametreleri ve hacim değerleri elde edilmiştir (Tablo 3). Ancak helis dişli çarklar geometrisi gereği düz dişli çarklardan farklılık göstermektedir. Helis açısı, helis dişli çarkı düz dişli çarklardan ayıran en önemli değişkenlerden biridir. Helis açısının değişmesi dişli boyutlarını ve hacimlerini etkilemektedir. Bu



çalışmada helis dişli çark tasarımında, helis açısı  $\beta=18^\circ$  sabit alınmış ve çözüm gerçekleştirilmiştir. Ayrıca dişli tasarımında önemli bir parametre olan dişli genişliği katsayısı da helis dişli çarklarda farklı olup bu katsayısı  $20 \leq \varphi_m \leq 40$  aralığında dikkate alınmıştır.

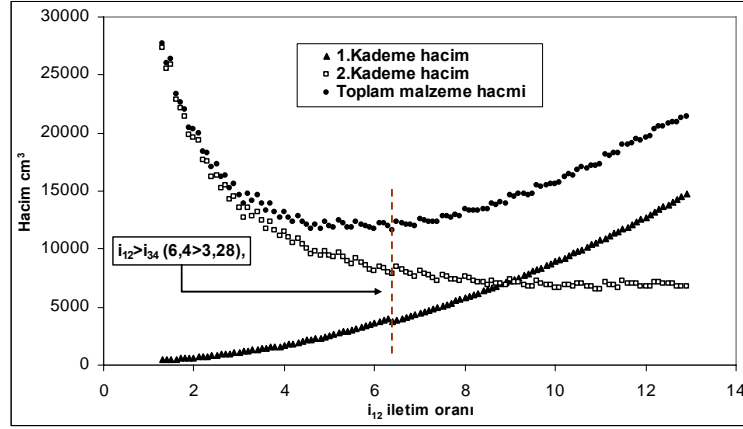
**Tablo 3.**

Helis dişli çark tasarım parametreleri

I. Kademe							II. Kademe							Toplam Hacim	
$i_{12}$	$m_1$	$Z_1$	$Z_2$	$b_1$	$A_{01}$	$MMH_1$	$i_{34}$	$m_2$	$Z_3$	$Z_4$	$b_2$	$A_{02}$	$MMH_2$	MMH	MKH
<b>4.6</b>	<b>2.25</b>	<b>23</b>	<b>106</b>	<b>45</b>	<b>145.13</b>	<b>2197.68</b>	<b>4.57</b>	<b>3.5</b>	<b>25</b>	<b>114</b>	<b>70</b>	<b>243.25</b>	<b>9548.46</b>	<b>11746.13</b>	<b>23547.34</b>
4.7	2.25	23	108	45	147.38	2275.65	4.47	4	21	94	80	230	9791.78	12067.42	24075.94
4.8	2.25	23	110	45	149.63	2355.05	4.38	4	21	92	80	226	9409.95	11765	23716.81
4.9	2.25	23	113	45	153	2476.83	4.29	4	22	94	80	232	9839	12315.84	24811.15
5	2.25	23	115	45	155.25	2559.81	4.2	4	22	92	80	228	9457.18	12016.99	24446.32
5.1	2.25	23	117	45	157.5	2644.22	4.12	4	22	91	80	226	9269.28	11913.5	24395.47
5.2	2.25	23	120	45	160.88	2773.52	4.04	4	23	93	80	232	9696.32	12469.84	25505.05
5.3	2.25	23	122	45	163.13	2861.5	3.96	4	23	91	80	228	9318.52	12180.02	25134.7
5.4	2.25	23	124	45	165.38	2950.92	3.89	4	23	89	80	224	8948.75	11899.67	24766.88
5.5	2.25	23	126	45	167.63	3041.77	3.82	4	23	88	80	222	8766.88	11808.65	24715.13
5.6	2.25	23	129	45	171	3180.72	3.75	4	24	90	80	228	9183.87	12364.59	25831.72
5.7	2.25	23	131	45	173.25	3275.14	3.68	4	24	88	80	224	8818.12	12093.27	25458.38
5.8	2.25	23	133	45	175.5	3371	3.62	4	24	87	80	222	8638.27	12009.26	25405.53
5.9	2.25	23	136	45	178.88	3517.46	3.56	4	24	85	80	218	8284.58	11802.04	25167.05
6	2.25	23	138	45	181.13	3616.89	3.5	4	24	84	80	216	8110.75	11727.64	25114.08
6.1	2.25	23	140	45	183.38	3717.76	3.44	4	25	86	80	222	8513.67	12231.43	26104.56
6.2	2.25	23	143	45	186.75	3871.73	3.39	4	25	85	80	220	8337.83	12209.56	26185.13
6.3	2.25	23	145	45	189	3976.17	3.33	4	25	83	80	216	7992.18	11968.35	25808.15
<b>6.4</b>	<b>2.25</b>	<b>22</b>	<b>141</b>	<b>45</b>	<b>183.38</b>	<b>3759.96</b>	<b>3.28</b>	<b>4</b>	<b>25</b>	<b>82</b>	<b>80</b>	<b>214</b>	<b>7822.37</b>	<b>11582.33</b>	<b>24866.03</b>

Helis dişli çark tasarımında birinci kademe ilerleme oranına bağlı olarak ikinci kademe iletim oranı ve diğer parametreleri belirlenmiştir. Tasarım işleminde, ilerleme oranına bağlı olarak kademelerin hacim değişimleri ve toplam malzeme hacmi değişimi Şekil 4’de görülmektedir. Malzeme hacmi kriteri için elde

edilen minimum değer sağlandığı iletim oranı grafikte görülmektedir. Grafikte görüldüğü gibi malzeme hacmini minimum yapan iletim oranı değerlerinin  $i_{12} > i_{34}$  ( $6.4 > 3.28$ ) olduğu görülmektedir.



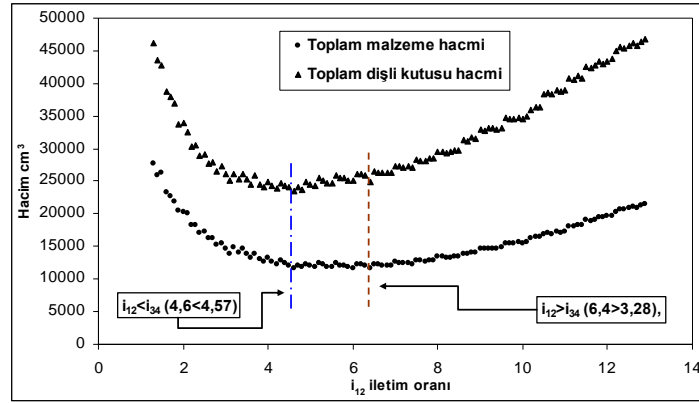
**Şekil 4.** Helis dişli çark için iletim oranına göre hacim değişimi.

Helis dişli çark tasarımında, malzeme hacmi değeri ile kutu hacmi değerlerinin iletim oranına göre değişimi Şekil 5’de verilmiştir. Bu grafikte sınırlama fonksiyonlarını sağlayan malzeme hacmi ve kutu hacmini minimum yapan ilerleme değerleri görülmektedir. Toplam dişli kutusu hacmini minimum yapan iletim oranları  $i_{12} < i_{34}$  şartında elde edilmiştir. Malzeme hacmini minimum yapan iletim oranları ise  $i_{12} > i_{34}$  şartında sağlanmıştır ve bu iletim değerlerinin mukavemet açısından da uygun olduğu literatürde belirtilmektedir. Helis dişli çark tasarımında malzeme hacmi kriterinin dikkate alınmasının daha uygun olacağı grafikten anlaşılmaktadır.

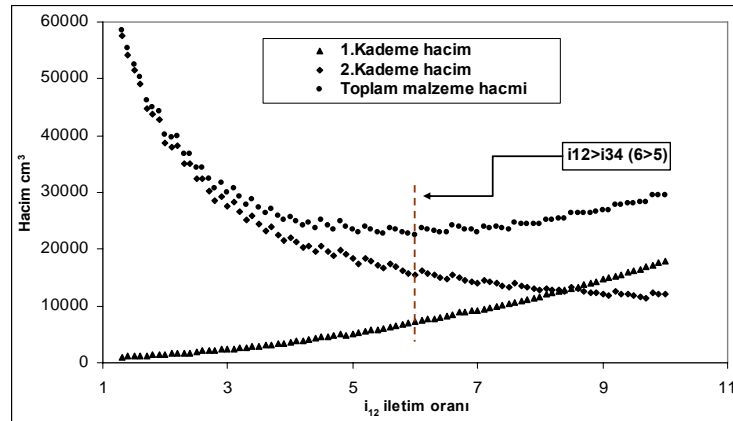
Konik dişli çarklarda ise düz ve helis dişli çarklar için geçerli olan parametreler dikkate alınarak çözüm yapılmıştır. Konik dişli çarklar genellikle düz ve helis dişli çarklar ile dişli dizileri oluşturacak şekilde kullanılırlar. Bu nedenle analitik yaklaşımlı çözüm işleminde konik dişli çarklar, konik~düz şeklinde konik dişli çiftleri oluşturulmuş ve bu dişli mekanizmalarının çözüm işlemi gerçekleştirilmiştir [18].

Konik dişli çarklarda dikkate alınan pinyon diş sayısı,  $14 \leq Z_1 \leq 30$  aralığında, genişlik faktörü ( $\phi_m$ ) ise  $10 \leq \phi_m \leq 40$  aralığında dikkate alınmıştır [17]. Konik-düz dişli çark mekanizması çözüm işleminde elde edilen iletim oranları ile malzeme hacmi ve kutu hacmi değerleri Tablo 4’de görülmektedir. Tablodan da görüldüğü gibi  $i_{12} > i_{34}$  şartını sağlayan iletim oranında elde edilen dişli çarkların malzeme hacimlerinin diğer iletim oranlarından küçük olduğu görülmektedir. Ancak kutu hacmini dikkate aldığımızda ise  $i_{12} > i_{34}$

iletim oranları şartı sağlanmadığı gibi boyutsal olarak da çok farklılıklar meydana geldiği için eşit mukavemetli tasarım elde edilememektedir.



Şekil 5. Helis dişli çark, iletim oranına göre malzeme ve dişli kutusu hacmi değişimi.



Şekil 6. Konik-düz dişli çark için iletim oranına göre hacim değişimi.

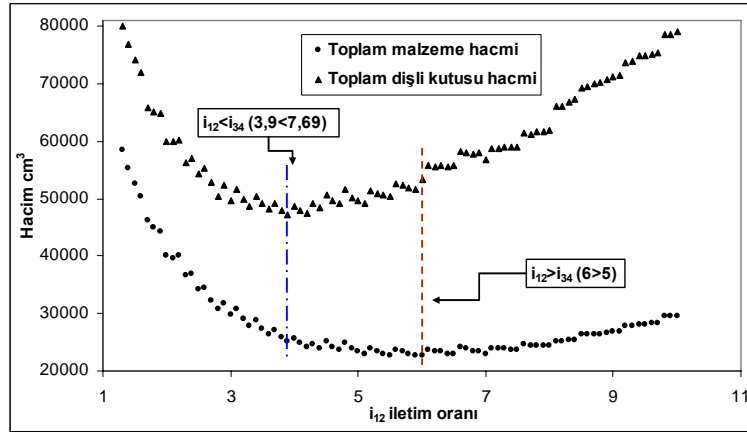
Konik dişli çark tasarımında, birinci kademe konik, ikinci kademe düz dişli olan dişli çiftleri için çözüm yapılmıştır. Şekil 6'da konik-düz dişli tasarımında, iletim oranına bağlı olarak malzeme hacmi ve kademelerdeki hacim değişimi görülmektedir. İletim oranı arttıkça birinci kademe hacmi artarken ikinci kademe hacmi azalmakta, toplam hacim ise kademe hacimleri ile orantılı olarak azalmaktadır. Malzeme hacminin minimum olduğu ilerleme değeri ve bu değerdeki kademe hacimleri de grafikte görülmektedir. Konik-düz dişli tasarımında  $i_{12} > i_{34}$  şartında MMH kriteri sağlanmıştır (Şekil 7).

**Tablo 4.**

Konik-düz dişli çark tasarım parametreleri.

I. Kademe							II. Kademe							Toplam Hacim	
$i_{12}$	$m_1$	$Z_1$	$Z_2$	$b_1$	$A_{01}$	$MMH_1$	$i_{34}$	$m_2$	$Z_3$	$Z_4$	$b_2$	$A_{02}$	$MMH_2$	$MMH$	$MKH$
<b>3.9</b>	<b>2.66</b>	<b>39</b>	<b>152</b>	<b>25</b>	<b>610.5</b>	<b>3469.01</b>	<b>7.69</b>	<b>3.5</b>	<b>24</b>	<b>185</b>	<b>63</b>	<b>365.75</b>	<b>21594.59</b>	<b>25063.6</b>	<b>47225.69</b>
4	2.66	39	156	25	596.75	3629.6	7.5	3.5	25	187	63	371	22082.28	25711.88	48626.93
4.1	2.65	39	160	25	583	3794.15	7.32	3.5	25	183	63	364	21175.96	24970.11	48013.97
4.2	2.65	39	164	25	572	3962.65	7.14	3.5	25	179	63	357	20289.04	24251.69	47404.55
4.3	2.65	39	168	25	561	4135.09	6.98	4	21	147	72	336	20555.19	24690.29	49196.35
4.4	2.64	39	172	25	547.25	4311.49	6.82	4	21	143	72	328	19491.71	23803.2	48353.52
4.5	2.64	39	176	25	536.25	4491.82	6.67	4	22	147	72	338	20597.7	25089.52	50744.95
4.6	2.64	39	179	25	528	4626.95	6.52	4	22	143	72	330	19534.22	24161.17	49696.42
4.7	2.64	39	183	25	517	4814.2	6.38	4	22	140	72	324	18755.6	23569.79	49239.18
4.8	2.63	39	187	25	508.75	5005.38	6.25	4	23	144	72	334	19841.69	24847.07	51652.8
4.9	2.63	38	186	25	497.75	4945.95	6.12	4	23	141	72	328	19057.64	24003.59	50139.61
5	2.63	38	190	25	489.5	5140.39	6	4	23	138	72	322	18289.87	23430.26	49680.74
5.1	2.63	38	194	25	481.25	5338.76	5.88	4	23	135	72	316	17538.38	22877.15	49223.39
5.2	2.63	38	198	25	473	5541.08	5.77	4	24	138	72	324	18335.99	23877.07	51237.99
5.3	2.62	38	201	25	464.75	5692.8	5.66	4	24	136	72	320	17833.19	23525.99	50978.54
5.4	2.62	38	205	25	459.25	5902	5.56	4	24	133	72	314	17092.55	22994.55	50514.39
5.5	2.62	38	209	25	451	6115.14	5.45	4	24	131	72	310	16607.84	22722.98	50447.33
5.6	2.62	38	213	25	442.75	6332.22	5.36	4	25	134	72	318	17385.55	23717.77	52486.91
5.7	2.61	38	217	25	437.25	6553.23	5.26	4	25	132	72	314	16897.22	23450.45	52418.04
5.8	2.61	38	220	25	431.75	6719	5.17	4	25	129	72	308	16178.28	22897.29	51752.75
5.9	2.61	38	224	25	423.5	6946.9	5.08	4	25	127	72	304	15708.04	22654.94	51683.5
<b>6</b>	<b>2.61</b>	<b>38</b>	<b>228</b>	<b>25</b>	<b>418</b>	<b>7178.73</b>	<b>5</b>	<b>4.5</b>	<b>21</b>	<b>105</b>	<b>81</b>	<b>283.5</b>	<b>15422.83</b>	<b>22601.56</b>	<b>53407.02</b>

Şekil 7’de ise konik dişli tasarımında, malzeme ve kutu hacmi değerlerinin değişimi ve bunların minimum yapıldığı ilerleme değerleri izlenebilmektedir. Minimum malzeme hacmi değeri  $i_{12} > i_{34}$  şartında sağlanırken minimum kutu hacmi değeri  $i_{12} < i_{34}$  şartında sağlanmaktadır. Mukavemet açısından önerilen  $i_{12} > i_{34}$  şartında ele edilen tasarım parametreleri ve hacim değerinin dikkate alınması daha uygun olmaktadır.



Şekil 7. Konik-düz dişli çark, iletim oranına göre malzeme ve dişli kutusu hacmi değişimi.

#### 4. MUKAVEMET ANALİZİ

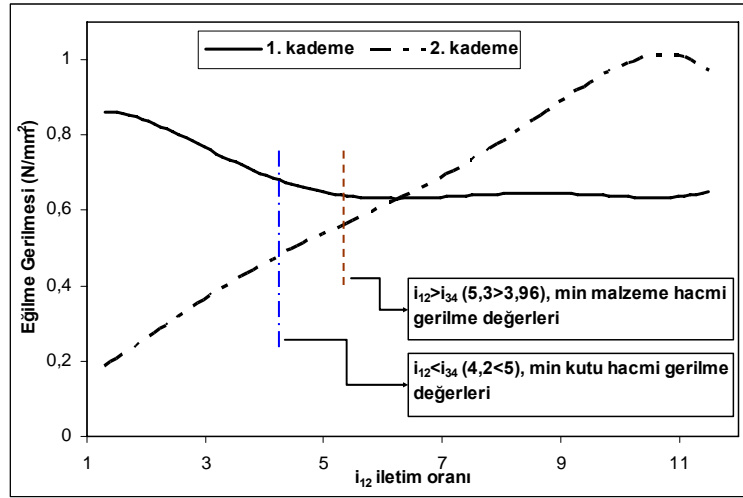
Dişli çarkların tasarımı yapılırken tüm dişlilerin eşit mukavemet özellikleri göstermesi istenir. Tasarımda bu önemli bir yer tutar. Çünkü farklı zaman dilimlerinde hasara uğramış dişlilerin bakım ve onarımlarından dolayı karşılaşılabilecek zaman ve üretimdeki aksamalar imalatta ve endüstride önemli bir maliyet gerektirir. Bunun önüne geçmek için tüm dişlilerin aynı hasara uğrama zaman dilimlerine göre tasarlanması dikkate alınması gereken önemli bir parametredir.

Bu çalışmada yukarıda bahsedildiği gibi, malzeme hacmi ve kutu hacmi tasarım metodolojisinde dişli çark mekanizmalarında kademeler arasındaki dişlilerde meydana gelen eğilme ve aşınma gerilmeleri incelenmiştir. Dişli çarklarda karşılaşılan en temel hasar şekilleri dişlerin eğilmeden dolayı kırılması ve dişli yüzeylerinde oluşan yüzey aşınması (pullanma vb.) hasarlarıdır.

Bölüm 3'de dişli çark mekanizmalarının farklı iletim oranlarında toplam MMH ve MKH grafikleri anlatılmış ve aralarındaki farklılıklara değinilmiştir. Bununla birlikte mukavemet açısından MMH ve MKH tasarımlarında oluşan gerilmelerde araştırılmıştır. Düz dişli çark mekanizması tasarımında MMH ve MKH amaç fonksiyonlarında oluşan eğilme gerilmesi Şekil 8'de, aşınma gerilmesi ise Şekil 9'da görülmektedir.

Grafiklerde birinci ve ikinci kademe pinyon dişlilerinde oluşan gerilme değerleri 0–1 aralığında çizdirilmiş ve MMH ile MKH kriterlerinde oluşan gerilmeler belirtilmiştir. Minimum hacim değeri, MMH şartında sağlanmıştır. Bu hacim değerinde birinci kademe de oluşan eğilme gerilmesi ilerleme ile

orantılı olarak azalmış ve ikinci kademe ile birbirine yaklaşmıştır (Şekil 8). Burada bahsedilen gerilme değerleri birinci ve ikinci kademelerdeki pinyon çarklarında oluşan gerilmelerdir. Bu nedenle birinci ve ikinci kademede oluşan eğilme gerilmesi değerlerinin birbirine yaklaşması hasara uğrama zaman limitlerinin de aynı zamanlara yaklaşması demektir. MKH tasarımında ise kademelerde oluşan eğilme gerilmeleri birbirinden çok ayrık ve farklı zamanlarda hasar oluşmasına neden olacağından maliyet artırıcı bir tasarım teşkil eder. MKH' de birinci kademede oluşan eğilme gerilmesi, MMH ( $i_{12} > i_{34}$ ) birinci kademe şartında oluşan gerilmeden büyük olduğu için kırılmaya uğrama riski daha fazla taşır.

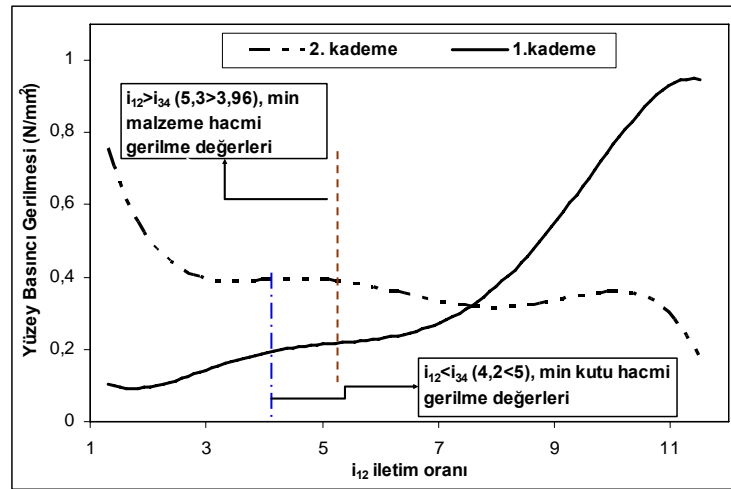


Şekil 8. Düz dişli çark iki kademeli mekanizmada iletim oranına göre oluşan eğilme gerilmesi.

Düz dişli çark mekanizmasında oluşan yüzey basıncı gerilmelerinin kademeler arasındaki dağılımı ise Şekil 9'da görülmektedir. Grafığe göre minimum hacim  $i_{12} > i_{34}$  şartında, MMH kriterinde elde edilmiştir. Bu şart için birinci kademede oluşan gerilme,  $i_{12} < i_{34}$  şartında elde edilen hacim değerinde oluşan gerilme değerinden büyük çıkmaktadır. Ancak ikinci kademe dikkate alındığında,  $i_{12} > i_{34}$  ve  $i_{12} < i_{34}$  şartlarında oluşan gerilme değerleri birbirine yakın çıkmaktadır. Buna göre  $i_{12} > i_{34}$  şartında kademelerdeki yüzey basıncı gerilmeleri arasındaki farklılık  $i_{12} < i_{34}$  şartında oluşan gerilme farkından daha küçük olması ve minimum hacim değerinin yine bu şartta sağlanması, burada elde edilen parametrelerin en uygun değerler olduğunu göstermektedir.

Helis dişli çark mekanizmasında (Şekil 10) birinci kademede oluşan eğilme gerilmesi  $i_{12}=3,7$  değerine kadar düşmektedir. Bu değerden sonra bir miktar artma ve azalma göstermekte ama genel olarak doğrusala yakın bir eğilim ile devam etmektedir. Tasarım işleminde ikinci kademede oluşan gerilme

değeri ise  $i_{12}$  değerinin büyümesi ve  $i_{34}$  değerinin ise küçülmesi ile orantılı olarak artan bir dağılım göstermektedir. Bu veriler altında helis dişli çark tasarımında minimum hacim değeri  $i_{12} > i_{34}$  ( $6,4 > 3,28$ ) iletim oranı değerinde, MMH kriterinde elde edilmiştir. MKH kriterinde birinci kademede oluşan gerilme, MMH kriterinde oluşan gerilmeye yakın çıkarken ikinci kademede oluşan gerilme küçük çıkmaktadır. Ancak hacim ve kademeler arasında oluşan gerilme farklılıklarının düşük olmasını göz önüne aldığımızda  $i_{12} > i_{34}$  kriterindeki tasarım dikkate alınmalıdır.

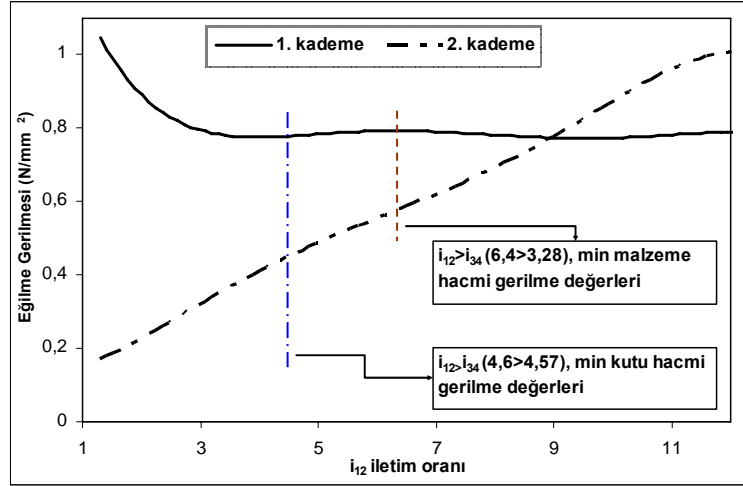


**Şekil 9.** Düz dişli çark iki kademeli mekanizmada iletim oranına göre oluşan yüzey basıncı gerilmesi.

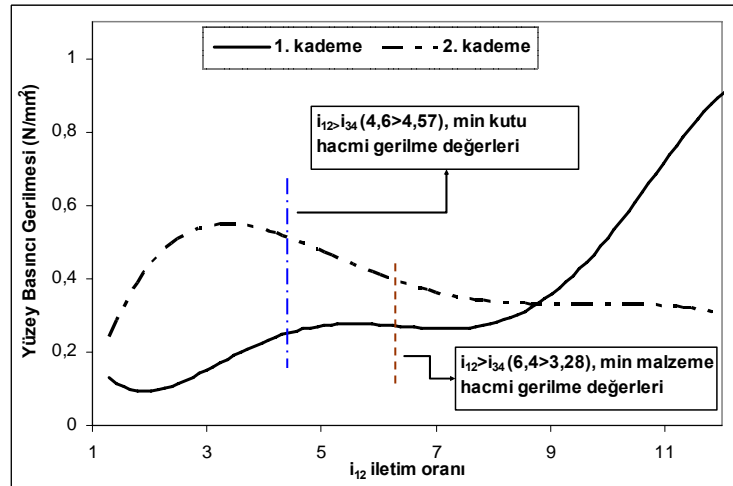
Helis dişli çarkta meydana gelen yüzey basıncı (aşınma) gerilmesinde (Şekil 11), kademelerdeki ilerleme oranının değişimi neticesinde oluşan gerilme farklılıkları görülmektedir. İlerleme oranının değişmesi dolayısıyla diş sayılarını ve modülün değişmesini etkilediğinden bu parametrelerde meydana gelen değişimler ile yüzey basıncı da değişmektedir. birinci kademede  $i_{12}=3$  değerine kadar artmakta sonra tekrar düşmekte,  $i_{12}=8.7$  değerinden sonra ise yaklaşık olarak paralellik göstermektedir. İkinci kademede ise gerilme değeri ilerleme değeri ile birlikte artan bir eğilim göstermekte olup, iletim oranı 5 ile 8 arasında paralellik göstermekte olup buradan sonra tekrar artışla devam etmektedir. Yüzey basıncı gerilmesi açısından yine MMH kriterinde birinci ve ikinci kademe arasındaki gerilme farkının küçük olduğu görülmektedir.

Konik dişli çark mekanizmasında (Şekil 12) birinci kademede oluşan eğilme gerilmesi  $i_{12}=4.6$  değerine kadar azalmakta sonra sabit olarak  $i_{12}=6$  değerine kadar devam etmekte ve bu değerden sonra tekrar artmakta ve azalma göstermektedir. Birinci kademede eğilme gerilmesi  $i_{12}=3.9$  (MKH) değerinde,  $i_{12}=6$

(MMH) değerinden büyük çıkmaktadır. İkinci kademede ise eğilme gerilmesi  $i_{12}$  ilerleme oranı ile orantılı olarak sürekli artış göstererek değişmiştir. İkinci kademede eğilme gerilmesi,  $i_{12} < i_{34}$  (MKH) değerinde,  $i_{12} > i_{34}$  (MMH) değerinden daha küçük çıkmıştır. Ancak grafik incelendiğinde  $i_{12} > i_{34}$  (MMH) kriterinde birinci ve ikinci kademede oluşan eğilme gerilmesi arasındaki farkın,  $i_{12} < i_{34}$  (MKH) kriterinde kademeler arasında oluşan farktan küçük olduğu görülmektedir.

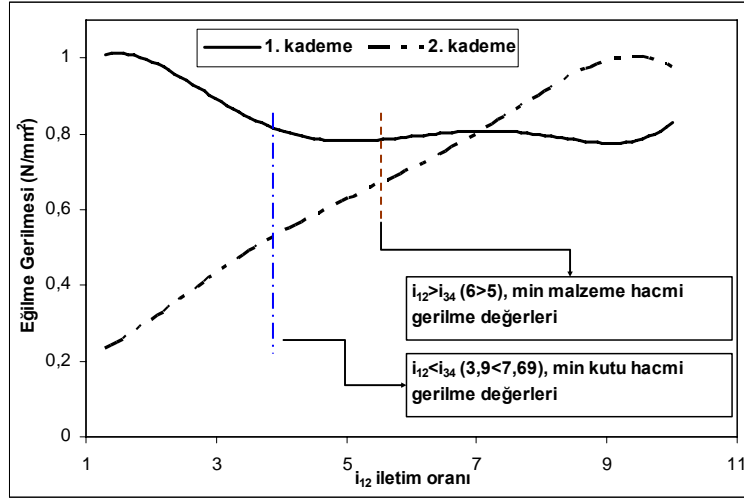


Şekil 10. Helis dişli çark iki kademeli mekanizmada iletim oranına göre oluşan eğilme gerilmesi.



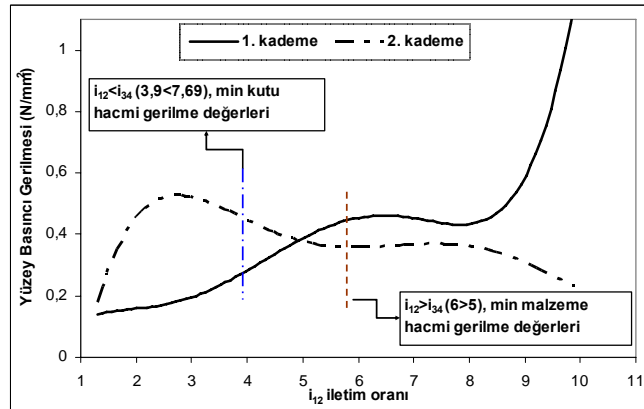
Şekil 11. Helis dişli çark iki kademeli mekanizmada iletim oranına göre oluşan yüzey basıncı gerilmesi.





Şekil 12. Konik dişli çark iki kademeli mekanizmada iletim oranına göre oluşan eğilme gerilmesi.

Konik dişli çarkta kademeler arasında oluşan yüzey basıncı gerilmesinde (Şekil 13), ilerleme oranına bağlı olarak kademelerde oluşan gerilme değişimi görülmektedir. Birinci kademede  $i_{12} > i_{34}$  (MMH) kriterine kadar yüzey basıncı gerilmesi artmakta sonrasında ise azalan ve tekrar artan bir eğilim ile devam etmektedir. İkinci kademede ise  $i_{12} > i_{34}$  (MMH) kriterine kadar azalan ve buradan sonra sabit ve tekrar azalan bir eğilim ile devam etmektedir. Yüzey basıncı gerilmesi açısından grafik (Şekil 13) incelendiğinde yine eğilme gerilmesi grafiğinde (Şekil 12) olduğu gibi  $i_{12} > i_{34}$  (MMH) kriterinde birinci ve ikinci kademede oluşan gerilmeler arasındaki farkın,  $i_{12} < i_{34}$  (MKH) kriterinde kademeler arasındaki farktan küçük olduğu görülmektedir.



Şekil 13. Konik dişli çark iki kademeli mekanizmada iletim oranına göre oluşan yüzey basıncı gerilmesi.

## 5. SONUÇ

Yapılan çalışma kapsamında dişli çark mekanizmalarının malzeme hacmi ve kutu hacmi kriterleri amaç fonksiyonu olarak dikkate alınmış ve çözüm gerçekleştirilmiştir. Mukavemet analizleri ise sınırlama fonksiyonları olarak dikkate alınmıştır. Bu fonksiyonlar, dişli çark parametreleri olan diş sayısı, modül ve diş genişliği parametrelerinin fonksiyonu şeklinde oluşturulmuştur. Amaç fonksiyonları ve sınırlama fonksiyonlarını sağlayan dişli parametrelerinin elde edilmesi için iletim oranı, modül ve diş sayısı parametreleri taranarak çözüm yapılmıştır.

Dişli çark mekanizmasının öncelikle malzeme hacmi amaç fonksiyonunu sağlayacak dişli parametreleri ve bunun sonucunda MMH değeri bulunmuştur. Bu işlemler sırasında dişli mekanizmasının kutu hacminin de tasarımı yapılmıştır. Tasarım parametrelerinin hangi değerlerinde malzeme hacminin minimum değeri sağladığı ve hangi değerlerde MKH değerini sağladığı belirlenmiştir. Dişli tasarım sürecinden elde edilen MMH ve MKH değerlerinin karşılaştırması yapılırken yine bu hacim kriterinde elde edilen gerilme değerleri de incelenmiştir.

Dişli mekanizmalarında elde edilen hacim değerleri ve iletim oranları incelendiğinde tasarım işleminin uygunluğu yönünden, gerilmeler açısından  $i_{12} > i_{34}$  iletim oranı yaklaşımının daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. İletim  $i_{12} < i_{34}$  oranında, MKH kriterini sağlayan tasarım elde edilebilmektedir. Ancak bu hacimde elde edilen parametrelerden dolayı kademeler arasındaki gerilme farklılıklarının daha büyük olduğu görülmüştür. Gerilme farklılıklarının çok farklı olması hasara uğrama zaman limitlerinin farklı olmasına neden olacağından maliyet artırıcı bir etken olarak karşımıza çıkacaktır. İlerleme değeri  $i_{12} > i_{34}$  şartında elde edilen tasarımda oluşan gerilmeler arasındaki fark küçük olduğundan uygun bir tasarım olarak dikkate alınması daha elverişlidir.

Çalışmadan elde edilen verilere göre, minimum hacim değerinin düz, helis, ve konik dişli mekanizmalarında, minimum malzeme hacmi kriterinde elde edildiği görülmüştür. Özellikle  $i_{12} > i_{34}$  ilerleme şartında MMH kriteri elde edilmiştir. İlerleme  $i_{12} < i_{34}$  şartında ise genellikle MKH kriteri sağlanmış olup, sadece helis dişlide  $i_{12} > i_{34}$  (4,6>4,57) şartında MKH kriteri sağlanmıştır. Bu çalışma, dişli mekanizması tasarımında önceden yapılacak bir başlangıç ve amaca yönelik tasarım işlemi olarak önem arz etmektedir. Bu tasarım süreci ile tasarımda çıkması muhtemel olumsuzluklarında önceden belirlenerek önüne geçilmesi imkanı bulunmuş olacaktır.

## KAYNAKLAR

1. T.H. Chong, I. Bae, G.J. Park, Mechanism and Machine Theory, 37 (2002) 295.
2. V. Ramamurti P. Gautam A. Kothari, *Advances in Engineering Software*, 28(1) (1997) 73.
3. L. P. Pomrehn, P. Y. Papalambros, ASME J. of Mech. Design, 117(3) (1995) 419.
4. M. Ognjanovic, Research in Engineering Design, 8(3) (1996) 178.
5. A. Flodin, TriboTest, 7 (1) (2000) 45.
6. M. Dolen, H. Kaplan, A. Seireg, International Journal of Computer Applications in Technology, 24 (2005) 110.
7. D. Su, M. Wakelam, K. Jambunathan, Journal of Materials Processing Technology, 107(1-3) (2000) 53.
8. B. Abersek, V. Popov, Advances in Engineering Software, 35 (2004) 461.
9. Q. Li, J. Zhou, Y. Zhong, Chinese Journal of Mechanical Engineering, 35(5) (1999) 27.
10. P.M. Shariat, R. W. Toogood, Intelligent Engineering Systems Through Artificial Neural Networks, ASME, 5 (1995) 375.
11. J.Gaspersic, J. Flasker, Journal of Mechanical Engineering, 42(9-10) (1996) 229.
12. K. Deb, M. Goyal, Journal of Mechanical Design Transactions of the ASME, 120 (1998) 162.
13. K. Deb, S. Jain, Multi speed gearbox design using multi objective evolutionary algorithms, KanGAL Report No. 2002001
14. A. C. Rao, Mechanism and Machine Theory, 38 (2003) 135.
15. B. Samanta, Mechanical Systems and Signal Processing, 18 (2004) 1273.
16. G. Niemann, Makina Elemanları Cilt III, İTÜ matbaası, İstanbul, (1970).
17. A. Bozacı, İ. Kocaş, Ö. Ü. Çolak, Makina Elemanlarının Projelendirilmesi, Çağlayan Kitabevi, İstanbul, 14(1,16) (2001).
18. M. Zeyveli, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bil. Enst., Ankara, (2005).