

GENETİK ALGORİTMA İLE HIZ KUTUSU DİŞLİ TASARIMI

Metin ZEYVELİ

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EYLÜL 2005
ANKARA**

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI VE GENETİK ALGORİTMA	3
2.1. Literatür Araştırması	3
2.1.1. Genetik algoritma ile dişli tasarımı ve optimizasyonu	3
2.1.2. GA - FEM birleşimi ve diğer çalışmalar.....	9
2.2. Genetik Algoritma.....	11
2.2.1. Genetik algoritmaların tanımı ve tarihçesi.....	11
2.2.2. Genetik algoritmaların çalışma prensibi	13
2.2.3. Genetik algoritmanın temel teoremi (Şema Teoremi)	17
2.2.4. Problem temsili, genler ve kromozomlar	18
2.2.5. Başlangıç yığınının oluşturulması	20
2.2.6. Değerlendirme fonksiyonu	20
2.2.7. Yeniden üretim operatörü ve seçim mekanizmaları	21
2.2.8. Genetik algoritma operatörleri	23
2.2.9. Genetik algoritmalarındaki kontrol parametreleri	26
2.2.10. Genetik algoritmalar ve uygulama alanları	27
2.2.11. Genel uygulama alanları	28

	Sayfa
2.2.12. İşletmelerdeki uygulama alanlar	29
2.2.13. Genetik algoritmalar ve kısıtlı optimizasyon problemleri	30
3. DİŞLİ ÇARKLARIN TASARIMI.....	31
3.1. Dişli Çarklar	31
3.1.1. Dişli çarkların ana boyutları	31
3.1.2. Düz dişli çarklar için diş dibi gerilmeleri hesabı	33
3.1.3 Düz dişli çarklar için yüzey basıncı hesabı.....	37
3.2. Helisel Dişli Çarklar.....	38
3.2.1. Helisel dişli çarklar için diş dibi gerilmeleri hesabı.....	38
3.2.2. Helisel dişli çarklar için yüzey basıncı hesabı	41
3.3. Konik Dişli Çarklar.....	41
3.3.1. Konik dişli çarklar için diş dibi gerilmeleri hesabı	42
3.3.2. Konik dişli çarklar için yüzey basıncı hesabı	44
4. DİŞLİ ÇARKLARIN ANALİTİK YAKLAŞIMLI ÇÖZÜMLERİ.....	46
4.1. Düz Dişli Çark Kademeleri İçin Analitik Yaklaşımli Çözüm	48
4.1.1. Tasarım değişkenlerinin tanımlanması	48
4.1.2. Çalışma şartı ve sabit değişkenlerin tanımlanması	49
4.1.3. Sınırlama fonksiyonlarının oluşturulması	50
4.1.4. Amaç fonksiyonunun oluşturulması	52
4.1.5. Analitik yaklaşım, düz dişli çark, tek kademeli mekanizma çözümü	54
4.1.6. Analitik yaklaşım, düz dişli çark, iki kademeli mekanizma çözümü	60

Sayfa

4.2. Helisel Dişli Çark Kademeleri İçin Analitik Yaklaşımlı Çözüm	65
4.2.1. Tasarım değişkenlerinin tanımlanması	65
4.2.2. Çalışma şartı ve sabit değişkenlerin tanımlanması	66
4.2.3. Sınırlama fonksiyonlarının oluşturulması	66
4.2.4. Amaç fonksiyonunun oluşturulması	67
4.2.5. Analitik yaklaşım, helisel dişli çark, tek kademeli mekanizma çözümü	69
4.2.6. Analitik yaklaşım, helisel dişli çark, iki kademeli mekanizma çözümü	74
4.3. Konik Dişli Çark Kademeleri İçin Analitik Yaklaşımlı Çözüm	78
4.3.1. Tasarım değişkenlerinin tanımlanması	78
4.3.2. Çalışma şartı ve sabit değişkenlerin tanımlanması	79
4.3.3. Sınırlama fonksiyonlarının oluşturulması	79
4.3.4. Amaç fonksiyonunun oluşturulması	80
4.3.5. Analitik yaklaşım, konik~düz ve konik~helis dişli çiftleri için çözüm	81
5. DİŞLİ ÇARKLARIN GA İLE MODELLENMESİ	86
5.1. Amaç Fonksiyonunun Oluşturulması	86
5.2. Sınırlama Fonksiyonlarının Belirlenmesi	86
5.3. Değişkenlerin Tanımlanması Ve Sınır Değerleri.....	87
5.4. Düz Dişli Çarkların GA İçin Kodlanması	89
5.4.1. Modül değişkeninin GA için kodlanması	89
5.4.2. Diş sayısı değişkeninin GA için kodlanması	90
5.4.3. Diş genişliği değişkeninin GA için kodlanması	92

Sayfa

5.4.4. Düz dişli çark kromozom yapısının GA için oluşturulması	93
5.5. Helisel Dişli Çarkların GA İçin Kodlanması	95
5.5.1. Modül değişkeninin GA için kodlanması	95
5.5.2. Diş sayısı değişkeninin GA için kodlanması.....	95
5.5.3. Diş genişliği değişkeninin GA için kodlanması.....	96
5.5.4. Helisel dişli çark kromozom yapısının GA için oluşturulması.....	96
5.6. Konik Dişli Çarkların GA İçin Kodlanması.....	96
6. GA İLE HIZ KUTUSU DİŞLİ ÇARK TASARIMLARI	98
6.1. Düz Dişli Çarkların GA ile Tasarımı	98
6.1.1. GA ile tek kademeli düz dişli çark tasarımı.....	99
6.1.2. GA ile iki kademeli düz dişli çark tasarımı	110
6.2. Helisel Dişli Çarkların GA ile Tasarımı.....	115
6.2.1. GA ile tek kademeli helisel dişli çark tasarımı.....	116
6.2.2. GA ile iki kademeli helisel dişli çark tasarımı.....	122
6.3. Konik Dişli Çarkların GA İle Tasarımı.....	127
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	131
KAYNAKLAR	142
EK-1. Analitik yaklaşımli çözüm programı ana menüsü.....	143
EK-2. Analitik yaklaşımli çözüm, düz dişli çark mekanizması, tek kademe, i=2 için sonuç menüsü	144
EK-3. Analitik yaklaşımli çözüm, düz dişli çark mekanizması, iki kademe, i=6 için sonuç menüsü.....	145
EK-4. Analitik yaklaşımli çözüm, helisel dişli çark mekanizması, tek kademe, i=2 için sonuç menüsü	146
EK-5. Analitik yaklaşımli çözüm, helisel dişli çark mekanizması, iki kademe, i=6 için sonuç menüsü	147

Sayfa

EK-6. Analitik yaklaşımlı çözüm, konik~düz dişli çifti $i=30$ için sonuç menüsü.....	148
EK-7. GA ile dişli tasarımı için hazırlanan birleşik dişli tasarım programının ana menüsü	149
EK-8. GA çözüm düz dişli çark mekanizması, $i=2$ için son jenerasyonda elde edilen kromozomlar ve değişken değerleri	150
EK-9. GA ile çözüm, düz dişli çark mekanizması, tek kademe, $i=2$ için elde edilen malzeme hacmi ve tasarım değişkenleri sonuç menüsü.....	151
EK-10. GA ile çözüm, düz dişli çark mekanizması, iki kademe, $i=6$ için elde edilen malzeme hacmi ve tasarım değişkenleri sonuç menüsü.....	152
EK-11. GA ile çözüm, helisel dişli çark mekanizması, tek kademe, $i=2$ için elde edilen malzeme hacmi ve tasarım değişkenleri sonuç menüsü	153
EK-12. GA ile çözüm, helisel dişli çark mekanizması, iki kademe, $i=6$ için elde edilen malzeme hacmi ve tasarım değişkenleri sonuç menüsü	154
EK-13. GA çözüm, konik~düz dişli çifti $i=30$ için elde edilen tasarım değişkenleri ve sonuç menüsü.....	155
ÖZGEÇMİŞ	156

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Biyolojik ve GA'da kullanılan kromozom	13
Şekil 2.2. Genetik algoritma akış şeması	14
Şekil 2.3. GA'larn toplumsal bakış açısından yapısı	16
Şekil 2.4. Değişkenlerin kodlanması; genotip, fenotip, gen ve kromozom	20
Şekil 2.5. Gen takası (Crossover)	24
Şekil 2.6. Mutasyon şartına bir örnek	25
Şekil 3.1. Diş üzerine etkiyen kuvvetler	33
Şekil 3.2. Dişte çalışma esnasında oluşan gerilmeler	34
Şekil 4.1. Analitik yaklaşım ile çözüm akış şeması	47
Şekil 4.2. İki kademeli düz dişli çark mekanizması	54
Şekil 4.3. Analitik çözüm, düz dişli çark, tek kademe, farklı iletim Oranlarında malzeme hacmi değişimi	56
Şekil 4.4. Analitik çözüm, tek kademe düz dişli çark, $i=2$ için malzeme hacmi iterasyon sürecindeki modül ve diş sayısı değişkenleri	57
Şekil 4.5. Analitik çözüm, tek kademe, düz dişli çark, $i=3$ için malzeme hacmi iterasyon sürecindeki modül ve diş sayısı değişkenleri	58
Şekil 4.6. Analitik çözüm, tek kademe, düz dişli çark, $i=4$ için malzeme hacmi iterasyon sürecindeki modül ve diş sayısı değişkenleri	59
Şekil 4.7. Analitik çözüm, tek kademe, düz dişli çark, $i=5$ için malzeme hacmi iterasyon sürecindeki modül ve diş sayısı değişkenleri	60
Şekil 4.8. Analitik çözüm, düz dişli çark, iki kademe, farklı iletim oranlarında malzeme hacmi değişimi	62
Şekil 4.9. Analitik çözüm, iki kademe, düz dişli çark, $i=6$ için malzeme hacminin iterasyona göre değişimi ve en düşük malzeme hacmi değişkenleri	63
Şekil 4.10. Analitik çözüm, iki kademe, düz dişli çark, $i=11$ için malzeme hacminin iterasyona göre değişimi	64

Şekil	Sayfa
Şekil 4.11. Üç kademeli helisel dişli çark mekanizması	68
Şekil 4.12. Analitik çözüm, helisel dişli çark, tek kademe, farklı iletim oranlarında malzeme hacmi değişimi	70
Şekil 4.13. Analitik çözüm, tek kademe helisel dişli çark, $i=2$ için malzeme hacmi iterasyon sürecindeki modül ve diş sayısı değişkenleri	71
Şekil 4.14. Analitik çözüm, tek kademe, helisel dişli çark, $i=3$ için malzeme hacmi iterasyon sürecindeki modül ve diş sayısı değişkenleri	72
Şekil 4.15. Analitik çözüm, tek kademe, helisel dişli çark, $i=4$ için malzeme hacmi iterasyon sürecindeki modül ve diş sayısı değişkenleri	73
Şekil 4.16. Analitik çözüm, tek kademe, helisel dişli çark, $i=5$ için malzeme hacmi iterasyon sürecindeki modül ve diş sayısı değişkenleri	74
Şekil 4.17. Analitik çözüm, helisel dişli çark, iki kademe, farklı iletim oranlarında malzeme hacmi değişimi	76
Şekil 4.18. Analitik yaklaşımlı çözüm, iki kademe, helisel dişli çark, $i=6$ için malzeme hacminin iterasyona göre değişimi ve en düşük malzeme hacmi değişkenleri	77
Şekil 4.19. İki kademeli konik dişli çark mekanizması	81
Şekil 4.20. Analitik yaklaşımlı çözüm, konik~düz ve konik~helis dişli çiftleri için malzeme hacmi değişimi	83
Şekil 4.21. Analitik yaklaşımlı çözüm, konik~düz dişli çifti $i=30$ için malzeme hacminin iterasyona göre değişimi ve en düşük malzeme hacmi değişkenleri	84
Şekil 4.22. Analitik yaklaşımlı çözüm, konik~helis dişli çifti $i=30$ için malzeme hacminin iterasyona göre değişimi ve en düşük malzeme hacmi değişkenleri	85
Şekil 6.1. GA çözüm, düz dişli çark, tek kademe, $i=2$ için ilk jenerasyon ve son jenerasyon uygunluk fonksiyonu dağılımı	101
Şekil 6.2. Mutasyon oranının uygunluk fonksiyonu sonuçlarına etkileri	102

Şekil	Sayfa
Şekil 6.3. Çaprazlama oranının uygunluk fonksiyonu sonuçlarına etkileri	103
Şekil 6.4. Populasyon sayısının uygunluk fonksiyonu sonuçlarına etkileri	104
Şekil 6.5. GA çözüm, tek kademe düz dişli çark, farklı iletim oranlarındaki malzeme hacmi değişimi	105
Şekil 6.6. GA çözüm, tek kademe, düz dişli çark, $i=2$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı	106
Şekil 6.7. GA çözüm, tek kademe, düz dişli çark, $i=3$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı	107
Şekil 6.8. GA çözüm, tek kademe, düz dişli çark, $i=4$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı	108
Şekil 6.9. GA çözüm, tek kademe, düz dişli çark, $i=5$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı	109
Şekil 6.10. GA çözüm, düz dişli çark, iki kademe, $i=6$ için ilk jenerasyon ve son jenerasyon uygunluk fonksiyonu dağılımı.....	110
Şekil 6.11. GA çözüm, iki kademe düz dişli çark, farklı iletim oranlarındaki malzeme hacmi değişimi.....	112
Şekil 6.12. GA çözüm, iki kademe, düz dişli çark, $i=6$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı.....	113
Şekil 6.13. GA çözüm, iki kademe, düz dişli çark, $i=11$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı.....	114
Şekil 6.14. GA çözüm, iki kademe, düz dişli çark, $i=16$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı.....	114
Şekil 6.15. GA çözüm, iki kademe, düz dişli çark, $i=21$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı	115
Şekil 6.16. Mutasyon oranının uygunluk fonksiyonu sonuçlarına etkileri	116
Şekil 6.17. Çaprazlama oranının uygunluk fonksiyonu sonuçlarına etkileri	117
Şekil 6.18. GA çözüm, tek kademe helisel dişli çark, farklı iletim oranlarındaki malzeme hacmi değişimi	119

Şekil	Sayfa
Şekil 6.19. GA çözüm, tek kademe, helisel dişli çark, $i=2$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı	119
Şekil 6.20. GA çözüm, tek kademe, helisel dişli çark, $i=3$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı	120
Şekil 6.21. GA çözüm, tek kademe, helisel dişli çark, $i=4$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı	121
Şekil 6.22. GA çözüm, tek kademe, helisel dişli çark, $i=5$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı	122
Şekil 6.23. GA çözüm, iki kademe helisel dişli çark, farklı iletim oranlarındaki malzeme hacmi değişimi.....	124
Şekil 6.24. GA çözüm, iki kademe, helisel dişli çark, $i=6$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı.....	125
Şekil 6.25. GA çözüm, iki kademe, helisel dişli çark, $i=11$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı	126
Şekil 6.26. GA çözüm, iki kademe, helisel dişli çark, $i=16$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı	126
Şekil 6.27. GA çözüm, iki kademe, helisel dişli çark, $i=21$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı	127
Şekil 6.28. GA çözüm, konik-düz ve konik-helis çifti $i=30$ için malzeme hacmi değişimi	129
Şekil 6.29. GA konik-düz dişli çifti $i=30$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı	130
Şekil 6.30. GA konik-helis dişli çifti $i=30$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı	130
Şekil 7.1. Düz dişli çark, tek kademe, Analitik yaklaşım ve GA ile çözüm minimum malzeme hacmi karşılaştırılması	131
Şekil 7.2. Helis dişli çark, tek kademe, Analitik yaklaşım ve GA ile çözüm, minimum malzeme hacmi karşılaştırılması	132
Şekil 7.3. Konik dişli çark, tek kademe, Analitik yaklaşım ve GA ile çözüm, minimum malzeme hacmi karşılaştırılması	134

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Düz dişli tasarımı için çalışma şartı ve sabit değişkenleri	50
Çizelge 4.2. Analitik yaklaşımli çözüm, düz dişli çark, tek kademe parametre ve değişkenleri	55
Çizelge 4.3. Analitik yaklaşımli çözüm, düz dişli çark, iki kademe parametre ve değişkenleri	61
Çizelge 4.4. Analitik yaklaşımli çözüm, helisel dişli çark, tek kademe parametre ve değişkenleri	69
Çizelge 4.5. Analitik yaklaşımli çözüm, helisel dişli çark, iki kademe parametre ve değişkenleri	75
Çizelge 4.6. Analitik yaklaşımli çözüm, konik~düz ve konik~helis dişli mekanizması, iki kademe parametre ve değişkenleri	82
Çizelge 5.1. GA için, diş genişliği, pinyon ve çark diş sayılarının kademe ve iletim oranlarına göre aldıkları sınır değerler	88
Çizelge 5.2. GA, düz dişli çark, modül değişkenleri ve kodlama yapıları	90
Çizelge 5.3. GA, düz dişli çark, pinyon diş sayısı değişkenleri ve kodlama yapıları.....	91
Çizelge 5.4. GA, düz dişli çark, çark dişlisi diş sayısı değişkenleri ve kodlama yapısı	92
Çizelge 5.5. GA ile çözüm için, değişkenlerin kodlanması ve dizi uzunlukları	94
Çizelge 5.6 GA ile çözüm için, kromozom yapısının oluşturulması ve dizi uzunluğu	94
Çizelge 6.1. Düz dişli çark, tek kademe, $i=2$ için ilk jenerasyon Populasyon Dağılımı	100
Çizelge 6.2. GA ile çözüm, düz dişli çark, tek kademe parametre ve değişkenleri	104
Çizelge 6.3. GA ile çözüm, düz dişli çark, iki kademe parametre ve değişkenleri	111
Çizelge 6.4. GA ile çözüm, düz dişli çark, tek kademe parametre ve değişkenleri	118

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.5. GA ile çözüm, dişli çark, iki kademe parametre ve değişkenleri	123
Çizelge 6.6. GA çözüm, iki kademe konik-düz ve konik-helis çifti, parametre ve değişkenleri	128
Çizelge 7.1. Tek kademe Analitik yaklaşım ve GA ile çözüm %'de malzeme hacmi değişimi	132
Çizelge 7.2. Tek kademe Analitik yaklaşım ve GA ile çözüm %'de malzeme hacmi değişimi	133
Çizelge 7.3. Konik-düz ve konik-helis, analitik çözüm ve ga çözüm % malzeme hacmi değişimi	134

GENETİK ALGORİTMA İLE HIZ KUTUSU DİŞLİ TASARIMI**(Doktora Tezi)****Metin ZEYVELİ****GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ****Eylül 2005****ÖZET**

Hız kutuları endüstrinin her alanında hız düşürücü ve artırıcı amaçlar için yaygın olarak kullanılmaktadır. Yararlanılma alanlarına göre farklı tasarımları içermektedir. Klasik olarak kullanılan ve deneysel verilerden elde edilen mukavemet esaslı formüllere göre çalışan analitik yaklaşımlı çözümler uzun zaman almaktadır. Bu sorunu aşmak için Genetik Algoritma (GA) ile hız kutusu dişli tasarımı amaçlanmıştır. Dişli kutusunda kullanılan dişli grupları için düz, helis ve konik dişli çiftleri tek ve iki kademeli olarak minimum malzeme hacmi esas alınarak optimize edilmiştir. Optimizasyon, iletilecek güç, iletim oranı ve pinyon dişlisi devir sayısı dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Diş eğilmesi, diş aşınması ve tanımlanan değişkenlerin sınır değerleri içinde çözümler sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, analitik yaklaşımlı çözümler ile kıyaslanmış ve birbirleriyle örtüştüğü gözlemlenmiştir. GA'nın kısa sürede elde ettiği bu sonuçların, endüstride istenilen özellikteki hız kutularının minimum malzeme koşuluna göre kısa sürede tasarlanmaları için kullanılma olanağı bulunmaktadır.

Bilim Kodu : 708
Anahtar Kelimeler : Dişli Çarklar, Dişli Kutusu, Genetik Algoritma, Optimizasyon
Sayfa Adedi : 156
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Kürşad DÜNDAR
Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Cevdet GÖLOĞLU

GEARBOX WHEELS DESIGN BY GENETIC ALGORITHM**(Ph.D. Thesis)****Metin ZEYVELİ****GAZİ UNIVERSITY****INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY****Eylül 2005****ABSTRACT**

Gearboxes are widely used in every field of industry for the purpose of decreasing and increasing of velocity. They need different designs according to their utilization domains. Classically used analytical approach based solutions that works based on the strength formulas obtained experimental data consume long solution time. To overcome this problem a gearbox wheels design is carried out by using Genetic Algorithm (GA). Gear trains used in gearbox are spur gear, helical and bevel and it is optimized in accordance with an objective function of minimum material volume condition at one and two stages. In the optimization the transmitted power, transmission ratio and revolution of pinion are considered. Tooth bending, surface pitting and limits of the variables defined are used in construction solutions. The results obtained have been compared to the analytical approach based solutions, and it is observed that they were in harmony with one another. The solutions obtained by GA in short time have possibilities to be used in industry for designing the gearboxes at the defined specifications according to minimum material conditions.

Science Code : 708**Key Words : Gear Wheel, Gearbox, Genetic Algorithms, Optimization****Page Number : 156****Adviser : Prof. Dr. Kürşad DÜNDAR****Adviser : Assist. Prof. Dr. Cevdet GÖLOĞLU**

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince ilgi ve yardımlarını esirgemeyen danışmanlarım, Sayın Prof. Dr. Kürşad DÜNDAR ve Yrd. Doç. Dr. Cevdet GÖLOĞLU'na, çeşitli vesilelerle katkıda bulunan ve özellikle Genetik Algoritma ile tasarım konusunda en derin bilgi ve birikimlerini benden esirgemeyip, bu konudaki çıkmazlarda ufuklar açan Yrd. Doç. Dr. Hamit SARUHAN'a, gerek tez çalışmam süresince, gerekse tez yazımında ve diğer zamanlarda gösterdiği yakın ilgi alaka ve her türlü desteklerinden dolayı Arş. Gör. Dr. Abdulmecit GÜLDAŞ'a, maddi-manevi desteklerinden ve çok içten ilgilerinden dolayı Öğr. Gör. Dr. Tayfun MENLİK'e, Arş. Gör. Yakup TURGUT'a, Arş. Gör. Alaattin KAÇAL'a ve yardımlarından dolayı Mehmet ALTUĞ'a ve adlarını burada sayamadığım Anabilim Dalımız ve Bölümümüz Öğretim Elemanlarına, çalışmalarım süresince göstermiş olduğu ilgilerinden dolayı eşime ve çocuklarıma ise özellikle teşekkürlerimi sunarım.

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur

Simgeler	Açıklama
b	Diş genişliği
c	Diş dibi boşluğu
d	Bölüm (yuvarlanma) dairesi çapı
d_a	Diş üstü çapı
d_f	Diş dibi çapı
e	Dişler arasındaki boşluk
F_n'	Temas anında dişi zorlayan kuvvet
F_n	Normal kuvvet
F_t	Teğetsel kuvvet
h	Diş yüksekliği
h_a	Diş başı yüksekliği
h_f	Taban yüksekliği
H_B	Dişli yüzeyinin Brinell sertliği
i	İletim oranı
K_ç	Çentik faktörü
K_d	Dinamik (hız) faktörü
K_e	Diş uzunluk (kavrama) katsayısı
K_f	Form faktörü
K_o	Çalışma (işletme) faktörü
K_m	Malzeme faktörü
K_v	Hız faktörü
K_α	Yuvarlanma noktası katsayısı
K_β	Diş eğim faktörü

Simgeler	Açıklama
m	Modül
m_a	Alın modülü
m_n	Normal modül
m_o	Ortalama modül
M_b	Döndürme momenti
P_c	Çaprazlama oranı
P_m	Mutasyon oranı
P_{em}	Dişli malzemesinin taşıyabileceği emniyetli yüzey basıncı
P_{max}	Dişte meydana gelen maksimum yüzey basıncı
S	Diş kalınlığı
t	Diş adımı (hatve)
Z, Z₁, Z₂, Z₃, Z₄	Diş sayısı
Z_e	Eşdeğer diş sayısı
α	Kavrama açısı
β	Diş eğim (helis) açısı
δ₁, δ₂	Konik dişli çark koni tepe yarı açıları
ε	Kavrama oranı
ψ_m	Genişlik katsayısı
σ_D	Dişli malzemesinin tam değişken mukavemet değeri
σ_e	Dişte oluşan eğilme gerilmesi
σ_{em}	Dişin emniyetle taşıyabileceği eğilme gerilmesi
σ_K	Dişli malzemenin kopma mukavemeti

Kısaltmalar	Açıklama
--------------------	-----------------

BDT	Bilgisayar Destekli Tasarım
GA	Genetik Algoritma
YZ	Yapay Zeka

Kısaltmalar	Açıklama
CNC	Computer Numerical Control
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing

1. GİRİŞ

Bir amacı gerçekleştirmek üzere, düşünceden ürüne giden süreçte birçok problemlerle karşılaşmaktadır. Bu problemlerin çözümünde geleneksel olarak veri toplama, analiz ve optimizasyon yöntemlerinin yanında son yıllarda Bilgisayar Destekli Tasarım (BDT) çalışmalarının artması ile verimlilik açısından çok önemli gelişmeler olmuştur.

İlk olarak çizim alanında ortaya çıkan BDT, tekniklerin geliştirilmesi ile birçok farklı alanlarda da kullanılmaya başlanmıştır. Modern teknolojinin karmaşıklığının artmasından dolayı, sistemlerin tasarımının tüm aşamalarında ve organizasyonunda yüksek kapasiteli bilgisayarlar gereklidir. Araştırmacıların mühendislik tasarımında kullanmak için bilgisayar destekli takımlara yönelmesi çok ümit verici olmuştur.

Mekanik tasarımın ana tabiatı iteratif olmasıdır. Bu nedenle tasarım yapabilen bir Yapay Zeka (YZ) programı geliştirebilmek için iteratif işlemlerin akıllı bir şekilde yönlendirilmeleri gerekmektedir. Tasarım problemlerini formülize etmek ve tasarım bilgisini uygun bir şekilde temsil etmek için tasarım işleminin bir modeli oluşturulmalıdır.

Geleneksel programlama metotları, farklı amaçlara yönelik olarak uzun yıllar süresince kullanılmaktadır. YZ'nın tasarım işlemlerinde kullanılması ile tasarım işlem basamakları esnek bir hale getirilmiştir. Bu esneklik sayesinde farklı tasarımlar kolaylıkla elde edilebilmektedir. Mekanik güç ve hareket iletim elemanları olan dişli çarkların tasarım işlemi ile ilgili birçok yapay zeka ve geleneksel programlar hazırlanmıştır.

Dişli çarkların optimizasyon işlemi çözümü zor olan bir problemdir. Çünkü amaçlar çok sayıda olabilmekte ve bunlara ait kriterlerde farklılık göstermektedir. Bu nedenle farklı amaçlar için kriterlerde farklı değerler almaktadır. Dişli çarkların tasarımında, işlemlerin karmaşıklığı ve değişkenlerin birbirinden farklılıklarını da dikkate alarak hesaplamaların yapılması çok karmaşık bir işlem gerektirmektedir.

Bu Doktora çalışmasında, dişli çarkların tasarım işleminin karmaşık ve doğrusal olmayan değişkenlerine bağlı olarak yapılması için YZ metotlarından bir tanesi olan Genetik Algoritmalar (GA) kullanılmıştır. GA'lar geleneksel yöntemlerin tersine yerel optimumu değil genel optimumu araştıran, farklı problemlere kolaylıkla uygulanabilmesi ile son yıllarda kullanımı gittikçe artan bir arama ve optimizasyon metodudur.

Dişli çark tasarımında farklı tasarım amaçları bulunmaktadır. Bu amaçlar, minimum modül, minimum eksenler arası, minimum malzeme ağırlığı v.b. şeklinde sıralanabilir. Bu çalışmada minimum malzeme hacmi, çözümü düşünülen problemin amaç fonksiyonu olarak dikkate alınmış ve tasarım işlemi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, dişli sistemleri düz, helis ve konik dişliler olarak üç ayrı sınıfta incelenip, bu mekanizmaların tasarım işlemleri gerçekleştirilmiştir. Tasarım işleminde her mekanizmanın kendine has özellikleri dikkate alınmış ve gerekli olan değişkenler de amaç fonksiyonu gibi sınırlama fonksiyonu şeklinde tanımlanmıştır.

Bu tezin odaklandığı nokta tasarım probleminin optimizasyon problemi olarak yeniden formüle edilmesi ve GA ile çözümünün sağlanmasıdır. Bu nedenle belirtilen dişli çark mekanizmaları GA'ya uygun olarak modellenmiş ve bu modelleme ile dişli çark mekanizmalarının çözümü yapılmıştır. Öncelikle bir kademeli olarak tasarlanan GA modeli ile dişli mekanizmalarının tasarımı yapılmıştır. Ayrıca bu dişli mekanizmaları redüktör mekanizmalarında olduğu gibi iki kademeli düz, helis ve konik dişli mekanizmaları olarak da tasarlanmış ve çözümler elde edilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI VE GENETİK ALGORİTMA

2.1. Literatür Araştırması

BDT ilk olarak çizim alanında etkin olarak kullanılmıştır. Programlama teknikleri geliştikçe, sonlu elemanlar metodu gibi kinematik/dinamik modelleme yazılım paketlerine geçilmiştir. Ancak bu paketler tasarım için değil de tasarımdan sonraki analiz kısmı için kullanılmaktadır. İyi bir tasarım için iyi bir analiz gerekir. Fakat sadece analiz yöntemleri ile tasarımın oluşturulması mümkün değildir.

Tasarım problemlerinin karmaşık yapısı, bu problemlerin çözülmesi için birçok alternatifin oluşmasına neden olmaktadır. Bu alternatifler arasından, bilgiyi temel alan yaklaşımlar, tasarım işleminin niteliksel yapısına çok iyi uyum sağlamakta ve bu alandaki problemlerin çözümü için en uygun zemini hazırlamaktadır.

Burada literatürde geçen YZ ile ilgili çalışmalar incelenmiştir. Yapılan çalışmalar, kullanılan yöntemlere göre aşağıda alt başlıklar halinde özetlenmeye çalışılmıştır.

2.1.1. Genetik algoritma ile dişli tasarımı ve optimizasyonu

Ognjanovic, çok kademeli dişli mekanizmalarının tasarımı için bir çalışma yapmıştır. Yapılan çalışmada tasarım metodolojisi otomatikleştirilmiştir ve bu işlem yapılırken boyutsal tasarım ve konfügrasyon tasarım sürecinden faydalanılmıştır. Tasarım süreci dört aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada kullanıcı öncelikli olarak redüksiyon oranını belirlemektedir. İkinci aşamada rasgele araştırma metodu kullanılarak her bir aşamanın iletim oranı seçilmektedir. Üçüncü aşamada bir önceki aşamada seçilen iletim oranları kullanılarak boyutsal tasarım gerçekleştirilmektedir. Bu aşamada temel tasarım parametrelerinin belirlenmesinde jenerasyon ve test metodu yöntemi kullanılmıştır. Diş üstü çapı, böğür çapı gibi diğer tasarım parametreleri, konfügrasyon tasarımı için bu aşamada hesaplanır ve işlem

sonlandırılır. Dişli mekanizmasının tasarımında minimum hacim dikkate alınarak dişli pozisyonları belirlenmiştir (1).

Flodin, sonsuz vida-dişli çark mekanizmasının temas ve ağ yapılarının simülasyonu için Visual Basic programlama dili kullanarak bilgisayar programı hazırlamıştır. Dişlerin temas analizi, iletim hatalarının, temas yollarının ve yatak temasının fonksiyonu olarak ifade edilip çıktı olarak gösterilmiştir. Çalışmada, iletim hataları için önceden tasarlanmış parabolik fonksiyon kullanılıp, özellikle çok ağızlı sonsuz vida-dişli mekanizmalarında titreşimlerin seviyelerinin azaltılması ve düzenleme hatalarının sebep olduğu iletim hatalarını absorbe etmeyi sağlayacak şekilde düzenlenmiştir (2).

Su, vd., yaptıkları çalışmada zeki karma (hibrid) sistem denilen bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Geliştirilmiş olan zeki karma (hibrid) sistem yaklaşımı ile tasarım sürecindeki bir çok aşama ve üretim, özellikle ürün tasarımına ait detayları içeren kavramsal tasarım, detay tasarımları, süreç planlama, maliyet ve CNC üretimine kadar geçen aşamalar bütünleştirilmiştir. Zeki karma sistem yaklaşımı, kural tabanlı sistem, yapay sinir ağları, (GA), hipermedya (HM) ve CAD/CAE/CAM paketlerini bir çerçeve içerisinde bütün haline getirmiştir. Tasarım ve üretim uzmanlığı kural tabanlı sistem ve yapay sinir ağları ile elde edilirken nümerik analiz, tasarım optimizasyonu, mühendislik tasarımı ve veri işleme gibi diğer görevler GA, HM ve CAD/CAE/CAM kullanılarak düzenlenmiştir. Kural tabanlı sistem, geliştirilen sistemde tüm işlemleri kontrol eden yönetici olarak çalışmaktadır (3).

Chen, otomotiv ve havacılıkta büyük güç iletimi uygulamalarında oldukça önemli bir konu olan çok kademeli düz dişlilerin minimum hacimli olarak tasarlanması ile ilgili bir çalışma yapmıştır. Geleneksel tasarımda eğilme gerilmesi ve yüzey basıncı gerilmelerine bağlı olarak optimum dişli çapının bulunması tasarımın ilk aşamasını oluşturmaktadır. Bu çalışmada ise temel prensip olarak rasgele seçilmiş karmaşık dişli mekanizmalarının uygulanabilirliği için optimum tasarım formülleri ile çoklu amaçlar genelleştirilmiştir. Metodoloji aynı yükleme ve tasarım kriterlerine sahip iki

ve üç kademeli redüksiyon ünitelerinin tasarımına uygulanmıştır. Bu yaklaşım, temel çok amaçlı optimizasyon prosedürünü kullanarak, minimum hacim ve yüzey aşınma ömrü ile birlikte arttırılmış faydalar gösterilmiş ve bu şekilde geleneksel tasarım prosedürünün de geliştirilmesi sağlanmıştır (4).

Liansheng, mekanik tasarım problemleri için optimize edilmiş ve arttırılmış kavrama hafızası modeli adlı bir çalışma yapmıştır. Bu amaçla duruma dayalı muhakeme (Case Based Reasoning, CBR) mekanik tasarım işlemine uygulanmıştır. Burada amaç tasarım problemleri çözülürken bilgilerin kaydedilmesi ve daha sonraki yenileştirme tasarımlarında kullanılmasıdır. Geliştirilen verimli hafıza modeli mekanik tasarıma uygulanacak CBR uygulama süreci için çok önemlidir. Çalışmada EMOP (Episodic Memory Organization Packet) hafıza modelinin güncel uygulama problemlerinin çözümü ve sınırlamalarının nasıl üstesinden geldiği gösterilmiştir. Yeni uygulamalar optimizasyon ve yeni arttırmalar için daha çok imkan sunmaktadır. Arttırmalar, tasarımcının indekslerde ve olaylarda ekleme veya çıkarma yapabilmesine izin veren olayların yeniden elde edilmesi ve özelliklerin değiştirilmesi için ihtimalleri içermektedir (5).

Myint, ve Tabucanon, eş zamanlı mühendislik tasarımında alternatif üretimleri oluşturmak için uzman sistemli bir yapı, adlı çalışmada, ürün uygulama modelinden elde edilen ürünler ve müşteri ihtiyaçları temeline dayalı alternatif ürünlerin oluşturulması için bir uzman sistem yapısı anlatmışlardır. Özel tasarıma bağlı olarak ilkel parçalar ve nitelikler elde edilmekte ve bilgi tabanına kaydedilmektedir. Alternatif tasarımların oluşturulması bilgi tabanına kaydedilen ilkel parçaların kombinezonları temeline dayalı olarak, kurallar uzman sistem tarafından geliştirilmekte ve müşteri ihtiyaçları ağırlıklı olmaktadır. Alternatifler elde edildiğinde birçok mümkün alternatif elde edilmiş olabilir. Son seçim için mümkün alternatifler fonksiyonel gramer yaklaşımı ile yukardan aşağıya doğru kısıtlanır (6)

Marcelin, dişlilerin genetik optimizasyonu makalesinde, bilgisayar yardımıyla dişli tasarımında, stokastik optimizasyon metodu olan GA ve penaltı seçim metodunu

uygulamış ve bunun olabirliğini incelemiştir. Çok kriterlerin optimizasyonun da n tane amaç fonksiyonunun string olarak hesaplanmasında $F = F(f_1, f_2, \dots, f_n)$ modeli kullanılmıştır. Burada tasarımın amacı $f_i = f_i(x_j)$ ve x_j ise j tasarım parametrelerinin bir setini ifade etmektedir. Bu amaçla bir dişli tasarım probleminin optimizasyonu için tanımlanan değişkenler; iletilecek güç (P), iletim oranı (n_1/n_2) ve ömür olarak tanımlanmıştır. Temel tasarım değişkenleri ise diş sayısı (z_1 ve z_2), eksenler arası mesafe katsayıları (x_1 ve x_2), helis açısı (β) ve pinyon ve çarkın malzemelerinden oluşmaktadır. Çalışmada x_1 ve x_2 katsayıları ve helis açısı sadece reel değer, diğerleri ise tamsayı değer olarak tanımlanmıştır (7).

Yokota, vd., GA kullanılarak dişlilerin optimum ağırlık tasarım problemi için bir çözüm metodu isimli makalede, dişlilerde optimal ağırlık tasarımı için, dişlilerin eğilme mukavemeti, millerin burulma mukavemeti ve dişli boyutu sınırlamaları ile tasarım işlemi formüleleştirilmiştir. Bu işlem için geliştirilmiş GA kullanılarak doğrusal olmayan sınırlamalar korunmuş ve doğrusal olmayan tamsayı programlama ile problem çözülmüştür. Formüleştirmede amaç fonksiyonu $F_{\min}(b, d_1, d_2, z_1, m) = W$ şeklinde tanımlanmıştır. Burada dişli genişliği (b), pinyon ve çarkın mil çapları (d_1, d_2), pinyon diş sayısı (z_1), modül (m) olmak üzere sınırlamalar ;

$$G_1(b, m) = F_s \geq b_1, \quad [2.1]$$

$$G_2(b, m, z_1) = \frac{F_s}{F_p} \geq b_2, \quad [2.2]$$

$$G_3(d_1) = d_1^3 \geq b_3, \quad [2.3]$$

$$G_4(d_2) = d_2^3 \geq b_4, \quad [2.4]$$

$$G_5(\alpha, z_1) = \frac{(1 + \alpha)mz_1}{2} \leq b_5, \quad [2.5]$$

şeklinde tanımlanmıştır. G_1 dişlerin eğilme mukavemetini ve F_s lewis formülünü, G_2 yüzey mukavemetini ve F_p aşınma yükünü, G_3 ve G_4 sırasıyla pinyon ve çark milinin kübik çapını, G_5 'de eksenler arasındaki mesafeyi göstermektedir. W ise dişlilerin ağırlığı olup, amaç fonksiyonundaki tüm değişkenler tamsayı olarak tanımlanmıştır (8).

Li, vd., mekanik-dinamik optimizasyon problemlerinin tasarımı için kompleks şekil metodu ve GA'nın birleştirilmesi ile karma GA geliştirmişlerdir. Algoritma mekanizmasının daha etkili optimum araştırmayı elde etmesi için teorik analizde yapılmıştır. GA prensipleri kullanılarak oluşturulan olumsuz bireyler geliştirilerek evrim süreci hızlandırılmıştır. Yöntemin uygulandığı çalışmalar işlemin başarısını ve basitliğini ispatlamıştır (9).

Duan, vd, saat hareketlerindeki dişli parametrelerinin optimal tasarımı, kombinatoriyal optimizasyon problemi olduğundan, geleneksel optimizasyon yöntemleri ile çözülmesinin çok zor olduğunu öne sürmüşlerdir ve bu problemi çözmek için GA'yı kullanmışlardır. Ancak özel problemlerin GA'nın kullanabileceği şekilde modellenmesi zor bir işittir. Bundan dolayı iletim mekanizmalarındaki değişik dişli parametreleri diziler şeklinde düzenlenmiş ve dişli parametrelerinin optimal çözüm işlemi gerçekleştirilmiştir (10).

Myint, ürün tasarımında eş zamanlı mühendislik adlı çalışmada, eş zamanlı mühendislik çerçevesinde, farklı parçaların tasarımlarının modellenmesi için bir karar verme yapısı sunmuştur. Sistemin tasarlanmasında GA kullanılmıştır. Karar verme yapısı, var olan bir ürüne, değiştirilmesi veya tekrar tasarlanması gerektiği durumlarda uygulanmıştır. Bu yaklaşım temel olarak, üretim realizasyonu ve üretim optimizasyonu denilen iki safhayı kapsamaktadır. Yöntem dişli kutusu tasarım probleminde uygulanmıştır (11).

Tan vd., grafik genetik modelleme yaklaşımı (GGM), isimli çalışmada, yeni bir kavram olan grafik genetik modeli tanımlamışlardır. Bu yaklaşım, her bir tasarım döngüsündeki mekanik ürünlerin geometrik şekillerinin geliştirilmesi prensibine dayalı bir metottur. GGM, bu amaçla ürünlerin özellik ve fonksiyonlarını sınıflandırmaktadır. GGM, mil, dişli ve dişli kutusu gibi ürün geliştirme sistemlerinde kullanılmış ve güçlü bir tasarım aracı olduğu görülmüştür (12).

Shariat, ve Toogood, makine parçalarının parametrik tasarımlarında GA tabanlı yaklaşım çalışmasında, makine parçalarının parametrik tasarımları, verilen şartlar için parçaların sınırlama setinin çözüm süreci olarak ifade edilmiştir. Burada eşitlik ve eşitsizlik sınırlamalarının her ikisini de karşılayacak uygun çözümlerin sayısı elde edilmiştir. Bu yaklaşım dişli kumandalı tasarım örneği kullanılarak gösterilmiştir (13).

Peng, vd., planet dişli iletimlerinin optimizasyonu için reel kodlu GA, isimli bir çalışma yapmışlardır. 2K-H tipi planet dişli iletim sistemlerinin açı değişiklikleri ile global olarak optimize edilmeleri, çok modelli fonksiyon optimizasyon problemidir. Bu nedenle optimizasyon probleminin genel amacı, sistemin dış değerlerinin minimize etmek için hazırlanmıştır ve problemin çözümü için reel kodlu GA tanımlanmış ve kullanılmıştır (14).

Fan, vd., geometrik boyut toleransları için hiyerarşik optimizasyon isimli çalışmada, geometrik boyut toleransının optimizasyonu için bir matematiksel model geliştirmişlerdir ve optimal tolerans tasarım algoritması önermişlerdir. Algoritma optimizasyon işlemini iki aşamaya bölmüştür. Birinci aşamada tasarım merkezli problem çözülmekte ve ikinci aşamada ise maliyetin daha fazla düşürülmesi için istatistiksel optimizasyon çözülmüştür. Algoritma, dişli tasarım problemine uygulanmış ve önerilen sistemin etkili olduğu görülmüştür (15).

Gaspersic, ve Flaker, dişli montajlarının optimizasyonu isimli çalışmada, çok kademeli dişli montajlarının tasarım parametrelerinin optimizasyonu için GA

temeline dayalı bir metot sunmuşlardır. GA kullanılarak, basitleştirilmiş dişli montaj metodu takdim edilmiştir. Geliştirilen optimizasyon yönteminin temel avantajı kararlılık ve birçok optimizasyon problemine uygulanabilir olmasıdır (16).

Liu, vd., çok etkenli sistemler, eş zamanlı mühendislik uygulamalarında çok kullanılmaktadır. Bu sistemlerde, bilgi alış verişlerinin oldukça karmaşık olması ve iletişimdeki güçlükler nedeniyle, çok etkenlerin optimal çözümlerinin gerçekleştirilmesi zor bir iştir. Bu nedenle, çözüme ulaşılmasında GA kullanılmıştır. GAların, genel çok etkenli diyagramlardan daha iyi çözümler verdiği görülmüştür. Araştırma işleminin hızını artırmak için sayaç önerilmiştir. Dişli pompaların tasarımları ile ilgili uygulamalı sonuçlar çok memnun edici olmuştur. Ayrıca GA ile çok etkenli sistemlerin birleşimlerinin, yakınsama sürecini hızlandırdığı ve bunun yanında en iyi global çözümü bulduğu gözlemlenmiştir (17).

Deb, ve Goyal, genetik uyarlamalı araştırmaya dayalı mekanik parça tasarımı için esnek üretim yöntemi isimli makalede, sıfır-bir, farklı ve sürekli değişkenleri içeren, doğrusal olmayan mühendislik tasarım optimizasyon problemlerinin çözümü için bir esnek algoritma sunmuşlardır. Algoritma problem çözümünde sadece değişkenlerin izin verdiği değerleri araştırmakla sınırlandırılmış olduğundan, optimum çözüme ulaşmakta göstermiş olduğu çabada azaltılmıştır. Önerilen metodun uygulama kolaylığı ve etkinliği, literatürden alınan dört farklı tasarım optimizasyon problemine uygulanarak gösterilmiştir. Dişli tasarımında iki kademeli bir tasarımda, her bir dişlinin diş sayısı bulunmuş ve bunlardan elde edilen iletim oranı ile gerekli iletim oranı arasındaki hata payı minimum yapılmaya çalışılmıştır (18).

2.1.2. GA - FEM birleşimi ve diğer çalışmalar

Şekil optimizasyonu, optimal tasarımı bulmak için yapılarının sınır şartlarının değişimini içermektedir. Genellikle bu problemler, ardışık gelen alt problemler tarafından orjinal tasarım probleminin değiştirilmesi ile çözülmüştür. Annicchiarico, ve Cerrolaza, sonlu elemanlar, GA ve β - eğrilerinin birleşiminden oluşan, şekil

optimizasyonu için birleşik bir teknik isimli çalışmada, iki boyutlu şekillerin optimizasyon problemlerinde GA'nın kullanıldığı bir yaklaşımı önermişlerdir. Analitik modelin elde edilmesinde, β spline curves sınırlaması ile otomatik ağ oluşumu kullanılmıştır. Sonlu elemanlar metodu ise uygunluk değerinin tahmin edilmesinde kullanılmıştır. Önerilen yaklaşımın esnekliği ve değişebilirliği, iki sayısal örnek üzerinde tartışılmış ve test edilmiştir. Örnekler bu tekniğin gerçek mühendislik problemleri ile kullanılabileceğini göstermiştir (19).

Matsuoka, vd., kompozitlerin mekanik özelliklerinin ve yapılarının tahmininde, GA ve FEM'nun kullanılması adlı makalede, GA ve FEM'nun birleşiminde oluşan, malzemelerin yapılarının tasarlanması için bir metot geliştirmişlerdir. GA, arzu edilen malzeme yapılarının araştırılmasında FEM ile birleştirilerek kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizi ise, kompleks yapıların karışık poisson's oranı ve elastik modüllerinin tahmin edilmesinde kullanılmıştır. Birleştirilmiş metot, yapıların araştırılmasında iki şekilde uygulanmıştır. Birincide arzu edilen elastik modüllere sahip yapılar sırasıyla bulunmaktadır. İkincide ise yapıların negatif poisson's oranlarını göstermek için yapıları taramaktadır. Eğer araştırılan yapı negatif poisson's oranına sahip ise hesaplamalar devam ettirilir. Bu hesaplamalar sonucunda yüksek elastik özelliğe sahip sürekli şekilde olan tek bir yapı tasarlanmış olur (20).

Singha, vd., maksimum termal burkulma yükleri için yaprak kompozit levhaların optimum tasarımı isimli bir çalışma yapmışlardır. Makalede dört düğümlü kayma deformasyonlu plate elementi kullanılarak sonlu elemanlar ile termal burkulma analizi yapılmıştır. GA ise beş katmanlı platelerin 10 'dan daha fazla değişkenlerinin optimize edilmesinde kullanılmıştır. GA ile optimizasyon probleminin çözümünde penalty (ceza) fonksiyonuna yer verilmiştir (21).

2.2. Genetik Algoritma

YZ tekniklerinden bir tanesi olan GA'lar bu bölüm altında incelenecektir. GA'ların yapısı ve çalışma prensipleri, uygulama alanları ve diğer yöntemlerden farklılıkları ele alınacaktır.

GA, doğal genetikteki kromozom sürecini ve evrimsel prensipleri taklit eden bir arama ve optimizasyon yöntemidir. GA'lar genellikle ikilik (binary) dizi yapılarında kodlanmış çözümlerin rastgele bir veri seti ile araştırmaya başlar. Her çözümün, araştırma ve optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu ile doğrudan ilgili bir uygunluk değeri belirlenir. Sonra genetik operatörler denilen, yeniden üretim (recombination), çaprazlama (crossover) ve değiştirme (mutation) operatörleri ile yeni populasyonlar oluşturulur ve bu işlem bitirme kriteri sağlanıncaya kadar devam eder (22).

2.2.1. Genetik algoritmaların tanımı ve tarihçesi

GA'lar, doğal seçim ilkelerine bağlı olarak biyolojik sistemlerin gelişim sürecini simüle eden bir stokastik arama yöntemidir (23). GA ilk ismini biyoloji, ikinci ismini de bilgisayar biliminden almaktadır.

GA doğal genetik sürece bağlı olarak sürekli iyileşen çözümler üretir. Bunun için "iyi"nin ne olduğunu belirleyen bir uygunluk (fitness) fonksiyonu ve yeni çözümler üretmek için yeniden kopyalama, çaprazlama ve değiştirme gibi operatörleri kullanır. GA'ların bir diğer önemli özelliği de bir grup çözümle uğraşmasıdır. Bu sayede çok sayıda çözümün içinden iyileri seçilip kötülerini elenebilir.

GA'ları diğer algoritmalarından ayıran en önemli özelliklerden biri de seçmedir. Çözümün uygunluğu onun seçilme şansını artırır ancak bunu garanti etmez. Seçim de ilk grubun oluşturulması gibi rasgeledir ancak bu rasgele seçimde seçilme olasılıklarını çözümlerin uygunluğu belirler.

Ünlü matematikçi J. Hadamard "gerek matematikte, gerek başka alanlarda buluş ve icatlar farklı alanlardan düşüncelerin bir araya getirilmesiyle gerçekleşir" demiştir.

Bu söz GA'nın nasıl doğduğunu özetlediği gibi temel çalışma ilkesini de açıklamaktadır (24).

Stokastik bir arama yöntemi olan GA'lar başlangıçta doğrusal olmayan optimizasyon problemlerine uygulanmış olup son zamanlarda yerleşim, atölye çizelgeleme, ders veya sınav programı gibi kombinatoriyal optimizasyon problemlerine de uygulanmıştır. GA'lar literatürlerde geçen bir çok alana başarıyla uygulanmışlardır. Bunlar;

- Bulanık mantık denetleyicilerinin tasarımı,
- Gezgin satıcı problemleri,
- Yapay sinir ağları,
- Optimizasyon,
- Tesis planlama ve yerleşimi,
- Grup teknolojisi,
- Araç yön ve tarife planlaması (25).

Michigan Üniversitesinde psikoloji ve bilgisayar bilimi uzmanı olan John Holland bu konuda ilk çalışmaları yapan kişidir. Mekanik öğrenme (machine learning) konusunda çalışan Holland, canlılarda yaşanan genetik süreci bilgisayar ortamında gerçekleştirmeyi düşündü. Tek bir mekanik yapının öğrenme yeteneğini geliştirmek yerine böyle yapılardan oluşan bir topluluğun çoğalma, çaprazlama, mutasyon, vb. genetik süreçlerden geçip başarılı (öğrenebilen) yeni bireyler oluşturabildiğini gördü. Çalışmalarının sonucunu açıkladığı kitabının 1975'te yayınlanmasından sonra geliştirdiği yöntemin adı GA olarak yerleşti (26).

Ancak 1985 yılında Holland'ın öğrencisi olarak doktorasını veren David E. Goldberg adlı inşaat mühendisi 1989 da konusunda bir klasik sayılan kitabını yayınladıkça kadar GA'ların pek pratik yararı olmayan bir araştırma konusu olduğu düşünülüyordu. Halbuki Goldberg'in gaz boru hatlarının denetimi üzerine yaptığı doktora tezi ona sadece 1985 Genç Araştırmacı (National Science Foundation)

ödülünü kazandırmakla kalmadı, GA'ların pratik kullanımının da olabilirliğini kanıtladı. Ayrıca kitabında GA'lara dayalı tam 83 uygulamaya yer vererek GA'nın dünyanın her yerinde çeşitli konularda kullanılmakta olduğunu gösterdi (27).

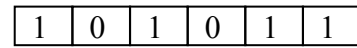
2.2.2. Genetik algoritmaların çalışma prensibi

GA'lar iteratif optimizasyon işlemi olup, her iterasyon da bir tek çözüm yerine popülasyon denilen bir grup çözüm ile çalışır (28). Genel anlamda GA'lar biyolojik sistemlere benzer olarak evrim sürecinin bilgisayara uygulanmış şeklidir. Biyolojik olarak bir kromozom, gen olarak tanımladığımız yapı taşlarının bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. GA da ise biyolojik sistemlerde olduğu gibi gen adı verilen ve probleme özgü bilgileri içeren belirli uzunluktaki dizilerin bir araya gelmesi ile kromozom elde edilir. Biyolojik ve GA'da kullanılan bir kromozom Şekil 2.1'de verilmiştir.



1.Ebeveyn

(a) Biyolojik kromozom

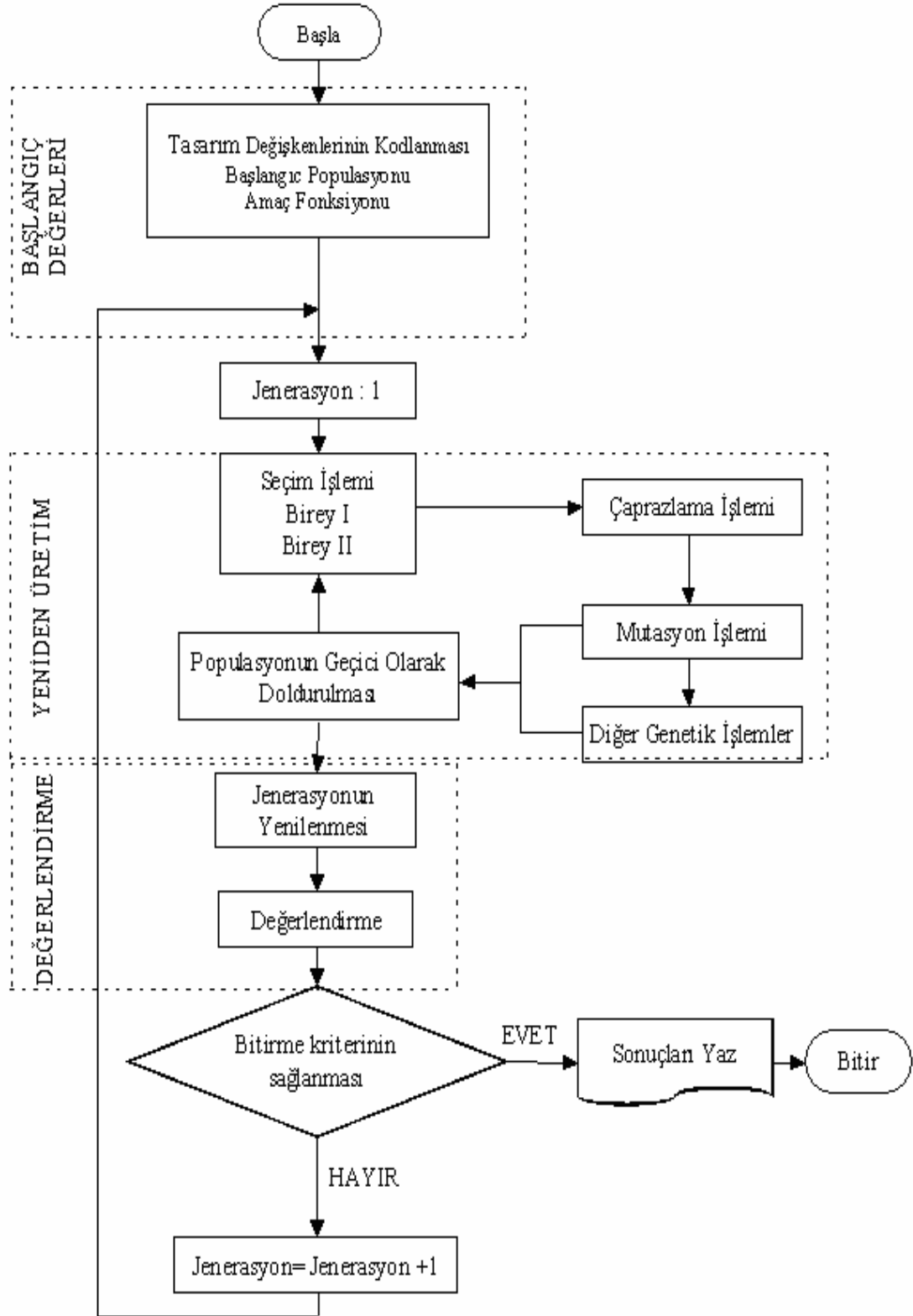


1.Ebeveyn

(b) GA'ya ait yapay kromozom

Şekil 2.1. Biyolojik ve GA'da kullanılan kromozom

Bir GA, mümkün çözümlerin kodlandığı dizilerin bir seti olan yığın (popülasyon) ile biyolojik özelliği taklit eden operatörlerin bir setinden oluşur. Herhangi bir problemin çözümünde kullanılan basit bir GA, Şekil 2.2'deki algoritma ile açıklanabilir (29).



Şekil 2.2. Genetik algoritma akış şeması.

GA'nın ilk aşamasında, tüm mümkün çözümlerin alt kümesinden oluşan bir başlangıç yığını elde edilir. Yığının her bireyi bir dizi olarak kodlanır. Her dizi biyolojik olarak bir kromozoma eşdeğerdir. GA'nın herhangi bir adımındaki yığın, nesil (jenerasyon) olarak adlandırılır. Yığındaki her dizi bir uygunluk değerine (fitness value) sahiptir. Uygunluk değeri, hangi bireyin bir sonraki yığına taşınacağını belirler. Bir dizinin uygunluk değeri aynı zaman da problemin amaç fonksiyonu değerine eşittir (30).

GA'lar bir problemin çözümünde şu aşamaları izleyerek işlem görürler:

- Arama uzayındaki tüm mümkün çözümler dizi olarak kodlanır.
- Genellikle rastgele bir çözüm kümesi seçilir ve başlangıç popülasyonu olarak kabul edilir.
- Her bir dizi için bir uygunluk değeri hesaplanır. Bulunan uygunluk değerleri dizilerin çözüm kalitesini gösterir.
- Bir grup dizi belirli bir olasılık değerine göre rastgele olarak seçilip çoğalma işlemi gerçekleştirilir.
- Yeni bireylerin uygunluk değerleri hesaplanarak, çaprazlama ve mutasyon işlemlerine tabi tutulur.
- Önceden belirlenen kuşak sayısına yukarıdaki işlemler devam ettirilir.
- İterasyon, belirlenen kuşak sayısına ulaşınca işlem sona erdirilir ve amaç fonksiyonuna göre en uygun olan dizi seçilir (31).

GA'nın başarısı, genlerde kodlanan bilginin özellikle çaprazlama ve mutasyon şeklinde bir araya gelmesine ve bunlardan en başarılı sonucu verenlerin seçilmesine dayanmaktadır. GA'ların toplumsal bakış açısından yapısı Şekil 2.3'de verilmiştir. Buradaki terimlerden topluluk, havuz ile; birey, kromozom ile; çiftleşme, çaprazlama ile; uygunluk değeri tasarım kalitesi ile; sosyal başarıda, tasarımın optimalitesi ile yer değiştirdiğinde ortaya GA'lar çıkmaktadır.

Şekil 2.3’de görüldüğü gibi ilk adım olarak başlangıç yığını (topluluk) birbirine benzemeyecek şekilde oluşturulur. Bu işlemle yığındaki çeşitliliğin yüksek olması amaçlanmaktadır. Oluşturulan yığının evrim sürecine geçirilmesinden önce yapılması gereken bir aşama daha vardır. Bu da yığındaki bireylerin (dizilerin) değerlendirilmesidir. Değerlendirme evrim süreci içerisinde bir sonraki nesile geçecek bireylerin belirlenmesi için gerekmektedir.

- | | |
|-----|--|
| 1. | Başlangıç anını belirle $t=0$; |
| 2. | Toplulukta yer alacak bireyleri oluştur. $P(t)$; |
| 3. | Bireylerin yaşam koşullarına uygunluğunu değerlendir.
Değerlendir $P(t)$; |
| 4. | İstenilen düzeye ulaşılan kadar While not başarılı-birey-bulundu do |
| 5. | Zaman sayacını artır. $t=t+1$; |
| 6. | Bir sonraki topluluğa döl verecek bireyleri seç ve geçici topluluğa kopyala
$P'(t) :=$ Ebeveynleri seç $P(t)$; |
| 7. | Seçilen bireyleri çiftleştir. Çiftleştir $P'(t)$; |
| 8. | Geçici toplulukta rasgele değişimler olmasını sağla
Değişime uğrat $P'(t)$; |
| 9. | Geçici topluluğun başarı durumunu değerlendir.
Değerlendir $P'(t)$; |
| 10. | Bir sonraki topluluğu oluştur. $P(t+1) = P'(t)$; |

Şekil 2.3. GA’ların toplumsal bakış açısından yapısı

Daha sonra istenilen düzeyde başarılı birey bulunana kadar veya topluluk başarıda artış sağlayamaz hale gelinceye veya başlangıçta belirlenen evrim sayısı tamamlanıncaya kadar sürececek olan evrim süreci başlayacaktır. Evrim sürecinin her aşamasında tekrar edilecek olan işlemler bu aşamadan sonra başlayacaktır.

Evrim sürecinde daha önceden uygunlukları hesaplanmış bireyler uygunluklarına göre seçilmektedir. Bir sonraki işlem olarak seçilen bireyler çiftleştirilmektedir. Çiftleştirme işleminden sonra oluşturulan bireyler genellikle % 0,1 olasılıkla değişime uğratılmaktadır. Son adım olarak da oluşturulan yeni bireylerin başarı değerleri hesaplanmaktadır.

2.2.3. Genetik algoritmanın temel teoremi (Şema Teoremi)

Populasyon içindeki dizilerin genel karakteristiği hakkında bilgi veren diziler şema olarak tanımlanmaktadır. Populasyon içindeki diziler, şemalar ile benzerlikleri açısından sınıflandırılmış olmaktadır. Şemalar, populasyon içinde genetik operatörlerin etkisini analiz etmek için kullanılır. Genel olarak H ile ifade edilen şema $\{0,1,*\}$ elemanlarından oluşmaktadır. * sembolü, 0 veya 1 değerini alabilen önemsiz bit anlamına gelmektedir. l uzunluklu bir dizi 2^l tane şemayı temsil etmektedir. Buna göre n boyutlu bir dizi populasyonun da $N \cdot 2^l$ adet şema bulunacaktır.

Şemalar şema derecesi, uzunluğu ve özellikleri ile tanımlanmaktadır. H şemasının derecesi, şemadaki kesin bit pozisyon sayısı (0 ve 1 bilgisinin sayısı) olup $o(H)$ ile ifade edilmektedir. H şemasının uzunluğu, ilk ve son kesin bit pozisyonlar arasındaki uzaklık olup $\delta(H)$ ile gösterilmektedir.

Örneğin, $H = (* 1 0 * * 0 * * *)$ şeklindeki bir H şeması için, son kesin bit pozisyonu 6, ilk kesin bit pozisyonu 2 olup aralarındaki uzaklık şema uzunluğudur. Buna göre şema uzunluğu $\delta(H) = 6 - 2 = 4$ şeklinde elde edilir. H şemasının derecesi ise 0 ve 1'lerin sayısı olup $o(H) = 3$ 'dür (32).

Dizilerin populasyonun da, diziler üzerindeki genetik operatörlerin etkisi şema teoremi ile açıklanmaktadır. Şema teoremine göre üreme, çaprazlama ve değişim işlemlerinin etkisi farklı olmaktadır.

2.2.4. Problem temsili, genler ve kromozomlar

Bir problemin çözümü için GA'nın ilk adımı, tüm çözümlerin aynı boyutlara sahip bitler dizisi biçiminde gösterilmesidir. Optimizasyon probleminde, değişkenlerin tasarımı amaç fonksiyonunun minimumu veya maksimumu olarak çözümlerin temsili ile gerçekleştirilir. GA'lar optimizasyon probleminin kodlanması için tasarım değişkenlerine ihtiyaç duyar (33).

Kromozomlar iki veya daha fazla genin bir araya gelerek oluşturduğu ve probleme ait çözüm için gerekli tüm bilgiyi üzerinde taşıyan genetik yapılardır. Kromozomları oluşturan her bir gen, tasarım problemine ait tasarım değişkenlerini ifade eder (34). GA'ların diğer metotlara göre en belirgin özelliklerinden bir tanesi de parametrenin kendisi yerine, parametreleri temsil eden dizilerin (kromozomlar) kullanılmasıdır.

GA'lar da ilk adım problemin arama uzayını en iyi temsil edecek kodlama yapısının seçimidir. En yaygın kullanılan kodlama, ikili düzendeki kodlamadır. Dizilerin uzunluğu, parametrelerin veya parametrenin alt ve üst sınırları arsındaki tüm noktaları temsil edecek şekilde belirlenmektedir. Her tasarım değişkeni alt ve üst sınır olarak

$$x(i)_{alt} \leq x(i) \leq x(i)_{üst} \quad [2.6]$$

belirli aralığında kodlanarak genler oluşturulur. Kodlanan genlerin birleştirilmesi ile de tasarım problemine ait kromozom elde edilir. GA'lar kodlama işleminde sürekli (continuous) ve tamsayı (integer) tasarım değişkenleri ile işlem görebilirler. Alt ve üst limiti bilinen bir tasarım değişkeninin ikilik sistemde kaç bit uzunluğunda olması gerektiği aşağıdaki eşitlik ile elde edilir (35).

$$2^l \geq \frac{x(i)_{üst} - x(i)_{alt}}{\varepsilon} + 1 \quad [2.7]$$

Burada l , tasarım değişkeninin ikilik sistemdeki uzunluğu; ε , tasarım değişkeninin kesirli kısmının derecesini ifade etmektedir ($\varepsilon = 0.01$). Tasarım değişkenleri $\{0,1\}$

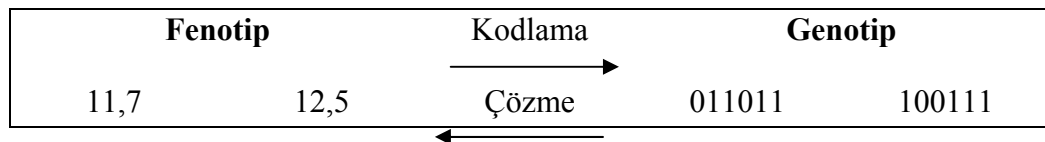
karakterlerinden oluşturulmaktadır. Bir tasarım değişkeni alt sınır, tüm bitleri {0000..00} ve üst sınır ise tüm bitleri {1111..11} değerlerinden oluşmaktadır. Tasarım değişkenlerinin gerçek değerleri $x(i)$, “Eş 2.8” ile ikilik sistemden gerçek değerlerine dönüştürülür (35).

$$x(i) = x(i)_{alt} + \frac{x(i)_{üst} - x(i)_{alt}}{2^l - 1} d(i) \quad [2.8]$$

Burada; $d(i)$, ikilik sistemde alt ve üst limitler arasında kodlanan değişkenin onluk tabana dönüştürüldüğünde elde edilen değeri.

İkilik düzendeki kodlama çok kullanılmasına rağmen, çok değişkenli bir fonksiyon optimizasyonunda alt ve üst sınırlara bağlı olarak, dizi uzunluğu çok uzun olabilmektedir. Bu nedenle literatürde, gerçel sayı kodlama ve permütasyon kodlama türleri de kullanılmaktadır (36).

Genellikle GA problemlerinde çözüm aşamasında, genotip ve fenotip olarak adlandırılan terimler vardır. Kromozomları oluşturan genler genellikle ikilik sayı sisteminde ifade edilirler. Genotipler, ikilik sayı sisteminde ifade edilen kromozom yapısını temsil etmektedir. Fenotipler ise ikilik sistemdeki kromozomların onluk tabana dönüştürülmüş şeklini temsil etmektedir. Fenotip orijinal değişken değerleri kullanan bir ifadedir (37). Örneğin; $x = [11.7, 12.5]$ şeklinde verilen iki değişkenli bir problemin tasarım değişkenlerinin GA'nın kullanabileceği yapı olan genotipi Şekil 2.4'de verilmiştir.





Şekil 2.4. Değişkenlerin kodlanması; genotip, fenotip, gen ve kromozom

2.2.5. Başlangıç yığınının oluşturulması

GA'ların diğer yöntemlerden farklı olan bir özelliği de arama işleminin noktadan noktaya değil de, noktaların oluşturduğu bir başlangıç yığını içersinden aramayı gerçekleştirmesidir (27). Bu nedenle GA'larda ilk adım olarak çözümlerin kodlandığı bir çözüm grubu (başlangıç yığını) oluşturulur. Çözüm grubu populasyon, çözümlerin kodları da kromozom olarak adlandırılır. Başlangıç yığını, rastgele olarak veya problemlere özgü geliştirilmiş sezgisel metotlardan yararlanılarak oluşturulur.

2.2.6. Değerlendirme fonksiyonu

Değerlendirme fonksiyonu, GA'ların her iterasyonun da, yığındaki dizilerin uygunluk değerlerinin hesaplanması işlevini gerçekleştirir. Uygunluk değeri, mevcut yığından hangi bireylerin bir sonraki yığının oluşturulmasında kullanılacağıının belirlenmesinde kullanılır. GA'lar da değerlendirme fonksiyonu, problemin amaç fonksiyonudur. Çözümü aranan her problem için bir uygunluk değeri mevcuttur. Belirli bir kromozom için uygunluk değeri, kromozomun temsil ettiği çözümün kullanımıyla veya yeteneğiyle orantılı olan sayısal bir uygunluk değeri verir. Bu bilgi her kuşakta daha uygun çözümlerin seçiminde yol göstermektedir. Bir çözümün uygunluk değeri ne kadar yüksek ise, yaşama ve bir sonraki yığında temsil edilme oranı da o kadar yüksektir.

2.2.7. Yeniden üretim operatörü ve seçim mekanizmaları

Yeniden üretim operatöründe diziler, amaç fonksiyonuna göre kopyalanır ve iyi kalıtsal özellikleri yeni kuşağa daha iyi aktaracak bireyler seçilir. Üretim operatörü yapay bir seçim işlemidir. Dizilerin uygunluk değerine göre kopyalanması, yüksek uygunluklu dizilerin, bir sonraki kuşaktaki bir veya daha fazla bireye katkıda bulunması anlamına gelmektedir. Çoğalma, bireyleri seçme işleminden, seçilmiş bireyleri bir eşleme havuzuna kopyalama işleminden ve havuzda bireyleri çiftler halinde gruplara ayırma işleminden oluşur (38).

GA'da amaç fonksiyonu bir dizinin yaşaması veya elenmesinde son karar verici olarak kullanılır. Bu doğal seçim işleminin yapay olarak gerçekleşmesini göstermektedir. Başlangıç yığınının sonra, algoritmanın her iterasyonun da, yeni yığının dizileri bir olasılıklı seçim süreci ile mevcut yığının dizileri arasından seçilir. Burada yüksek uygunluk değerine sahip diziler yeni dizilerin elde edilmesinde büyük olasılığa sahiptir.

Yeniden üretim operatöründe kullanılan çeşitli seçim mekanizmaları vardır. En basit seçim mekanizması olan rulet çemberi (roulette wheel) metodudur. Bu metotta çember N eşit aralığa (yığındaki dizi) bölünür. Çemberdeki i . aralık yığındaki i . diziyi temsil etmektedir ve bu aralığın genişliği, bu dizinin seçilme olasılığına eşittir. Bu durumda çemberdeki aralık genişliklerinin toplamı 1'dir. Seçim işleminde çember N defa çevrilir ve her çevrimde 0-1 aralığında bir sayı üretilir. Üretilen sayının düştüğü aralıktaki dizi, yeni yığına kopyalanır (27).

Literatürde bulunan ve çok sık kullanılan seçim mekanizmaları, orantılı yeniden üretim (proportionate reproduction), sıralı (ranking), turnuva (tournament), denge durumu (steady state) olmak üzere 4 temel sınıfta toplanmıştır (30, 38).

- Orantılı seçim mekanizmaları: Bu seçim mekanizmalar, rulet çemberi, stokastik artan ve stokastik üniversal seçim mekanizmaları olarak adlandırılan, mevcut yığından dizilerin uygunluk değerlerine göre seçildiği metotlardır.

Stokastik Artan Seçim Mekanizması; Bu seçim mekanizmasında önce yığındaki dizilerin beklenen kopya sayısı hesaplanır. Sonra her dizinin beklenen kopya sayısının tamsayı kısmı kadar kopyası yeni yığına kopyalanır. Yığın genişliğine ulaşılmadı ise, yığın doldurmak için beklenen kopyaların kesirli kısımları da olasılıklı olarak kullanılır. Kesirli kısımların kullanılmasında iki yaklaşım vardır. Birinci yaklaşımda beklenen kopya sayısı 1.5 olan bir dizinin bir tane kopyası yeni yığına alınırken ikinci kopyasının yeni yığında olma olasılığı ise %50 dir. İkinci yaklaşımda ise kesirli kısımlar kullanılarak rulet çemberi aralıkları oluşturulur ve seçim yapılır.

Stokastik Ünsersal Seçim Mekanizması; Rulet çemberi mekanizmasına benzeyen bu mekanizmada en belirgin fark rulet çemberinin dış kısmının da yığın genişliğinin sayısı kadar eşit parçaya bölünmüş olmasıdır. Seçim aşamasında çember bir defa döndürülür ve dizinin kopya sayısı çemberin dış kısmındaki parça sayısı ile belirlenir.

- Sıralı Seçim Mekanizması : Baker tarafından önerilmiş olan bu mekanizmada önce yığındaki diziler uygunluk değerlerine göre en iyiden en kötüye doğru sıraya dizilir. En iyi diziden başlamak üzere azalan bir fonksiyon yardımıyla dizilere bir kopya sayısı atanır ve bundan sonra orantılı seçim mekanizmalarından biri kullanılarak kopyalar elde edilir ve yeni yığın oluşturulur. Sıralı seçim mekanizmasının iki avantajı vardır. Birinci olarak ölçeklendirme fonksiyonlarının bu mekanizmalarda kullanımına gerek olmamasıdır. İkincisi ise minimizasyon problemlerinde uygunluk değerlerinin amaç fonksiyonu değerlerine eşit olarak alınmasıdır.
- Turnuva Seçim Mekanizması : Bu mekanizmada yığından rastgele olarak bir grup dizi seçilir ve bu grup içersinden en iyi uygunluk değerine sahip dizi yeni

yığına kopyalanır. Bu grup içindeki en iyi uygunluk değerine sahip dizi yeni yığına kopyalanır. Yığın genişliğine ulaşıldığında bu işlem sona erdirilir.

- Denge Durumu Seçim Mekanizması : Bu seçim mekanizmasında, önce doğrusal sıralı seçim mekanizmasında olduğu gibi seçilen bir veya iki diziyeye genetik operatörler uygulanır. Bu işlem sonucunda elde edilen yeni diziler yığın içerisinde bulunan ve uygunluk değerleri düşük olan diziler ile yer değiştirilerek yeni yığın oluşturulur.

2.2.8. Genetik algoritma operatörleri

GA'lar da kullanılan en genel iki operatör vardır. Bunlar çaprazlama ve mutasyon operatörleridir. Bu operatörlerde yukarıda anlatılan, yeniden üretim ve değerlendirme fonksiyonlarından sonra yeni gen havuzlarının (yığın, popülasyon) oluşturulması esnasında kullanılan operatörlerdir.

Çaprazlama operatörü : Çaprazlama (gen takası), GA'ların arama uzayının benzer fakat araştırılmamış bölgelerine ulaşmayı sağlayan bir arama operatörüdür. Gen takası GA'nın motoru kabul edilir. Basitçe olay iki ebeveyn kromozomun arasında belirlenen parçaların takasıdır. Çaprazlamada, belirlenen iki kromozom (dizi), rastgele olarak seçilen çaprazlama noktasından parçalara ayrılır ve karşılıklı olarak bu parçalar yer değiştirilerek gerçekleştirilir (39). GA'lar bu olayın benzeşimini temelde;

-Tek noktalı (Single point crossover , tek noktalı),

-Çok noktalı (Multi point crossover, iki veya daha yukarı) ,

gen takası adı verilen iki yolla yapar. Çok noktalı çaprazlama işleminin GA'nın performansını artırdığı literatürde yapılan çalışmalarda belirtilmektedir (40). GA'lar da ikilik dizi (binary string) çok kullanılır. Doğadaki genlerin benzeşimi 'bit'lerdir.

Gen takası toplumda çeşitliliği sağlar. İyi özelliklerin bir araya gelmesini kolaylaştırarak en iyiye yaklaşmayı sağlar.

İkilik dizilerde bir gen takası Şekil 2.5'deki gibi gerçekleşir. Çaprazlama işleminin uygulanacağı dizinin, l uzunluğunda olduğu kabul edilirse, çaprazlama pozisyonu dizi boyunca $1 \leq k \leq (l-1)$ aralığında herhangi bir değer seçilir ve bu seçim pozisyonu k ile ifade edilirse, oluşturulacak ikili yeni dizi ise, $(k+1)$ ile l arasında bütün bit'lerin karşılıklı değişimi ile oluşturulur.

Bireyler	Önce						Sonra					
Fert A	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1
Fert B	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0

Şekil 2.5. Gen takası (Crossover)

Literatürlerde geçen ve düzenli (uniform) çaprazlama operatörünü denilen bir çaprazlama operatörü de vardır. Bu operatörde dizi uzunluğuna eşit ve önceden belirlenen bir olasılık değerine göre geçici bir dizi üretilir ve bu dizinin elemanlarının 0 veya 1 olmalarına bağlı olarak yeni diziler oluşturulur. Geçici dizinin elemanı 1 ise 1. yeni dizide seçilmiş olan 1.dizinin elemanının ve 2. yeni dizide ise seçilmiş olan 2. dizinin elemanının kullanılacağını gösterir. Geçici dizinin eleman 0 ise 1. yeni dizide seçilen 2. dizinin elemanının ve 2. yeni dizide ise seçilen 1. dizinin elemanının kullanılacağını gösterir (41).

Mutasyon Operatörü : Mutasyon (değişim) operatörü GA'da ikinci derecede önemli rol oynar. Mutasyon, GA'da küçük bir olasılıkla dizi içindeki bir veya birkaç noktada rastgele olarak değişim yapar ve yığılma yeni dizilerin oluşmasını sağlar. Bu işlem oluşturulmuş dizilerin elverişli durumlarını birden bozabileceği için, olasılık değeri küçük verilir. Genel olarak kullanılan mutasyon operatörlerinin bazıları aşağıda verilmiştir:

- Düzenli (Uniform) mutasyon : Düzenli mutasyon işleminde her kromozomun, rastgele olarak dizi boyutu aralığında seçilen değeri değiştirilerek gerçekleştirilir (39).
- Düzenli olmayan (Non-uniform) mutasyon : Non uniform mutasyon işlemi, optimizasyon işleminin aşamalarını dikkate alır. Optimizasyon işleminin başlangıcında sadece uniform mutasyon işlemi rol oynar. Sonrasında optimizasyon sürecindeki dizilerin oluşturulması için, değişikliklerin bir çoğu çok daha tutucu olarak değişir. Bu amaçla diziler alt ve üst sınır aralığında iterasyona tabi tutulur ve maksimum iterasyona ulaşılmca [0,1] değerleri rastgele olarak seçilirken 0 ile 1 aralığında bir sayı ile ölçeklendirme işlemi yapılarak mutasyon işleminin ne kadar yoğunlukta yapılması gerektiğine karar verilir.

Genel anlamda bir mutasyon Şekil 2.6'da görüldüğü gibi gerçekleşmektedir.

Bireyler	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fert A	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0
Fert A'	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1

Şekil 2.6. Mutasyon şartına bir örnek

Mutasyon işleminin önemi GA'ların son iterasyonlarında oldukça artmaktadır. Bu aşamada yığın iyi çözümlere yaklaştığından ve dizilerin birbirine benzemesinden dolayı çaprazlama işleminin kullanımı kısıtlanmış olur. Burada mutasyon yığındaki değişiklikleri gerçekleştirir ve yeni çözümler bulunmasını sağlar.

2.2.9. Genetik algoritmalarındaki kontrol parametreleri

GA'larda yığın genişliği, çaprazlama oranı, mutasyon oranı, nesil ayrılığı (generation gap), seçim stratejileri ve ölçeklendirme fonksiyonu olarak adlandırılan parametreler vardır. Bu parametreler kontrol parametreleri olarak adlandırılır. GA'ların performansını bu parametreler etkilediğinden, öncelikle bu parametrelerin çok iyi bir şekilde belirlenmesi gerekir. Optimal kontrol parametrelerini bulmak için bir çok çalışma yapılmıştır fakat tüm problemler için genel olarak kullanılabilir parametreler bulunamamıştır (42). Bu parametreler aşağıda açıklanmıştır (28, 43)

Yığın Genişliği (N): GA'ların araştırma ve optimizasyon problemlerine uygulanmasında kullanıcının yapması gereken ilk iş yığın (populasyon) genişliğinin belirlenmesidir. Yığın genişliği küçük ise performans düşük olur. Çünkü küçük yığınlar arama uzayını örneklemede yetersiz kalır ve zamansız yakınsama olur. Yığın genişliği büyük olduğunda ise arama uzayı örneklemede geniş olur ve arama etkinliği artırılmış olur ancak çözüme ulaşma zamanı artar. Literatürde yığın genişliği ile ilgili yapılmış çalışmalar vardır. Dizi uzunluğuna bağlı olarak yığın genişliğini bulmak için önerilen eşitlik $N = 1,65 \cdot 2^{0,21 \cdot l}$ ile elde edilir.

Yine yapılan test fonksiyonları çalışmalarından 20 ile 30 arasındaki küçük yığın genişliğinin iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir (44,45).

Çaprazlama Oranı (P_c): Çaprazlamanın amacı mevcut iyi kromozomların özelliklerini birleştirerek daha uygun kromozomları oluşturmaktır. Çaprazlama oranı, çaprazlama operatörünün kullanım sıklığını kontrol eder. GA'da her yeni yığında $P_c \cdot N$ adet diziye çaprazlama işlemi uygulanır. Büyük çaprazlama oranı yığın değişikliğini hızlandırırken düşük oran aramanın yavaşlamasına neden olur. Çaprazlama oranının 0,75 ile 0,95 arasında alınmasının GA'nın performansını iyi yönde etkilediği görülmüştür (44).

Mutasyon Oranı (P_m): Mutasyonun amacı yığındaki genetik çeşitliliği korumaktır. Yeni yığınlardaki her dizinin her elemanı mutasyon oranına eşit bir olasılıkla rastgele

olarak değişime uğrattılır. Her iterasyonda $P_m N l$ adet mutasyon gerçekleşir. Arama işleminin rastgele bir aramaya neden olmaması için mutasyon oranı düşük tercih edilir. Mutasyon oranının GA'nın performansına etkisinin araştırılması için yapılan çalışmada 0,02 ile 0,06 aralığındaki oranın GA'nın performansına olumlu etki yaptığı belirtilmiştir. GA'nın performansının, çaprazlama oranına göre mutasyon oranına daha duyarlı olduğu yine bu çalışmada görülmüştür (28).

Nesil Ayrılığı (G) : Nesil ayrılığı her iterasyonda yığında meydana gelen değişimin yüzdesini kontrol eder. Buna göre i . iterasyondaki yığının $N (1 - G)$ adet dizisi, $(i+1)$. iterasyonda da kullanılacaktır. G 'nin 1 alınması tüm yığının her iterasyonda değişeceğini belirtirken, G 'nin 0,5 alınması yığındaki dizilerin yarısının bir sonraki iterasyonda kullanılacağını gösterir.

Seçim Stratejileri: GA'lar da kullanılan seçim stratejileri, rulet çemberi, orantılı seçim, sıralı seçim, turnuva seçim ve denge durumu seçim mekanizmaları literatürde en çok kullanılan ve uygunlukları anlatılan mekanizmalardır.

Ölçeklendirme Faktörü : GA' da işlem süresince yığındaki değişikliklerin korunması önemlidir. Özellikle zamansız yakınsamayı önlemek için yığındaki uygunluk değerlerinin bir metot yardımıyla ölçeklendirilmesi gerekir. Doğrusal ölçeklendirme, standart sapma kadar azaltma ve üs yaklaşımı metotları literatürde en fazla kullanılmaktadır.

2.2.10. Genetik algoritmalar ve uygulama alanları

Karmaşık problemleri hızlı ve optimale yakın olarak çözebilen GA'lar, çeşitli problem tiplerine uygulanabilmektedir. Büyük çözüm uzaylarının geleneksel yöntemlerle taranması hesaplama zamanını artırmaktadır. Ancak bu tip problemlere, GA'lar ile kısa sürede kabul edilebilir çözümler bulunabilmektedir. GA'lar özellikle çözüm uzayının geniş, süreksiz ve karmaşık olduğu problem tiplerinde başarılı sonuçlar vermektedir.

GA'ların uygulama alanları genel uygulama alanları ve işletmelerdeki uygulama alanları olmak üzere iki sınıfa ayrılarak incelenebilir.

2.2.11. Genel uygulama alanları

GA'ların genel uygulama alanları şu başlıklar altında sıralanır:

- Optimizasyon,
- Otomatik programlama ve bilgi sistemleri,
- Mekanik öğrenme,
- Ekonomik ve sosyal sistem modelleri.

Burada optimizasyon uygulama alanı incelenmiştir.

Optimizasyon : Bir arama yöntemi olan GA'lar farklı bilim dallarındaki optimizasyon problemlerini çözmeye kullanılmaktadır. GA'lar fonksiyon optimizasyonu ve birleşik optimizasyon (combinatorial) uygulama alanlarında kullanılmaktadır. GA araştırmalarının önemli bir bölümü fonksiyon optimizasyonu ile ilgilidir. GA'lar geleneksel optimizasyon tekniklerine göre zor, süresiz ve gürültü içeren fonksiyonları çözmeye daha etkindirler (46). Optimize edilecek amaç fonksiyonunun süresiz olması halinde, süresizlik noktalarında fonksiyonun türevi alınmayacağından, türev almaya dayalı optimizasyon yöntemleri kullanılamamaktadır. GA'lar ise bu tip problemlerin çözümünde geleneksel yöntemlere göre üstünlük sağlamaktadır.

GA'ların diğer bir optimizasyon uygulama alanı olan birleşik optimizasyon problemleri ise, istenen amaçlara ulaşmak için sınırlı kaynakların etkin kullanımı ile ilgilidir. Birleşik optimizasyon, iyi tanımlanmış bir problem uzayında bir veya daha fazla optimal çözüm bulma sürecidir. Gezgin satıcı problemi, araç rotalama problemi, Çinli postacı problemi, iş atölyesi çizelgeleme problemi ve sırt çantası problemi birleşik optimizasyon problemlerine örnektir (47). Birleşik optimizasyon

problemlerinde, incelenen değişken sayısı artıkça çözüme ulaşma zamanı üstsel olarak artmaktadır.

2.2.12. İşletmelerdeki uygulama alanları

GA'lar temelde üretim/işlemler olmak üzere finans ve pazarlama gibi işletmelerin fonksiyonel alanlarındaki bir çok farklı iş probleminin çözümü için kullanılmaktadır. GA'lar özellikle, kaynak tahsisi, iş atölyesi çizelgelemesi, makine parçalarının gruplanması ve bilgisayar ağ tasarımı gibi çeşitli alanlarda uygulamaları mevcuttur. İşletmelerdeki en yaygın kullanım alanları aşağıda verilmiştir.

- Finans,
- Pazarlama,
- Üretim/işlemler,
- Montaj hattı dengeleme problemi,
- Çizelgeleme problemi,
- Tesis yerleşim problemi,
- Atama problemi,
- Hücresel üretim problemi,
- Sistem güvenilirliği problemi,
- Taşıma problemi,
- Gezgin satıcı problemi,
- Araç rotalama problemi.

2.2.13. Genetik algoritmalar ve kısıtlı optimizasyon problemleri

GA'ların kısıtlı optimizasyon problemlerine uygulanmasındaki en büyük zorluk, klasik genetik operatörler ile uygun olmayan (kısıtlar sağlamayan) çözümlerin elde

edilmesidir. Bu tür problemlerde uygun çözümlerin bulunduğu başlangıç yığını elde edilse bile, çaprazlama ve mutasyon operatörleri sonucu uygun yeni çözümlerin elde edilmesi çok kolay değildir. Bu sorunun ortadan kaldırılması için çeşitli yaklaşımlar vardır. Bunlar; ceza fonksiyonu, düzenleyici algoritma ve yeni genetik operatörlerdir (30).

3. DİŞLİ ÇARKLARIN TASARIMI

3.1. Dişli Çarklar

Dişli çark mekanizmaları, güç ve hareket iletim elemanı olarak kullanılır. Güç şekil bağına dayalı olarak iletilir. Dişli çark mekanizmaları, bir milden diğer bir mile hareket ve güç iletiminde, devir sayısını küçültüp/büyütmek ve momenti değiştirerek iletmek için kullanılır.

Bir dişli çark mekanizması, biri döndüren diğeri döndürülen çark olmak üzere en az iki çarktan oluşmaktadır. Bu iki dişliden küçük olanına Pinyon, büyük olanına Çark adı verilir (48).

Eksenleri aynı düzlemde paralel olan iki mil arasında güç ve devir ileten çarklara silindirik veya alın dişli çarklar denir. Dişlerin yönü çark eksenine göre paralel ise düz silindirik çarklar olarak adlandırılır.

Silindirik düz dişli çarklar için ifade edilen temel kavramlar genel bir anlam taşımaktadır. Bu nedenle diğer dişli çarklar için de geçerlidir ve elde edilen denklemler az bir değişiklikle diğer dişli çarklara da uygulanabilir (49).

Dişli çarklardan birisinin yarıçapı sonsuz ise bu tip dişliler düz kremayer olarak adlandırılır. Dişlerin yönü çark eksenine ile belli bir açıda ise helisel, birbirine dik düzlemlerde hareket ileten dişli çarklara da konik dişli çarklar denilmektedir

3.1.1. Dişli çarkların ana boyutları

Üzerinde dişlerin bölümünün yapıldığı ve esas dişli çarkın büyüklüğünü belirleyen daire bölüm dairesidir. Bu daire üzerinde ölçülen ve bir diş kalınlığı ile bir diş arası boşluğu kapsayan uzunluğa diş adımı (t) veya hatve denir. Silindirik düz dişli çarklarda, Z ile dişli çarkın diş sayısı gösterilirse, bölüm dairesinin çapı;

$$\pi d = Z t \quad [3.1]$$

şeklinde yazılır. Burada, bölüm dairesi değerinin çapı,

$$d = \frac{t}{\pi} Z \quad [3.2]$$

dır. Modül,

$$m = \frac{t}{\pi} \quad [3.3]$$

olup bu değer “Eş. 3.1” de yerine yazılırsa, bölüm dairesi;

$$d = m Z \quad [3.4]$$

olur (50).

Dişli çarklarda kullanılan modül değerleri standartlaştırılmıştır (51,52). Dişli çarkların boyutlandırılmasında aşağıda verilen ifadeler geçerlidir.

d_a : Diş üstü çapı ($d_a = d + 2m$) (mm)

d_f : Diş dibi çapı ($d_f = d + 2,5m$) (mm)

d : Bölüm dairesi çapı ($d = m Z$) (mm)

h_a : Diş başı yüksekliği ($h_a = m$) (mm)

h_f : Taban yüksekliği ($h_f = 1,25m$) (mm)

h : Diş yüksekliği ($h = 2,25m = (h_a + h_f)$) (mm)

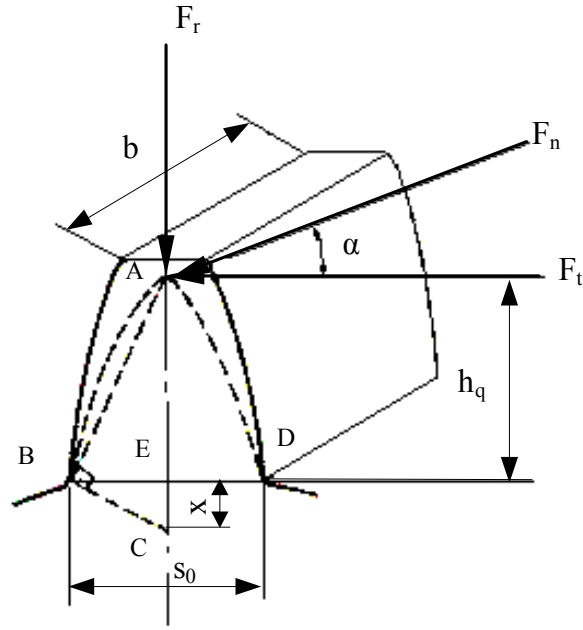
t : Adım $t = \pi m$ (mm)

S : Diş kalınlığı $\left(S = \frac{t}{2} = \frac{\pi m}{2} \right)$ (mm)

- e : Dişler arasındaki boşluk $\left(S = l_0 = \frac{t}{2} \right)$ (mm)
- b : Diş genişliği (mm)
- α : Kavrama açısı

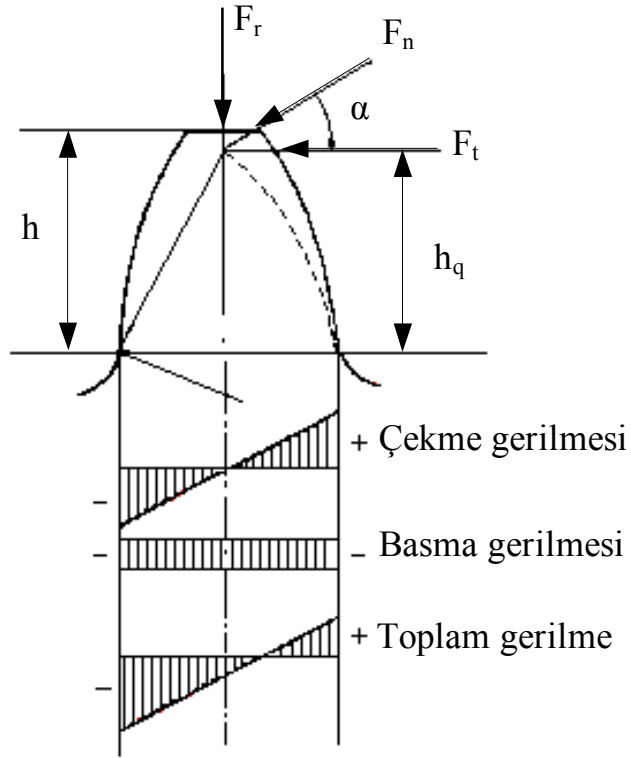
3.1.2. Düz dişli çarklar için diş dibi gerilmeleri hesabı

Şekil 3.1'de görülen dişli çarkta kuvvet, dişin üstünden etki etmektedir. A noktasına etki eden F_n normal kuvveti sırasıyla teğetsel ve radyal bileşenleri olan F_t ve F_r kuvvetlerine ayrılır.



Şekil 3.1. Diş üzerine etkiyen kuvvetler (53)

Dişlide en büyük zorlanma F_n kuvvetinin diş tepesine temas ettiği anda meydana gelir. Dişlide meydana gelen gerilmeler Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Dişte çalışma esnasında oluşan gerilmeler (54,55)

Diş dibinde, kesme (kayma), eğilme ve basma gerilmeleri meydana gelir. Kesme gerilmesi yüzeyde sıfır olduğundan hesaba katılmaz. Şekil 3.2’de görüldüğü gibi basma gerilmesi, eğilmeden dolayı meydana gelen çekmeye çalışan normal gerilmeyi azaltmaktadır. Bundan dolayı basma gerilmesi hesaba katılmayabilir. Lewis sadece eğilme gerilmesi zorluyor kabul edip bağıntı kurmuştur.

DIN normunda ise her iki gerilme de dikkate alınarak bağıntı kurulmuştur. Buna göre diş etki eden F_n kuvveti ile oluşan F_t teğetsel kuvveti sonucunda dişte meydana gelen eğilme gerilmesi (56):

$$\sigma_e = \left(K_d K_f \frac{F_t}{m \epsilon b} \right) \quad [3.5]$$

ile hesaplanır.

“Eş. 3.5” de;

σ_e : Dişte oluşan eğilme gerilmesi (N/mm²),

F_t : Teğetsel kuvvet (N),

ε : Kavrama oranı,

K_d : Dinamik (hız) faktörü,

K_f : Form faktörü,

şeklindedir.

F_t teğetsel kuvveti ve diş genişliği ise;

$$F_t = \frac{2 K_o M_b}{m Z} \quad [3.6]$$

$$b = \varphi_m m \quad [3.7]$$

şeklinde elde edilir.

Burada;

M_b : Döndürme momenti (Nmm),

K_o : Çalışma (işletme) faktörü,

φ_m : Genişlik katsayısı'nı

ifade etmektedir.

“Eş. 3.6” ve “Eş. 3.7” “Eş. 3.5” de yerlerine yazılıp düzenleme yapılır ise diş dibindeki kırılmaya göre oluşan eğilme gerilmesi:

$$\sigma_e = \left(\frac{2 M_b K_o K_d K_f}{\psi_m Z m^3} \right) \quad [3.8]$$

şeklinde elde edilir.

Dişli çarkın diş dibindeki kırılma açısından taşıyabileceği emniyetli gerilme ise;

$$\sigma_{em} = \frac{\sigma_D}{K_\psi} \quad [3.9]$$

$$\sigma_D \cong 0,55 \sigma_K \quad [3.10]$$

eşitlikleri ile elde edilir. Burada;

σ_{em} : Dişin (malzemenin) emniyetle taşıyabileceği eğilme gerilmesi (N/mm^2),

σ_D : Dişli malzemesinin tam değişken mukavemet değeri (N/mm^2),

K_ψ : Çentik faktörü,

σ_K : Malzemenin kopma mukavemeti'ni (N/mm^2),

ifade etmektedir.

Düz dişli çarklarda bir dişin diş dibindeki kırılma açısından emniyetli olarak kuvvet taşıyabilmesi için;

$$\left(\frac{2 M_b K_o K_d K_f}{\psi_m Z m^3} \right) \leq \left(\frac{\sigma_D}{K_\psi} \right) \quad [3.11]$$

eşitliğini sağlamalıdır.

3.1.3 Düz dişli çarklar için yüzey basıncı hesabı

Eş çalışan dişli çarklar temas noktalarında Hertz tipinde yüzey basınçlarından dolayı yorulma aşınmasına uğrarlar. Buna göre eş çalışan düz dişli çarkların aşınma (Hertz basıncı) açısından emniyetli olarak kuvvet taşıyabilmesi için;

$$p_{\max} \leq p_{em} \quad [3.12]$$

eşitliğini sağlaması gerekmektedir. Burada;

p_{\max} : Dişe etki eden kuvvet sonucunda dişte meydana gelen maksimum yüzey basıncı

p_{em} : Dişli malzemesinin taşıyabileceği emniyetli yüzey basıncı'nı

ifade etmektedir.

“Eş. 3.12”ye göre dişte meydana gelen maksimum yüzey basıncı;

$$p_{\max} = \left(K_m K_\alpha K_\varepsilon \sqrt{\frac{K_d F_t i+1}{m Z i}} \right) \quad [3.13]$$

şeklinde ifade edilir.

“Eş. 3.13”de

i : iletim oranı,

K_m : Malzeme faktörü,

K_α : Yuvarlanma noktası katsayısı,

K_ε : Diş uzunluk (kavrama) katsayısı'nı,

ifade etmektedir.

“Eş. 3.12”ye göre dişli malzemesinin taşıyabileceği emniyetli yüzey basıncı ise;

$$p_{em} \cong 0,25 H_B \quad [3.14]$$

ile hesaplanır. Burada;

H_B : Dişli yüzeyinin Brinell sertliğini (N/mm^2)

ifade etmektedir.

3.2. Helisel Dişli Çarklar

Helis dişli çarklarda, dişlerin teması kademeli olarak başlar ve biter. Bu özelliğinden dolayı helis dişliler, düz dişlilere göre daha sessiz çalışırlar ve taşıt araçlarında helis dişli çarklar tercih edilirler. Dişlerin helisliğinden dolayı devamlı iki adet diş yük taşır.

3.2.1. Helisel dişli çarklar için diş dibi gerilmeleri hesabı

Helisel dişli çarklarda dişler, adımı t olan bir helisin parçasıdır ve β açısına eğim açısı denir. Buna bağlı olarak alın kesitteki adım t_a , normal kesitteki adım t_n ile gösterilir. Helisel dişlilerde modüller, alın modülü m_a ve normal modül (standart modül) m_n olarak adlandırılır.

Alın kesitinde ve normal kesitteki adımları yazarsak;

$$t_a = \pi m_a \quad [3.15]$$

$$t_n = \pi m_n \quad [3.16]$$

eşitlikleri elde edilir. Alın kesitteki modül ise helisel dişli çarkın eğim açısı (β) ve normal kesitteki modül (m_n) türünden,

$$m_a = \frac{m_n}{\cos\beta} \quad [3.17]$$

şeklinde ifade edilir.

Dişli çarkın yuvarlanma (bölüm) dairesi çapı ise alın modülü ve normal modül cinsinden,

$$d = m_a Z = \frac{m_n Z}{\cos\beta} \quad [3.18]$$

şeklinde elde edilir.

Helis dişli çarklar normal kesitten kesildiğinde elde edilen elipsin yarı çapı, eşdeğer düz dişlinin çapı olur ve buradan elde edilen diş sayısına da eşdeğer diş sayısı denir.

Buna göre helisel dişlilerde oluşan eşdeğer diş sayısı,

$$Z_e = \frac{Z}{\cos^3 \beta} \quad [3.19]$$

eşitliği ile elde edilir. Burada ;

Z_e : Eşdeğer diş sayısı,

Z : Dişlinin en az diş sayısı,

$\cos^3 \beta$: Diş eğim açısı'nı,

ifade etmektedir.

“Eş. 3.19”da düz dişli çark için en az diş sayısı, eşdeğer diş sayısı yerine ($Z_e = 16$) konular ise helis dişli çarkın en az diş sayısı (Z),

$$Z = 16 \cos^3 \beta \quad [3.20]$$

şeklinde yazılır.

“Eş. 3.20”de helis dişli çarkın en az diş sayısı, helis dişli eğim açısı β 'ya bağlı olarak değişmektedir. β Eğim açısına bağlı olarak en az diş sayısı azalmakta ve dişli çark boyutları da küçülmektedir. Ancak β eğim açısı artarken eksenel kuvvetler arttığı için, $\beta = 18 - 20^\circ$ arasında alınması tavsiye edilmektedir.

Helis dişlilerde dişe etki eden F_n kuvveti sonucunda dişte meydana gelen eğilme gerilmesi;

$$\sigma_e = K_d K_{fe} \frac{F_t}{\epsilon b m_n} \quad [3.21]$$

ile temsil edilir. Burada, K_{fe} eşdeğer diş sayısına göre seçilen form faktörünü ifade etmektedir.

F_t teğetsel kuvveti ise;

$$F_t = \frac{2 K_o M_b \cos \beta}{m_n Z} \quad [3.22]$$

Helis dişlilerde diş dibindeki kırılma açısından taşıyabileceği emniyetli gerilme,

$$\sigma_{em} = \frac{\sigma_D}{K_\zeta} \quad [3.23]$$

$$\sigma_D \cong 0,55 \sigma_K \quad [3.24]$$

eşitlikleri ile elde edilir. Helis dişlilerde bir dişin diş dibindeki kırılma açısından emniyetli olarak kuvvet taşıyabilmesi için,

$$K_d K_{fe} \frac{F_t}{\varepsilon b m_n} \leq \frac{\sigma_D}{K_\sigma} \quad [3.25]$$

eşitliğini sağlamalıdır.

3.2.2. Helisel dişli çarklar için yüzey basıncı hesabı

Helis dişlilerde diş yüzeylerinde oluşan maksimum yüzey basıncı ve emniyetli yüzey basıncı,

$$p_{\max} = K_m K_\alpha K_\varepsilon K_\beta \sqrt{\frac{K_d F_t i + 1}{b d i}} \leq p_{em} \quad [3.26]$$

$$p_{em} = 0,25 H_B \quad [3.27]$$

eşitlikleri ile elde edilir. Burada;

K_β : Diş eğim faktörü'nü ifade etmektedir.

3.3. Konik Dişli Çarklar

Eksenleri kesişen miller arasında güç ve hareket iletimini sabit bir iletim oranı ile ileten mekanizmalara konik dişli çarklar denir. Konik dişli çarklar dönme sırasında birbirini üzerinde kaymaksızın yuvarlanan iki koniye sahiptirler.

3.3.1. Konik dişli çarklar için diş dibi gerilmeleri hesabı

Konik dişli çarklarda her iki dişliyi karakterize eden taksimat konilerinin yarı açıları δ_1 ve δ_2 şeklinde ifade edilir ve eksenler arasındaki açı δ ile gösterilirse konik dişliler için,

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 \quad [3.28]$$

şeklinde elde edilir.

Konik dişli çarklar pratikte en çok rastlanan $\delta = 90^\circ$ şeklinde olan tasarımlar olmakla birlikte, $\delta \geq 90^\circ$ veya $\delta \leq 90^\circ$ şeklindeki tasarım örneklerine de rastlanılmaktadır.

Konik dişli çarklarda koni geometrisine bağlı olarak dişlerin boyutları genişlik boyunca değişmektedir. Dişli çarkın dış kısmındaki boyutları standart boyutlar olarak alınır. Dişli çarkın dış kısmına göre elde edilen modül standart modül (m_a) olarak ifade edilir. Konik dişli çarklarda hesaplamalarda kullanılan ve dişlinin genişliğinin ortalama değerine ($b/2$) göre ifade edilen ortalama bölüm dairesi (d_o) ve bu daire üzerindeki modül ise ortalama modül (m_o) şeklinde olur.

Standart modülü ortalama modül cinsinden yazmak istersek,

$$m_a = m_o + \frac{b \sin \delta_1}{Z} \quad [3.29]$$

eşitliği elde edilir.

Konik dişli çarklarda bölüm dairesi konisinin uzunluğu R_a ise;

$$R_a = \frac{d_a}{2 \sin \delta_1} \quad [3.30]$$

eşitliği elde edilir. Burada, d_a dişlinin en dış kısmına göre elde edilen bölüm dairesi çapını ifade etmektedir.

Dişlinin standart ve ortalama modüllerine bağlı olarak bölüm daireleri çapları ise,

$$d_a = m_a Z \quad [3.31]$$

$$d_o = m_o Z \quad [3.32]$$

eşitlikleri elde edilir.

Eşdeğer diş sayısı ise,

$$Z_e = \frac{Z}{\cos \delta_1} \quad [3.33]$$

eşitliği ile hesaplanır.

Hesaplamalarda ortalama modül (m_o) kullanılır ancak standart modül olarak (m_a) dikkate alınır. Konik dişli çarklar eşdeğer düz dişliye indirgenip, düz dişli çarklar için kullanılan faktörler ve denklemlere uygulanarak hesaplamalar yapılır.

Konik dişli çarklarda dişe etki eden kuvvet neticesinde dişte meydana gelen eğilme gerilmesi,

$$\sigma_e = K_d K_{fe} \frac{F_t}{m_o \epsilon b} \quad [3.34]$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada;

K_{fe} : Teorik eşdeğer diş sayısına karşılık gelen form faktörüdür.

F_t teğetsel kuvveti ise,

$$F_t = \frac{2 K_o M_b}{m_o Z} \quad [3.35]$$

eşitliği ile elde edilir.

Dişli malzemesinin emniyetle taşıyabileceği eğilme gerilmesi ise “Eş. 3.23” ve “Eş. 3.25”de verilen ifadeler ile hesaplanır.

3.3.2. Konik dişli çarklar için yüzey basıncı hesabı

Konik dişli çarklar için yüzey basıncı hesabı düz dişli çarkların yüzey basıncı hesaplamaları ile benzerlik arz etmektedir. Ancak konik dişlilerde düz dişlilerden farklı olarak (K_{fe}) teorik eşdeğer diş sayısına karşılık gelen diş sayısı “Eş. 3.25”de kullanıldığı gibi, eksenler arasındaki açı $\delta = 90^\circ$ olan mekanizmalarda eşdeğer diş sayıları kullanılarak işlem yapılır.

Konik dişli çarklarda dişte meydana gelen maksimum yüzey basıncı,

$$p_{\max} = K_m K_\alpha K_\varepsilon \sqrt{\frac{K_d F_t i_e + 1}{b d_{e0} i_e}} \leq p_{em} \quad [3.36]$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada;

i_e : Eşdeğer diş sayılarına göre belirlenen iletim oranı,

d_{e0} : Eşdeğer diş sayısına göre elde edilen eşdeğer bölüm dairesi çapını,

ifade etmektedir.

Dişli malzemesinin taşıyabileceği emniyetli yüzey basıncı ise,

$$p_{em} = (0,25 - 0,3) H_B \quad [3.37]$$

eşitliği ile elde edilir.

4. DİŞLİ ÇARKLARIN ANALİTİK YAKLAŞIMLI ÇÖZÜMLERİ

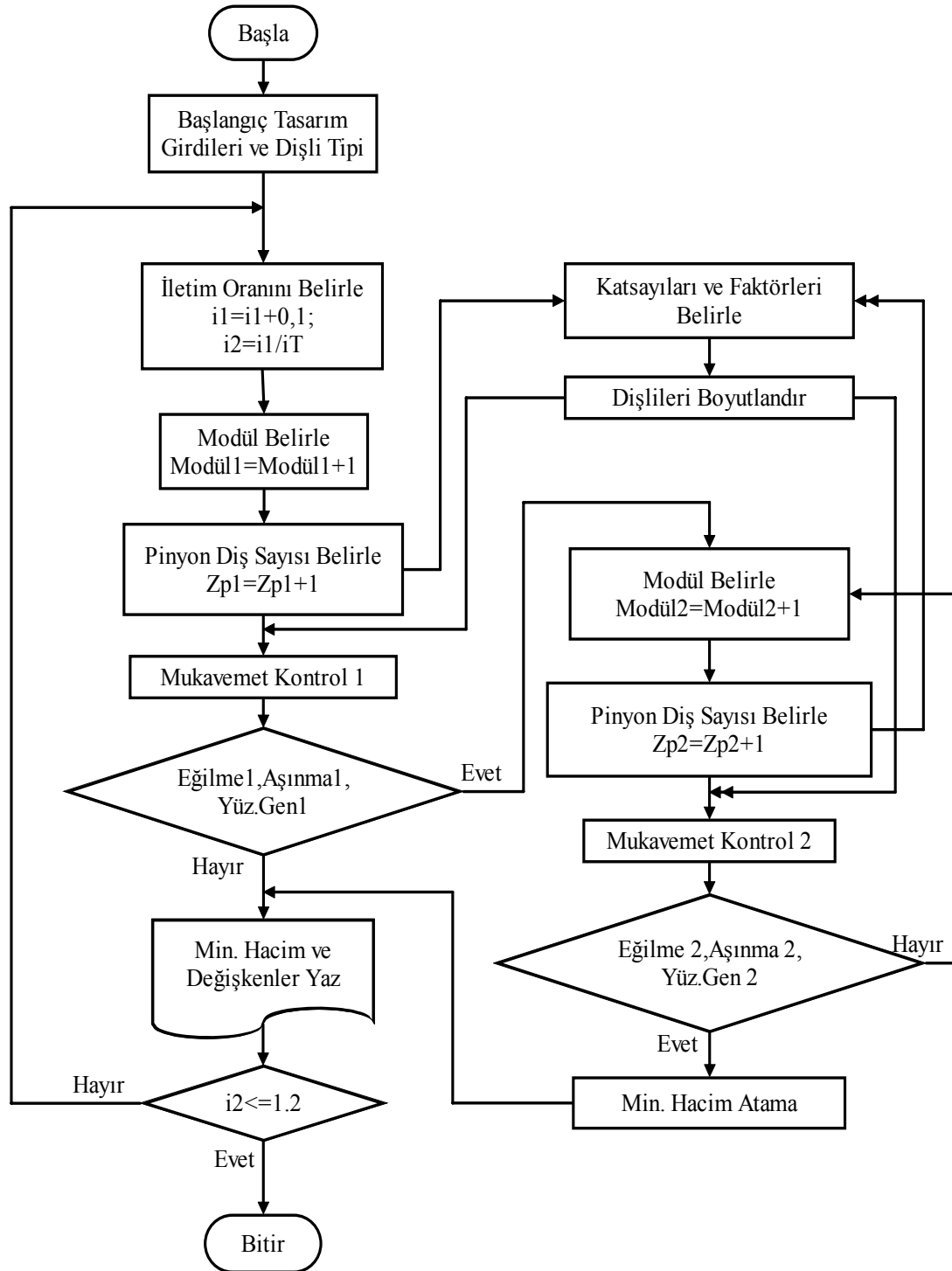
Tezde yer alan dişli çark tasarımları, paralel ve 90° kesişen dişli çark yerleşim mekanizmaları dikkate alınarak yapılmıştır. Bilindiği gibi modellemedeki hedef, belirli bir amaca yönelik olarak fonksiyon oluşturmaktır. Oluşturulan fonksiyon ise modelleme yapılmak istenilen problemin değişkenlerinden oluşmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada düz dişli çarklar, helis dişli çarklar ve konik dişli çarklar modellenmiştir. Bu üç tip dişli çark mekanizmaları, “minimum malzeme hacmi” amaç fonksiyonu olmak üzere, her dişli tipine bağlı olarak farklılık gösteren dişli değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak modellenmiş ve çözümü yapılmıştır. Malzeme hacmi amaç fonksiyonunda, kullanılan her bir dişlinin bir amaç fonksiyonu tanımlanmış ve bunların bir araya gelmesinden sistemin amaç fonksiyonu oluşturulmuştur.

Tezde gerçekleştirilmek istenilen GA ile çözümün doğrulanabilmesi için tek ve iki kademe analitik yaklaşımli çözümler yapılmıştır. Bu yaklaşım deneylere dayalı olarak elde edilen ve teknik kitaplarda verilen verilere (eğilme dayanımı, aşınma dayanımı, yüzey genişliği) uygun iteratif çözümlerdir.

Analitik yaklaşımli çözümde, öncelikle amaç fonksiyonu belirlenmiş olup bu fonksiyonu oluşturan modül ve diş sayısı değişkenlerine bağlı olarak tam tarama gerçekleştirilmektedir. Bu işlemin gerçekleştirilmesi için ilk olarak modül değişkeni seçilmekte ve bu modül değerine bağlı olarak diş sayısı değişkeni tanımlanmış olan aralık değerleri içinde taranıp, yukarıda anlatılan eğilme, aşınma ve yüzey genişliği sınırlama fonksiyonlarına göre mukavemet kontrolü yapılmıştır.

Seçilen modül ve diş sayısı sınırlama fonksiyonlarını sağlıyor ise amaç fonksiyonu hesaplanır ve elde edilen veriler dosyaya kaydedilir. Eğer ilk seçilen modül için taranan diş sayısı değişkenleri sınırlama fonksiyonlarını sağlamıyor ise, modül değişkeni artırılıp tekrar tüm diş sayıları taranır ve kontrol yapılır. Bu işlem tüm modüller için tüm diş sayıları taranıp, sınırlama fonksiyonlarını ve sonucunda amaç fonksiyonunu sağlayan değişkenlerin elde edilmesine ve sonuç olarak en uygun

analitik çözüm minimum malzeme hacminin elde edilmesine kadar devam etmektedir. Şekil 4.1’de analitik yaklaşımlı çözümün akış şeması görülmektedir.



Şekil 4.1. Analitik yaklaşım ile çözüm akış şeması

4.1. Düz Dişli Çark Kademeleri İçin Analitik Yaklaşımlı Çözüm

Dişli çarkların analitik yaklaşımli çözümü, mukavemet hesaplamalarında kullanılan genel formüllerden yararlanılarak yapılmıştır. Bu amaçla öncelikle amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. Amaç fonksiyonu olarak dişli çark mekanizmasının “minimum malzeme hacmi” 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. Amaç fonksiyonu ve sınırlama fonksiyonları tek ve iki kademeli mekanizma şeklinde modellenmiş ve çözülmüştür.

4.1.1. Tasarım Değişkenlerinin Tanımlanması

Amaç fonksiyonunun oluşturulmasından önce dişli tasarımı için gerekli olan ve amaç fonksiyonunun da kullanacağı değişkenlerin belirlenmesi gerekmektedir. Değişkenlerin tasarım vektörü, modül, diş sayısı ve diş genişliği olmak üzere:

$$x(i) = \begin{cases} \text{Modül (m)} \\ \text{Diş sayısı (Z)} \\ \text{Diş genişliği (b)} \end{cases} \quad [4.1]$$

şeklinde ifade edilir.

Burada; x : tasarım değişkenlerini, $i=1...3$ 'e kadar tasarım değişkeni sayısını ifade etmektedir.

Modül değişkeni Seri 1 ve Seri 2'den olmak üzere farklı değer aralığında tanımlanmıştır. Buna göre modül değişkeni aralığı:

$$m_{alt} \leq m \leq m_{üst} \quad [4.2]$$

şeklinde ifade edilir.

Burada; $m_{alt} = 1\text{mm}$ ve $m_{üst} = 50\text{ mm}$ olmak üzere modül, 31 farklı değerden oluşmaktadır.

Dişli tasarımında, pinyon ve çark malzemeleri aynı olduğunda tasarım işlemi pinyona göre yapılır ve çark diş sayısı ise pinyon dişlisinin diş sayısına ve iletim oranına bağlı olarak elde edilir.

Tasarım işleminde malzemeler aynı kabul edilmiş olup, pinyon dişlisinin diş sayısı:

$$17 \leq Z_1 \leq 25 \quad [4.3]$$

aralığında tanımlanmıştır.

Burada, Z_1 (pinyon) dişlisinin alt kesilmeye uğramaması için alt sınırı, teorik eşdeğer minimum diş sayısı olan 17 olarak alınmıştır .

Diş genişliği değişkeni, “Eş. 3.8” de verilen ifade gereği, genişlik faktörünü oluşturan değişkenlerden bir tanesidir. Diş genişliği, tasarım işleminde başlangıçta kabul edilen genişlik faktörüne bağlı olarak, modül değeri ile doğru orantılı olarak değişen ve modül değeri ile genişlik faktöründen elde edilen bir değişkendir. Literatürde dişli çarklar için genişlik faktörleri tavsiye edilmiştir (56).

4.1.2. Çalışma şartı ve sabit değişkenlerin tanımlanması

Dişli tasarımında yukarıda anlatılan değişkenlerin dışında mukavemet analizinde kullanılan sabit değişkenler de vardır. Bunlar giriş gücü, giriş devir sayısı, kavrama oranı, çalışma (işletme) faktörü, genişlik faktörü, çentik faktörü, malzeme faktörü,

yuvarlanma noktası katsayısı, diş uzunluk (kavrama) katsayısı, dişlinin sertliği, tahrik sistemi, kullanılan malzeme ve imalat yöntemini kapsayan bu değişkenler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Düz dişli tasarımı için çalışma şartı ve sabit değişkenleri

Çalışma Şartı ve Sabit Değişkenler	Değeri
Giriş gücü, (kW).	7,5
Giriş devri, (dev/dak).	1800
İletim oranı, (i).	2; 3; 4; 5; 6; 11; 16; 21
Malzeme (Sementasyon çeliği)	16MnCr5
İmalat yöntemi	Hassas işçilik
Tahrik sistemi	Elektrik motoru
Dişli yüzeyinin Brinell sertliği, (N/mm ²).	1460
Malzemenin kopma dayanımı, (N/mm ²).	1100
Genişlik faktörü, (ψ_m).	$18 \leq \psi_m \leq 23$
Çalışma (işletme) faktörü, (K_o).	1,25
Kavrama oranı, (ϵ).	1,6
Çentik faktörü, (K_ϵ).	1,5
Malzeme faktörü, (K_m) (N/mm ²).	271,11
Yuvarlanma noktası katsayısı, (K_α).	1,76
Diş uzunluk (kavrama) katsayısı, (K_ϵ).	0,79

4.1.3. Sınırlama fonksiyonlarının oluşturulması

Sınırlama fonksiyonları, uygun tasarımın sağlanması veya amaç fonksiyonunun uygun tasarımları içerecek şekilde sınırlandırılmasında kullanılan şartlardır. Düz dişli çarklar için sınırlama fonksiyonlarının oluşturulmasında, düz dişli çarkların mukavemet kontrollerinde kullanılan eşitlikler ve değişkenler kullanılmıştır. Bunlar:

$$g(j) = \begin{cases} \text{Eğilme dayanımı sınırlaması} \\ \text{Aşınma dayanımı sınırlaması} \\ \text{Yüzey genişliği sınırlaması} \\ \text{Modül sınırlaması} \\ \text{Pinyon diş sayısı sınırlaması} \end{cases} \quad [4.4]$$

Modül sınırlaması:

$$m_{alt} \leq m \leq m_{üst} \quad [4.5]$$

şeklinde ifade edilmiştir.

Pinyon diş sayısı, “Eş. 4.3”de olduğu gibi sınırlama fonksiyonu olarak dikkate alınmıştır.

Yüzey genişliği, eğilme dayanımı ve aşınma dayanımı sınırlama fonksiyonlarının oluşturulmasında ise, “Eş. 3.8”, “Eş. 3.12” ve “Eş. 3.14” de verilen yüzey genişliği, eğilme dayanımı ve aşınma dayanımı mukavemet eşitlikleri kullanılmıştır. Bunlara göre iki kademeli bir düz dişli çark çifti için sınırlama fonksiyonları:

$$g_1(x) = K_d K_f K_c Ft_1 - \varepsilon b_1 m_1 (0,55 \sigma_K) \leq 0 \quad [4.6]$$

$$g_2(x) = K_d K_f K_c Ft_2 - \varepsilon b_2 m_2 (0,55 \sigma_K) \leq 0 \quad [4.7]$$

$$g_3(x) = K_{s1} F_{t1} \left(\frac{Z_2 + Z_1}{Z_1} \right) - b_1 m_1 Z_2 (P_{em})^2 \leq 0 \quad [4.8]$$

$$g_4(x) = K_{s1} F_{t1} \left(\frac{Z_4 + Z_3}{Z_3} \right) - b_2 m_2 Z_4 (P_{em})^2 \leq 0 \quad [4.9]$$

$$g_5(x) = ((18 m_1) - b_1) \leq 0 \quad [4.10]$$

$$g_6(x) = (b_1 - (23 m_1)) \leq 0 \quad [4.11]$$

$$g_7(x) = ((18 m_2) - b_2) \leq 0 \quad [4.12]$$

$$g_8(x) = (b_2 - (23 m_2)) \leq 0 \quad [4.13]$$

şeklinde elde edilir.

Burada;

$g_1(x)$: Eğilme dayanımı sınırlaması birinci kademe,

$g_2(x)$: Eğilme dayanımı sınırlaması ikinci kademe,

$g_3(x)$: Aşınma dayanımı sınırlaması birinci kademe,

$g_4(x)$: Aşınma dayanımı sınırlaması ikinci kademe,

$g_5(x)$, $g_6(x)$: Yüzey genişliği sınırlaması birinci kademe,

$g_7(x)$, $g_8(x)$: Yüzey genişliği sınırlaması ikinci kademe'yi

ifade etmektedir.

4.1.4. Amaç fonksiyonunun oluşturulması

Dişli çark mekanizmasının “minimum malzeme hacmi”, amaç fonksiyonu olarak dikkate alındığından, öncelikle dişli çark mekanizmasındaki tek bir dişlinin malzeme hacmi:

$$F_1 = [0,785 (m_1 Z_1)^2 b_1] \quad [4.14]$$

şeklinde elde edilir.

Buna göre iki kademedan oluşan bir dişli çark çiftinin “malzeme hacmi” amaç fonksiyonu, modül, diş sayısı ve diş genişliğinin bir fonksiyonu olmak üzere:

$$F_{\min} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad [4.15]$$

şeklinde 4 farklı fonksiyonun birleşiminden elde edilir.

Burada;

F_1 : 1. kademe pinyon dişlisi malzeme hacmi

F_2 : 1. kademe çark dişlisi malzeme hacmi

F_3 : 2. kademe pinyon dişlisi malzeme hacmi

F_4 : 2. kademe çark dişlisi malzeme hacmi

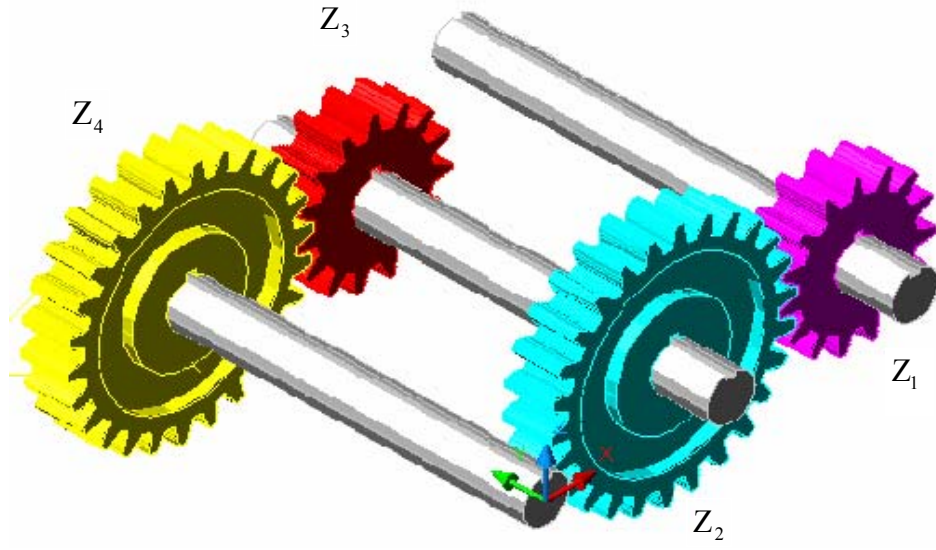
şeklinde ifade edilmektedir.

Yukarda anlatılanlara bağlı olarak iki kademedan oluşan bir dişli çark çiftinin malzeme hacmi amaç fonksiyonu, değişkenlere bağlı olarak açık yazılır ise:

$$F_{\min} = \left[0,785 \left((m_1 Z_1)^2 + (m_1 Z_2)^2 \right) b_1 + 0,785 \left((m_2 Z_3)^2 + (m_2 Z_4)^2 \right) b_2 \right] \quad [4.16]$$

şeklinde olur.

Düz dişli çarklar yukarda anlatılan mukavemet esaslarına göre, tek kademeli mekanizma ve iki kademeli mekanizma olmak üzere iki farklı mekanizma tasarım düzeninde analitik yaklaşımla “minimum malzeme hacmi” amaç fonksiyonu için çözülmüştür. Şekil 4.2’de iki kademeli bir düz dişli mekanizması görülmektedir.



Şekil 4.2. İki kademeli düz dişli çark mekanizması

Şekil 4.2’de Z_1 ve Z_3 birinci ve ikinci kademelerin pinyon dişlilerini, Z_2 ve Z_4 ise birinci ve ikinci kademelerin çark dişlilerini ifade etmektedir. Pinyon dişlilerinin çapları, çark dişlilerinin çaplarından küçük olduğundan daha fazla dönerler ve çabuk aşınırlar. Bu nedenle tasarım işleminde pinyon dişlileri referans alınıp tasarım gerçekleştirilir.

4.1.5. Analitik yaklaşım, düz dişli çark, tek kademeli mekanizma çözümü

Tek kademeli mekanizma (Bkz. Şekil 4.2) Z_1 ve Z_2 dişli çiftinden oluşmaktadır. Dişli çark mekanizmalarında iletim oranı ise bu dişli çiftlerinin birbirlerine oranı olup:

$$i = \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right) \quad [4.17]$$

şeklinde ifade edilir.

Tek kademe, analitik yaklaşımlı çözüm düz dişli çark mekanizmalarında maksimum iletim oranı 5 alınmıştır. Buna göre tek kademe analitik yaklaşımlı çözüm için iletim oranı, 2, 3, 4 ve 5 olmak üzere dört farklı değer için çözümler yapılmıştır. Analitik yaklaşımlı çözüm programı ana menüsü Ek 1’de verilmiştir.

Çizelge 4.2’de tek kademeli düz dişli çark mekanizması için farklı iletim oranlarında elde edilen değişkenler ve minimum malzeme hacmi değerleri görülmektedir. Tasarım işleminde malzeme olarak 16MnCr5 sembolü sementasyon çeliği seçilmiştir.

Çizelge 4.2. Analitik yaklaşımlı çözüm, düz dişli çark, tek kademe parametre ve değişkenleri

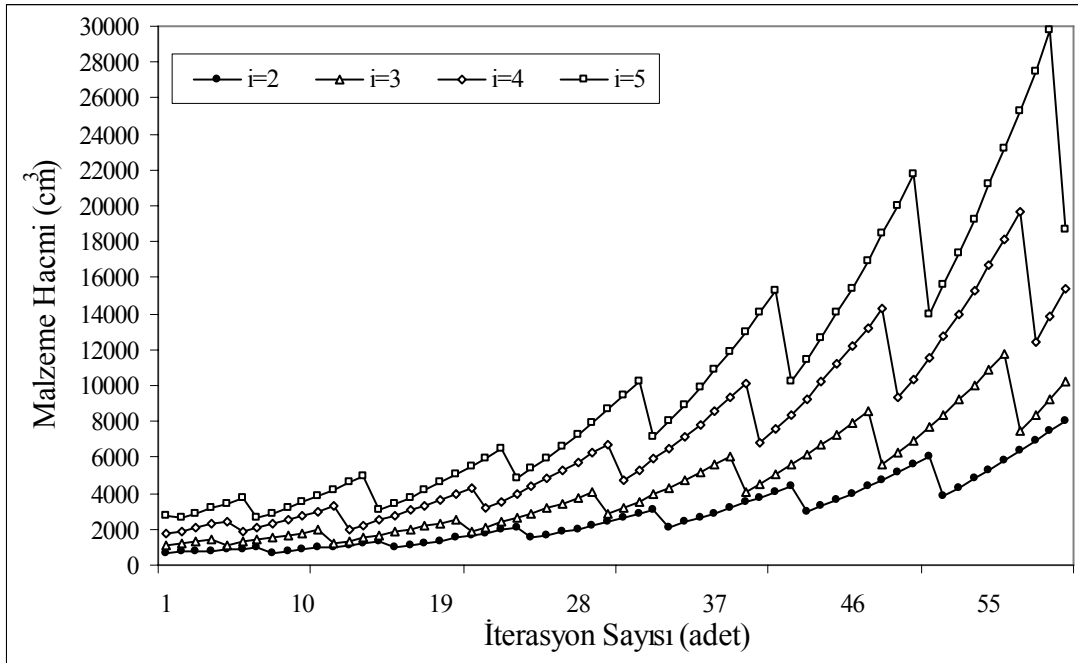
Güç (kW)	Giriş Devri (dv/dk)	Çıkış Devri (dv/dk)	İletim Oranı	Modül (mm)	Pinyon	Çark	Diş Geniş. (mm)	Eksenler Arası (mm)	Min. Malz. Hacmi (cm³)
7.5	1800	360	5	2,75	18	90	49,5	148,5	2604,77
7.5	1800	450	4	2,25	25	100	40,50	140,63	1795,81
7.5	1800	600	3	2,5	22	66	45	110	1148,06
7.5	1800	900	2	2,5	24	48	45	90	701,20

Çizelge 4.2’de verilen değerlerden aynı malzeme, güç ve giriş devri için tek kademeli bir mekanizmanın farklı iletim oranlarında, modül, pinyon ve çark dişlisi, diş genişliği, eksenler arası mesafe ve malzeme hacminin aldığı değerler görülmektedir. Burada tek kademeli mekanizma için düşük iletim oranlarında daha düşük malzeme hacminde tasarım elde edildiği görülmektedir.

Tek kademeli düz dişli çark mekanizması, $i=2$ için analitik yaklaşımlı çözüm programı çalıştırıldığında elde edilen dişli parametreleri ve çarkların boyutlandırılmasına ait tasarım sonuçları tek kademeli mekanizma sonuç menüsünde verilmiştir (Ek 2).

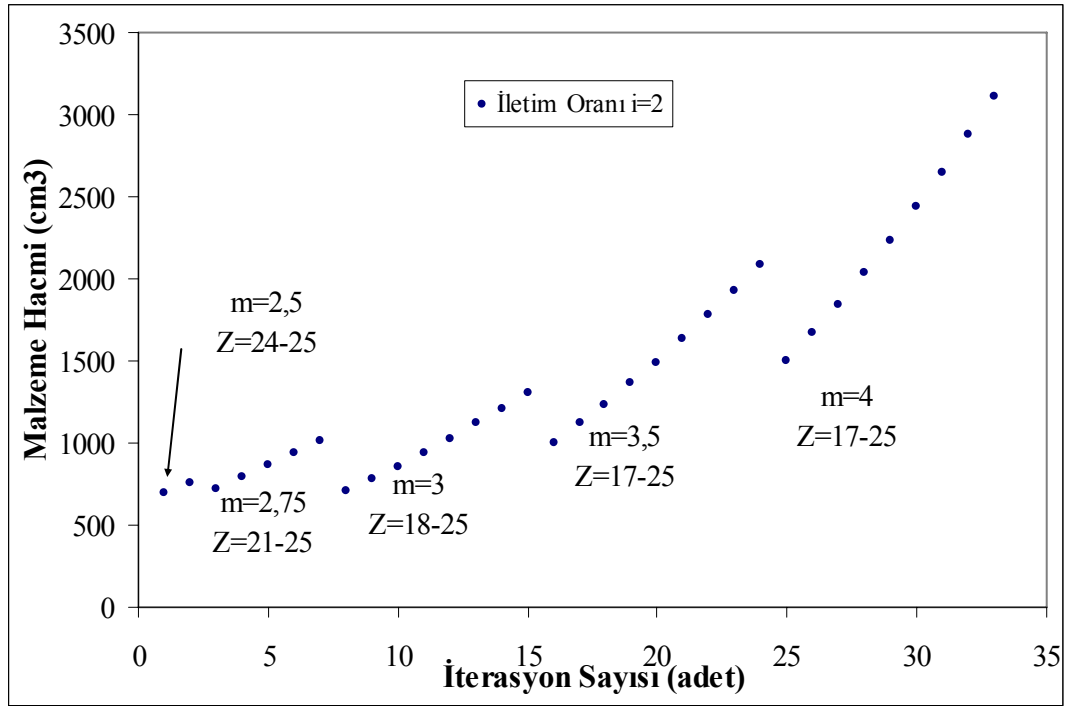
Analitik yaklaşımlı çözüm, tek kademeli mekanizma, farklı iletim oranlarında elde edilen malzeme hacimlerinin (Bkz. Çizelge 4.2), iterasyona bağlı olarak elde edilişi ve değişimi ise Şekil 4.3’de görülmektedir.

Akış şemasına göre (Bkz. Şekil 4.1) iterasyon işlemi seçilen her bir modül için pinyon dişlisi diş sayısının, alt sınırdan üst sınıra kadar taranması şeklinde devam etmektedir. Bu süreçte amaç fonksiyonu olan “malzeme hacmi” değeri artış gösteren bir eğilim ile elde edilmektedir (Şekil 4.3). Tarama işlemi, modülün yeniden seçilmesi ve pinyon dişlisinin diş sayısının da alt sınır seçilmesi ile bir önceki döngünün tam tersine “malzeme hacmi” eğrisi burada bir düşme göstermektedir. Sonuç olarak grafikteki artış gösteren doğru parçaları, tarama işleminde seçilmiş olan farklı modülleri ifade ederken, bu eğriler üzerindeki her data ise seçilen modüller için taranan pinyon diş sayısı değerlerini ifade etmektedir. Grafikten ayrıca düşük iletim oranlarında düşük “malzeme hacmi” değerinin elde edildiği görülmektedir.



Şekil 4.3. Analitik yaklaşımlı çözüm, düz dişli çark, tek kademe, farklı iletim oranlarında malzeme hacmi değişimi

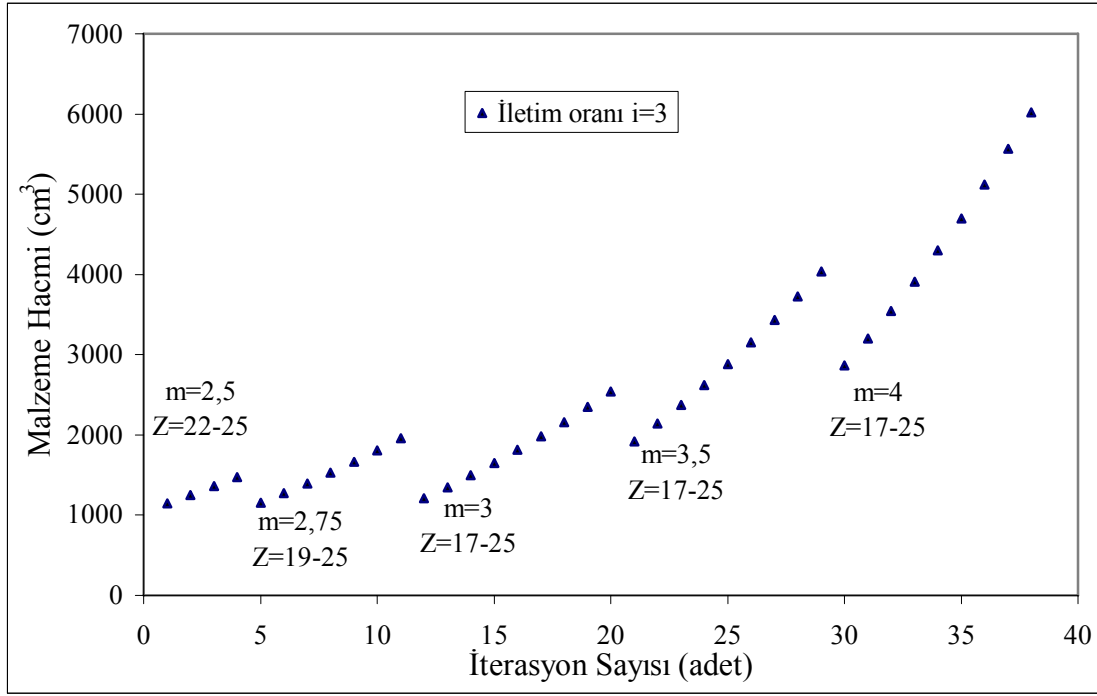
Şekil 4.3’de verilen ve farklı iletim oranlarına göre “malzeme hacmi” değişimini gösteren grafikler, iterasyon sürecinde almış oldukları modül ve diş sayılarını ifade edecek şekilde çizdirilebilir. Buna göre $i=2$ için iterasyon sürecinde sınırlama fonksiyonlarını sağlayan modül ve diş sayısı kombinasyonları ve “malzeme hacmi” değerlerini gösteren grafik Şekil 4.4’de görülmektedir.



Şekil 4.4. Analitik çözüm, düz dişli çark, tek kademe, $i=2$ için malzeme hacmi iterasyon sürecindeki modül ve diş sayısı değişkenleri

Grafikte görüldüğü gibi başlangıçta alınan $m=2,5$ ve $Z=24,25$ değerleri tek kademeli mekanizma olduğu için sınırlama fonksiyonlarını sağlayan en küçük modül ve diş sayılarına karşılık gelen iterasyon işlemini ifade etmektedir. Bir sonraki veri serilerinde modül değeri artarak değişmekte ve elde edilen malzeme hacimleri de artmaktadır. Bu grafikte sınırlama fonksiyonlarını sağlayan ilk iterasyonun $m=2,5$ ile başlayıp, diş sayısı ise 24 ile en düşük malzeme hacmi değerini aldığı görülmektedir.

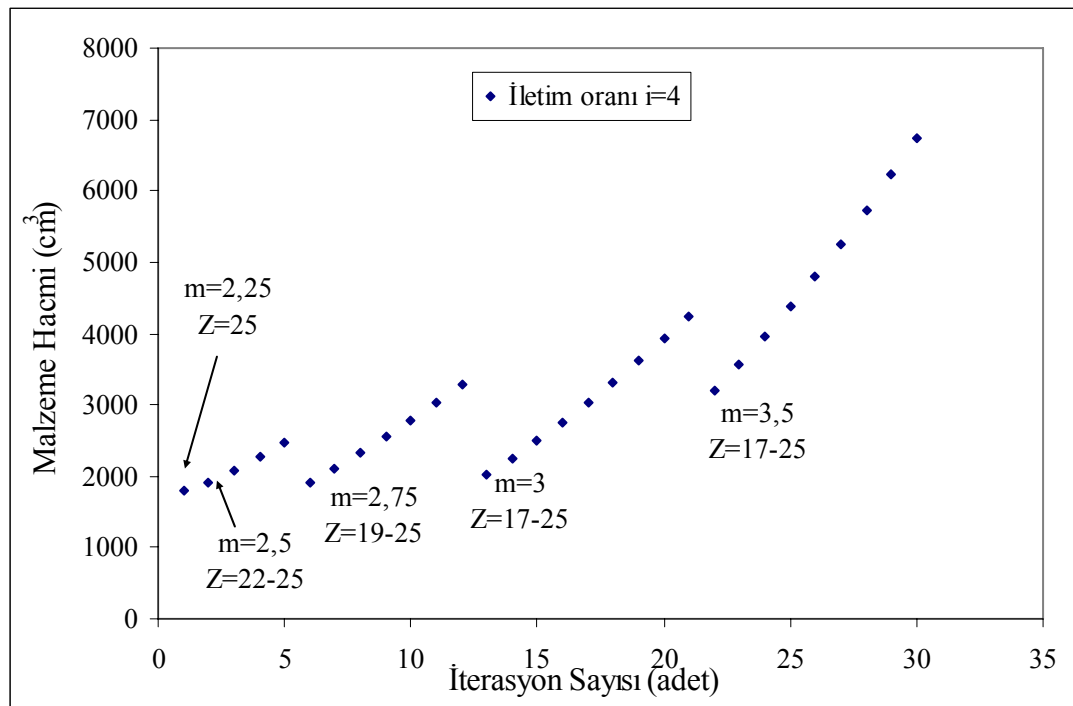
İletim oranı 3 için iterasyon sürecinde sınırlama fonksiyonlarını sağlayan modül ve diş sayısı kombinezonları ve “malzeme hacmi” değerlerini gösteren grafik Şekil 4.5’de görülmektedir.



Şekil 4.5. Analitik çözüm, düz dişli çark, tek kademe, $i=3$ için malzeme hacmi iterasyon sürecindeki modül ve diş sayısı değişkenleri

İletim oranı 3 için verilen grafikte (Bkz. Şekil 4.5), sınırlama fonksiyonlarını sağlayan ilk iterasyon sürecinde $m=2,5$ değerini alırken, bu modüle bağlı olarak diş sayısı 22 ile 25 aralığında dört tane değer alıp bunlara göre “malzeme hacmi” değerleri elde edilmiştir. Bir sonraki iterasyonda modül değeri artmakta olup diş sayısı ise ilk iterasyondaki diş sayısından daha düşük olan 19 değerinde sınırlama fonksiyonlarını sağlamaktadır. Grafikte sınırlama fonksiyonlarını sağlayan beş ayrı iterasyon için beş ayrı modül ve diş sayısı kombinezonları ve malzeme hacmi değerleri görülmektedir. Burada ilk iterasyonda $m=2,5$ ve Z ise 22 ile en küçük malzeme hacmi değeri elde edilmektedir.

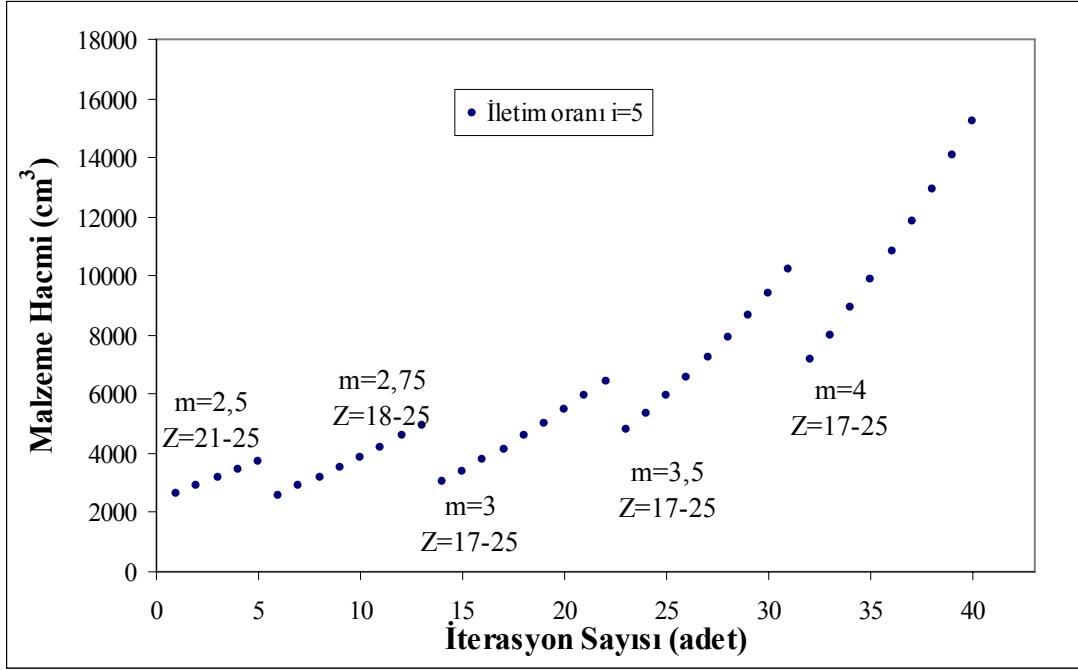
İletim oranı 4 için iterasyon sürecinde sınırlama fonksiyonlarını sağlayan modül ve diş sayısı kombinezonları ve “malzeme hacmi” değerlerini gösteren grafik Şekil 4.6’da görülmektedir.



Şekil 4.6. Analitik çözüm, düz dişli çark, tek kademe, $i=4$ için malzeme hacmi iterasyon sürecindeki modül ve diş sayısı değişkenleri

Grafiğe göre, sınırlama fonksiyonlarını sağlayan ve minimum malzeme hacmini veren ilk iterasyonda $m=2,25$ ve diş sayısı ise $Z=25$ değerinde en uygun sonuç elde edilmektedir. Yani ilk iterasyondaki modül değeri sadece bir tek diş sayısında uygun çözümü sağlamaktadır. Sonrasında ise modül değerleri artarak değişirken, diş sayısı ise gittikçe azalarak değişmekte ve $m=3$ ve $m=3,5$ değerleri için diş sayısı en alt limit olan 17 değerlerinde sınırlama fonksiyonlarını sağlayan uygun çözümler elde edilmektedir.

İletim oranı 5 için iterasyon sürecinde sınırlama fonksiyonlarını sağlayan modül ve diş sayısı kombinezonları ve “malzeme hacmi” değerlerini gösteren grafik Şekil 4.7’de görülmektedir.



Şekil 4.7. Analitik çözüm, düz dişli çark, tek kademe, $i=5$ için malzeme hacmi iterasyon sürecindeki modül ve diş sayısı değişkenleri

Grafiğe göre, sınırlama fonksiyonlarını sağlayan ve minimum malzeme hacmini veren ilk iterasyonda $m=2,5$ ve diş sayısı ise $Z=21$ değerinde uygun sonuç elde edilmektedir. Sonraki iterasyon döngülerinde modül değerleri büyümekte ancak diş sayısı değişkeninin alt sınırlarında, sınırlama fonksiyonlarını sağlayan çözümler elde edilmektedir.

4.1.6. Analitik yaklaşım, düz dişli çark, iki kademeli mekanizma çözümü

Analitik yaklaşımlı çözüm tek kademede iletim oranı 5 olarak alındığından, iki kademeli mekanizma analitik çözüm için ise iletim oranları, 6, 11, 16 ve 21 değerleri olmak üzere dört farklı değer için çözümler yapılmıştır.

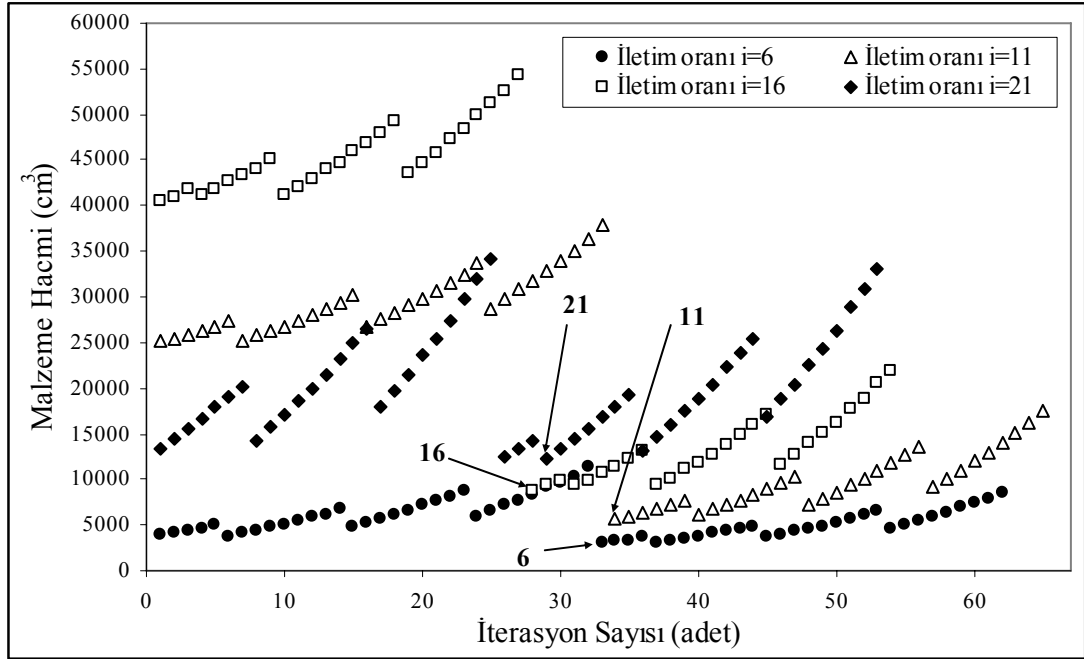
Analitik çözüm, iki kademe düz dişli çark mekanizmaları, farklı iletim oranlarında elde edilen “minimum malzeme hacmi” değerleri Çizelge 4.3’de verilmiştir. Çizelgede kademelere ait tasarım değişkenleri de görülmektedir.

Çizelge 4.3. Analitik yaklaşımlı çözüm, düz dişli çark, iki kademe parametre ve değişkenleri

Güç (kW)	Giriş Devri (dv/dk)	Çıkış Devri (dv/dk)	İletim Oranı	Modül (mm)	Pinyon	Çark	Diş Geniş. (mm)	Eksenler Arası (mm)	Min. Malz. Hacmi (cm ³)
7.5	1800	85,7	21	2,75	18	86	49,5	143	12263,91
				4,5	19	83	81	229,5	
7.5	1800	112,5	16	2,25	25	117	40,5	159,75	8749,39
				4	23	78	72	202	
7.5	1800	163,6	11	2,25	25	90	40,5	129,4	5607,09
				3,5	25	76	63	176,8	
7.5	1800	300	6	2,75	20	52	49,5	99	3049,84
				3,5	22	51	63	112,7	

Çizelge 4.3.'de görüldüğü gibi iki kademeli mekanizma için de aynı güç, giriş devri ve malzeme için tasarım yapıldığında, küçük iletim oranlarında daha küçük malzeme hacmi değerleri elde edilmektedir.

İki kademeli mekanizma farklı iletim oranlarında elde edilen hacim değerlerinin iterasyona bağlı olarak değişimi ise Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8. Analitik çözüm, düz dişli çark, iki kademe, farklı iletim oranlarında malzeme hacmi değişimi

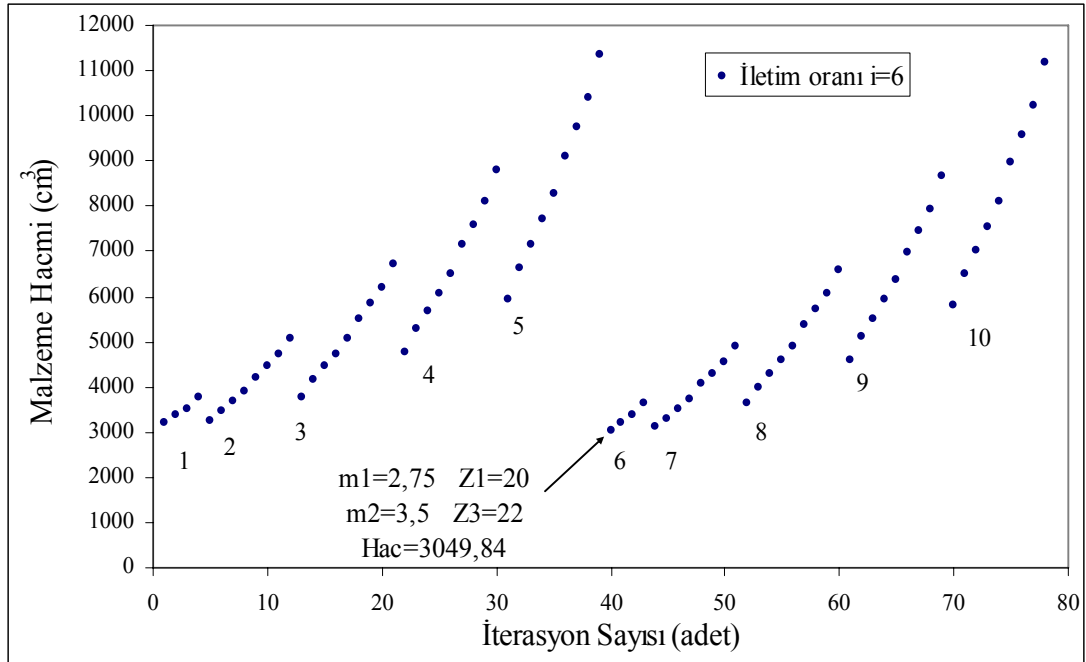
Bu grafik, iterasyon sayısının her iletim oranı için aynı olmaması, büyük iterasyon sayılarından dolayı (>65000) ve grafikte iterasyon işleminin daha anlaşılır olması için, her iletim oranı için elde edilen “minimum malzeme hacmi” değerinin altında ve üstünde düzgün veri dotaları oluşturan modül ve diş sayısı kombinezonları dikkate alınarak veriler çizdirilmiştir.

Şekil 4.8’deki grafikte 6, 11, 16 ve 21 ile gösterilen noktalar, bu iletim oranlarında elde edilen “minimum malzeme hacmi” değerlerinin bulunduğu yeri ifade etmektedir. Burada belirtilmiş olan “malzeme hacmi” değerlerinden, iki kademeli düz dişli çark mekanizmalarında, küçük iletim oranlarında küçük hacimlerin elde edildiği görülmektedir.

İki kademeli düz dişli çark mekanizması, $i=6$ için analitik yaklaşımlı çözüm programı çalıştırıldığında elde edilen dişli parametreleri ve çarkların boyutlandırılmasına ait tasarım sonuçları iki kademeli mekanizma sonuç menüsünde verilmiştir (Ek 3).

Analitik yaklaşım ile iki kademeli mekanizma farklı iletim oranlarında elde edilen “malzeme hacmi” değerlerinin iterasyona bağlı olarak değişimleri grafikler ile izlenebilir.

Buna göre analitik yaklaşımlı çözüm ile iletim oranı 6 için elde edilen “malzeme hacmi” değişimi ve minimum malzeme hacmindeki modül ve diş sayısı değişkenleri Şekil 4.9’da görülmektedir.

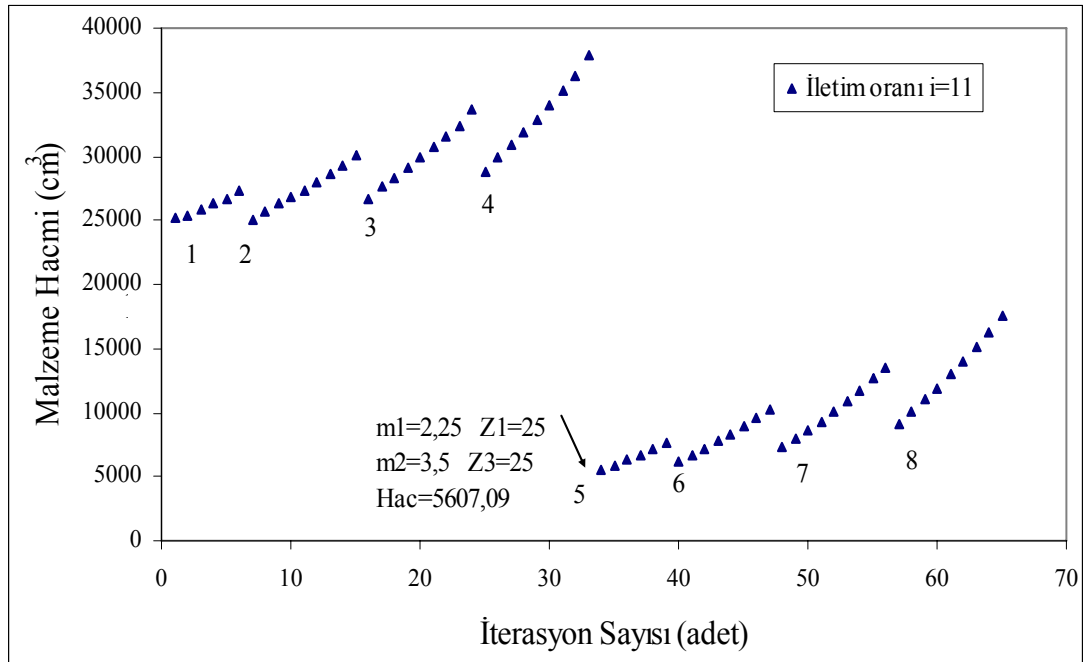


Şekil 4.9. Analitik çözüm, düz dişli çark, iki kademe $i=6$ için malzeme hacminin iterasyona göre değişimi ve en düşük malzeme hacmi değişkenleri

Şekil 4.9’deki grafikte, iterasyon sayısının büyük olması (>65000) nedeniyle, iletim oranı 6 için bulunan minimum malzeme hacminin 40 alt ve 40 üst aralığındaki iterasyon değerleri dikkate alınarak grafik çizdirilmiştir. Grafikte, ok ile gösterilen iterasyon döngüsü minimum malzeme hacminin elde edildiği döngüyü ifade etmektedir. Bu grafikte 1 ile gösterilen iterasyon döngüsünde iletim oranları $i_1=2,6$ ve $i_2=2,31$ değerleri seçildikten sonra, birinci kademe için $m=2,5$ ve $Z=25$ değerleri seçilip, sonrasında ikinci kademe için $m=3,5$ ve Z ise 22 ile 25 aralığında tarama yapılarak elde edilen dört farklı malzeme hacmi değerlerini göstermektedir. 2 ile

gösterilen döngüde ise sadece ikinci kademenin modülü değişip $m=4$ olmakta ve Z ise 18 ile 25 aralığında tarama yapılarak sekiz farklı malzeme hacmi değerleri elde edilmektedir. Bu işlem 5 ile gösterilen döngü sonuna kadar devam etmektedir. Grafikte 6 ile gösterilen döngünün birinci kademesindeki modül değeri, 1~5 döngülerinde almış olduğu değerin bir üstünü ve uygun diş sayısını aldıktan sonra, 7, 8, 9, 10 döngülerinde ikinci kademenin modül değerleri değişmekte ve seçilen her modül için Z değerleri taranmaktadır.

İki kademe, iletim oranı 11 için elde edilen “malzeme hacmi” değişimi ve minimum malzeme hacmindeki modül ve diş sayısı değişkenleri Şekil 4.10’da görülmektedir.



Şekil 4.10. Analitik çözüm, düz dişli çark, iki kademe, $i=11$ için malzeme hacminin iterasyona göre değişimi ve minimum malzeme hacmi değişkenleri

Grafikte, ok ile gösterilen iterasyon döngüsü minimum malzeme hacminin elde edildiği döngüyü ifade etmektedir. Bu grafikte 1 ile gösterilen iterasyon döngüsünde iletim oranları $i_1=3,5$ ve $i_2=3,14$ değerleri seçildikten sonra, birinci kademe için $m=5,5$ ve $Z=24$ değerleri seçilip, sonrasında ikinci kademe için ilk veride $m=3,5$ ve $Z=25$ için uygun çözüm bulmakta ve sonrasında ise $m=4$ için $Z=21$ ile 24 aralığında

tarama yapılarak elde edilen altı farklı malzeme hacmi değerlerini göstermektedir. 2 ile gösterilen döngüde ise sadece ikinci kademenin modülü değişip $m=4,5$ olmakta ve Z ise 17 ile 25 aralığında tarama yapılarak dokuz farklı malzeme hacmi değerleri elde edilmektedir. 3 ve 4 nolu döngülerde, birinci kademedede, 2 nolu döngünün birinci kademesinde alınan değerler sabit olmak üzere, ikinci kademe için $m=5$ ve $m=5,5$ değerleri için $Z=17$ ile 25 aralığında tarama yapılarak malzeme hacim değerleri elde edilmektedir. Bu işlem 5 ile gösterilen döngü sonuna kadar devam etmektedir. Grafikte 6 ile gösterilen döngünün birinci kademesindeki modül değeri, 1~5 döngülerinde almış olduğu değerlerin bir üstünü ve uygun diş sayısını aldıktan sonra, 7, 8, 9, 10 döngülerinde ikinci kademenin modül değerleri değişmekte ve seçilen her modül için Z değerleri taranmaktadır.

4.2. Helisel Dişli Çark Kademeleri İçin Analitik Yaklaşımlı Çözüm

Helisel dişli çarkların analitik yaklaşımli çözümü, düz dişli çarklarda olduğu gibi mukavemet hesaplamalarında kullanılan genel formüllerden yararlanılarak yapılmıştır. Bu amaçla helisel dişli çarklarda amaç fonksiyonu olarak “malzeme hacmi” dişli tasarım değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak dikkate alınmıştır. Sınırlama fonksiyonları da helisel dişli çark mekanizmasının mukavemet hesaplamalarına bağlı olan ve amaç fonksiyonunun sağlanmasında kullanılan eşitlikler şeklinde modellenmiştir. Helisel dişli çarkların analitik yaklaşımla çözümü, tek ve iki kademeli mekanizma şeklinde gerçekleştirilmiştir.

4.2.1. Tasarım Değişkenlerinin Tanımlanması

Helisel dişli çarkların analitik yaklaşımli çözümünde dikkate alınan tasarım değişkenlerinin belirlenmesinde, düz dişli çarklar için Bölüm 4.1.1’de anlatılan ifadeler dikkate alınmıştır. Buna göre “Eş. 4.1”, “Eş. 4.2” ve “Eş. 4.3” helisel dişli çarklar için de geçerlidir.

4.2.2. Çalışma şartı ve sabit değişkenlerin tanımlanması

Helisel dişli çarkların çalışma şartı ve sabit değişken değerleri, düz dişli çarklarda verilen (Bkz. Çizelge 4.1) ifadeler geçerlidir. Ancak genişlik faktörü (φ_m) helisel dişli çarklarda $20 \leq \varphi_m \leq 40$ aralığında dikkate alınmıştır (56).

4.2.3. Sınırlama fonksiyonlarının oluşturulması

Helisel dişli çarkların sınırlama fonksiyonlarının oluşturulması, düz dişli çarkların sınırlama fonksiyonları ile benzerlik göstermektedir. Buna göre düz dişli çarklarda kullanılan “Eş. 4.3”, “Eş. 4.4” ve “Eş. 4.5” helisel dişli çarkların analitik yaklaşımli çözümünde de geçerlidir.

Yüzey genişliği, eğilme dayanımı ve aşınma dayanımı sınırlama fonksiyonlarının oluşturulmasında ise, “Eş. 3.8”, “Eş. 3.26” ve “Eş. 3.27” de verilen yüzey genişliği, eğilme dayanımı ve aşınma dayanımı mukavemet eşitlikleri kullanılmıştır. Bunlara göre iki kademeli bir helisel dişli çark çifti için sınırlama fonksiyonları:

$$g_1(x) = K_d K_{fe} K_c Ft_1 - \varepsilon b_1 m_{n1} (0,55 \sigma_K) \leq 0 \quad [4.18]$$

$$g_2(x) = K_d K_{fe} K_c Ft_2 - \varepsilon b_2 m_{n2} (0,55 \sigma_K) \leq 0 \quad [4.19]$$

$$g_3(x) = K_{s2} F_{t1} \left(\frac{Z_2 + Z_1}{Z_1} \right) - b_1 m_{n1} Z_2 (P_{em})^2 \leq 0 \quad [4.20]$$

$$g_4(x) = K_{s2} F_{t2} \left(\frac{Z_4 + Z_3}{Z_3} \right) - b_2 m_{n2} Z_4 (P_{em})^2 \leq 0 \quad [4.21]$$

$$g_5(x) = ((20 m_{n1}) - b_1) \leq 0 \quad [4.22]$$

$$g_6(x) = (b_1 - (40 m_{n1})) \leq 0 \quad [4.23]$$

$$g_7(x) = ((20 m_{n2}) - b_2) \leq 0 \quad [4.24]$$

$$g_8(x) = (b_2 - (40 m_{n2})) \leq 0 \quad [4.25]$$

şeklinde elde edilir.

Burada;

$g_1(x)$: Eğilme dayanımı sınırlaması birinci kademe,

$g_2(x)$: Eğilme dayanımı sınırlaması ikinci kademe,

$g_3(x)$: Aşınma dayanımı sınırlaması birinci kademe,

$g_4(x)$: Aşınma dayanımı sınırlaması ikinci kademe,

$g_5(x), g_6(x)$: Yüzey genişliği sınırlaması birinci kademe,

$g_7(x), g_8(x)$: Yüzey genişliği sınırlaması ikinci kademe'yi,

ifade etmektedir.

4.2.4. Amaç fonksiyonunun oluşturulması

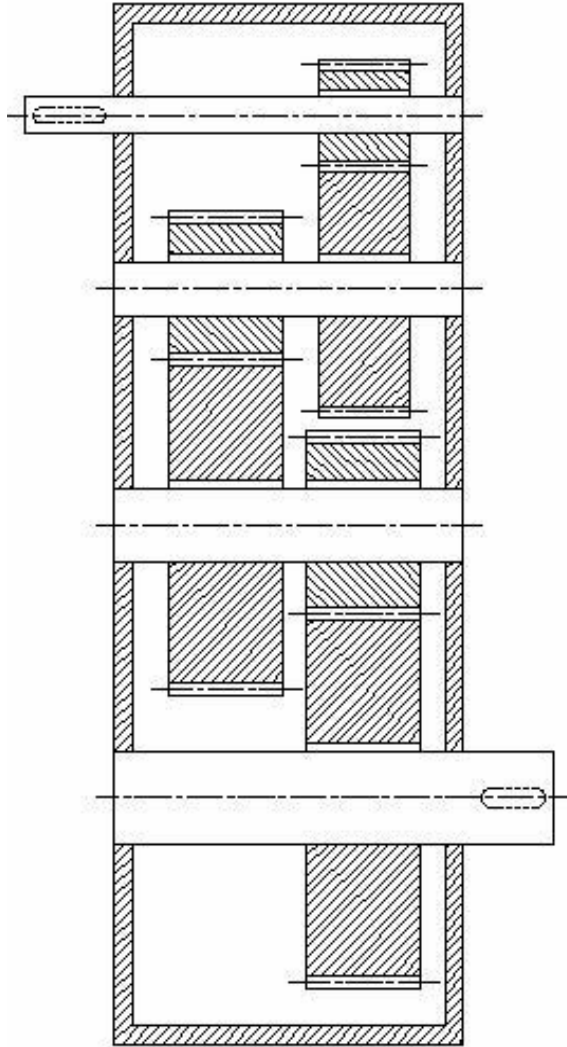
Helisel dişli çarklarda amaç fonksiyonunun oluşturulması, düz dişli çarklarda amaç fonksiyonunun oluşturulması Bölüm 4.1.4'de anlatıldığı gibi gerçekleştirilmiştir. Ancak düz dişli çarklardan farklı olarak helisel dişli çarklarda alın modül ve normal modül olmak üzere iki farklı modül değeri olduğundan, helisel dişli çarklarda amaç fonksiyonu, standart modülü ifade eden normal modül cinsinden oluşturulur.

Buna göre iki kademeden oluşan bir helisel dişli çark çiftinin “malzeme hacmi” amaç fonksiyonu, modül, diş sayısı ve diş genişliğinin bir fonksiyonu olmak üzere:

$$F_{\min} = \left[0,785 \left((m_{n1} Z_1)^2 + (m_{n1} Z_2)^2 \right) b_1 + 0,785 \left((m_{n2} Z_3)^2 + (m_{n2} Z_4)^2 \right) b_2 \right] \quad [4.26]$$

şeklinde elde edilir.

Helisel dişli çarklar yukarda anlatılan mukavemet esaslarına göre, tek kademeli mekanizma ve iki kademeli mekanizma olmak üzere iki farklı mekanizma tasarım düzeninde analitik olarak “malzeme hacmi” amaç fonksiyonu için çözülmüştür. Şekil 4.11’de üç kademeli bir helisel dişli mekanizması görülmektedir.



Şekil 4.11. Üç kademeli helisel dişli çark mekanizması.

4.2.5. Analitik yaklaşım, helisel dişli çark, tek kademeli mekanizma çözümü

Tek kademe, analitik yaklaşımli çözüm helisel dişli çark mekanizmalarında maksimum iletim oranı 5 alınmıştır. Buna göre tek kademe analitik yaklaşımli çözüm için iletim oranı, 2, 3, 4 ve 5 olmak üzere dört farklı değer için çözümler yapılmıştır.

Çizelge 4.4'de tek kademeli helisel dişli çark mekanizması için farklı iletim oranlarında elde edilen minimum malzeme hacmi değerlerinin değişimi görülmektedir. Tasarım işleminde malzeme olarak 16MnCr5 sembolü sementasyon çeliği seçilmiştir.

Çizelge 4.4. Analitik yaklaşımli çözüm, helisel dişli çark, tek kademe parametre ve değişkenleri

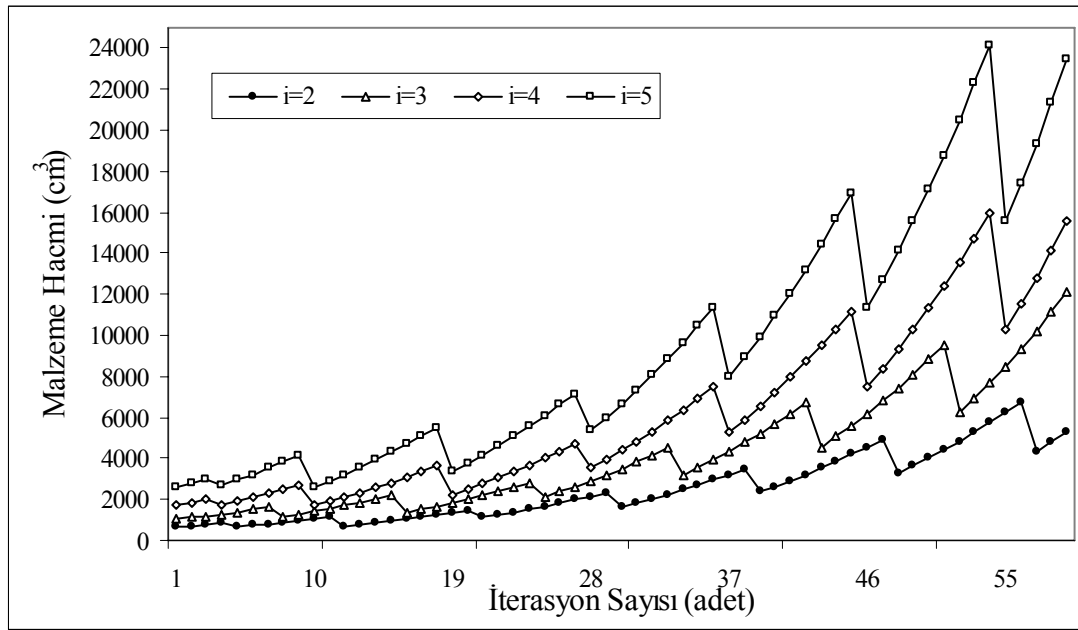
Güç (kW)	Giriş Devri (dv/dk)	Çıkış Devri (dv/dk)	İletim Oranı	Modül (mm)	Pinyon	Çark	Diş Geniş. (mm)	Eksenler Arası (mm)	Min. Malz. Hacmi (cm ³)
7.5	1800	360	5	2,25	23	115	45	155,25	2559,81
7.5	1800	450	4	2,25	23	92	45	129,38	1691,94
7.5	1800	600	3	2,25	24	72	45	108	1100,18
7.5	1800	900	2	2,5	22	44	50	82,5	660,38

Çizelge 4.4'de aynı malzeme, güç ve giriş devri için tek kademeli bir mekanizmanın farklı iletim oranlarında, modül, pinyon ve çark dişlisi, diş genişliği, eksenler arası mesafe ve minimum malzeme hacminin aldığı değerler görülmektedir. Çizelgede, tek kademeli helisel dişli mekanizması için küçük iletim oranlarında daha küçük malzeme hacminde tasarım elde edildiği görülmektedir.

Ayrıca düz dişli çarkların aynı şartlarında çözümü gerçekleştirilen helisel dişliler için elde edilen malzeme hacimleri değerlerinin, düz dişli çarklar için elde edilen değerlerden daha küçük olduğu da görülmektedir (Bkz. Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2).

Tek kademeli helisel dişli çark mekanizması, $i=2$ için analitik yaklaşımli çözüm programı çalıştırıldığında elde edilen dişli parametreleri ve çarkların boyutlandırılmasına ait tasarım sonuçları, tek kademeli mekanizma sonuç menüsünde verilmiştir (Ek 4).

Analitik yaklaşımli çözüm, helisel dişli çark, tek kademeli mekanizma, farklı iletim oranlarında elde edilen malzeme hacimlerinin (Bkz. Çizelge 4.4), iterasyona bağlı olarak elde edilişi ve değişimi ise Şekil 4.12’de görülmektedir.

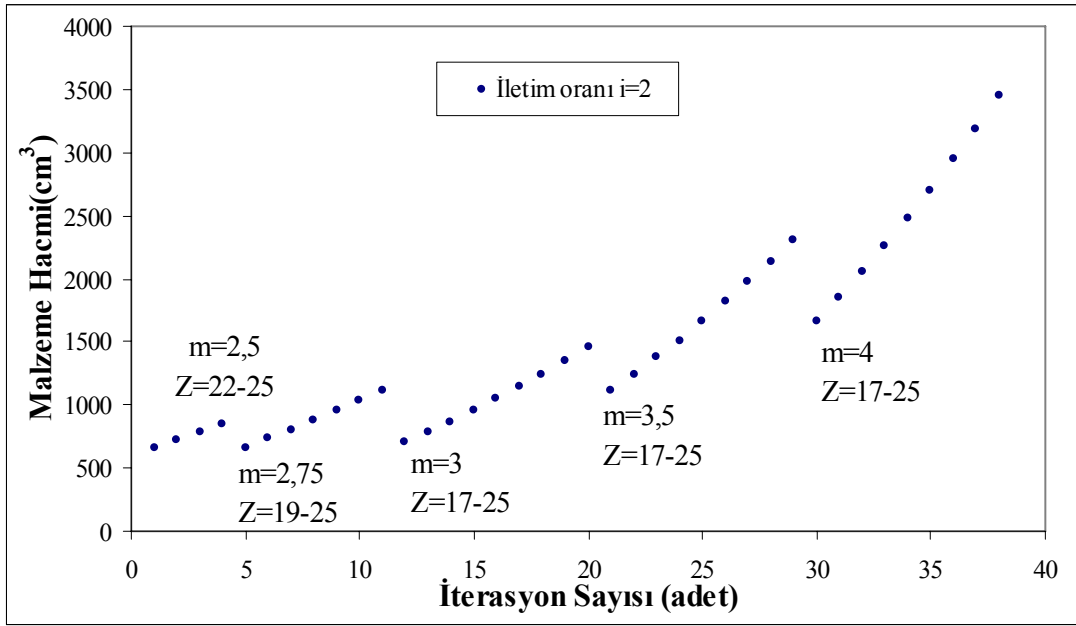


Şekil 4.12. Analitik çözüm, helisel dişli çark, tek kademe, farklı iletim oranlarında malzeme hacmi değişimi

Şekil 4.12’de verilen ve farklı iletim oranlarına göre “malzeme hacmi” değişimini gösteren grafikler, iterasyon sürecinde almış oldukları modül ve diş sayılarını ifade edecek şekilde çizdirilebilir. Buna göre $i=2$ için iterasyon sürecinde sınırlama fonksiyonlarını sağlayan modül ve diş sayısı kombinezonları ve “minimum malzeme hacmi” değerlerini gösteren grafik Şekil 4.13’de görülmektedir.

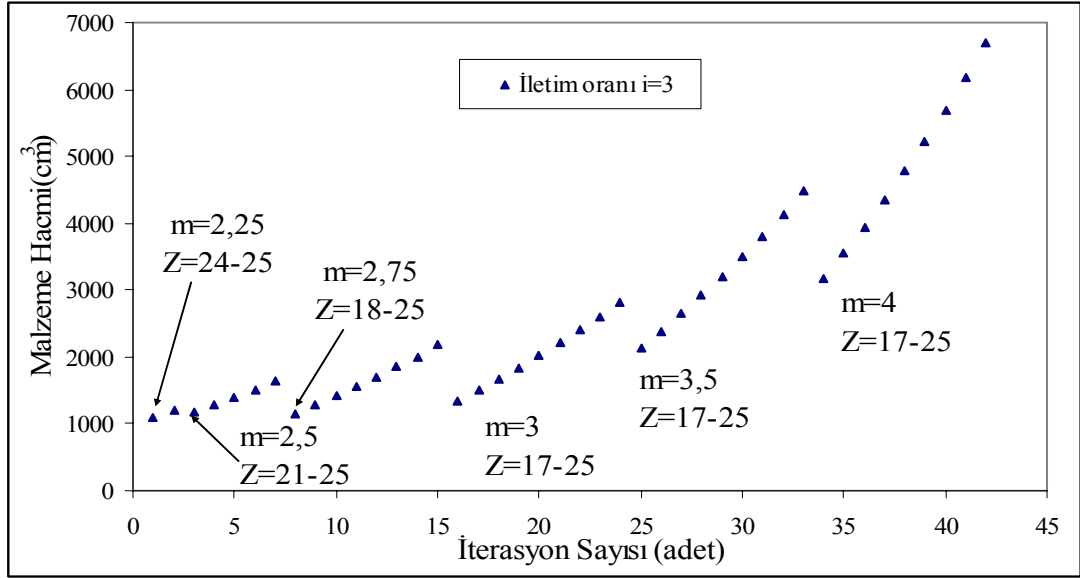
Grafikte görüldüğü gibi başlangıçtaki iterasyon döngüsünde alınan $m=2,5$ ve diş sayısı Z 22 ile 25 aralığındaki değerleri tek kademeli mekanizma olduğu için

sınırlama fonksiyonlarını sağlayan en küçük modül ve diş sayılarına karşılık gelen iterasyon işlemini ifade etmektedir. Bir sonraki veri serilerinde modül değeri artarak değişmekte ve elde edilen malzeme hacimleri de artmaktadır. Bu grafikte sınırlama fonksiyonlarını sağlayan ilk iterasyonun $m=2,5$ ile başlayıp, diş sayısı ise 22 ile minimum malzeme hacmi değerini aldığı görülmektedir.



Şekil 4.13. Analitik çözüm, helisel dişli çark, tek kademe, $i=2$ için malzeme hacmi iterasyon sürecindeki modül ve diş sayısı değişkenleri

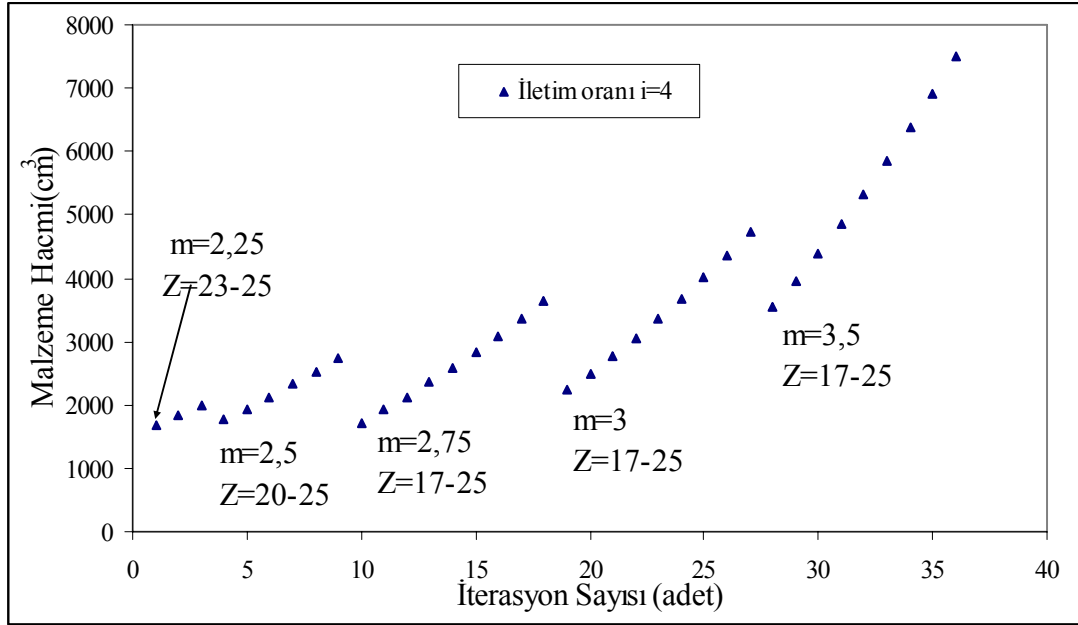
İleti oranı 3 için iterasyon sürecinde modül ve diş sayısı kombinezonları ve “malzeme hacmi” değerlerini gösteren grafik Şekil 4.14’de görülmektedir.



Şekil 4.14. Analitik çözüm, helisel dişli çark, tek kademe, $i=3$ için malzeme hacmi iterasyon sürecindeki modül ve diş sayısı değişkenleri

İletim oranı 3 için verilen grafikte (Bkz. Şekil 4.14), sınırlama fonksiyonlarını sağlayan ilk iterasyon sürecinde $m=2,25$ değerini alırken, bu modüle bağlı olarak diş sayısı 24 değerini alıp buna göre “minimum malzeme hacmi” değeri elde edilmiştir. Bir sonraki iterasyonda modül değeri artmakta olup diş sayısı ise ilk iterasyondaki diş sayısından daha düşük olan 21 değerinde sınırlama fonksiyonlarını sağlamaktadır. Grafikte sınırlama fonksiyonlarını sağlayan altı ayrı iterasyon için altı ayrı modül ve diş sayısı kombinezonları ve malzeme hacmi değerleri görülmektedir.

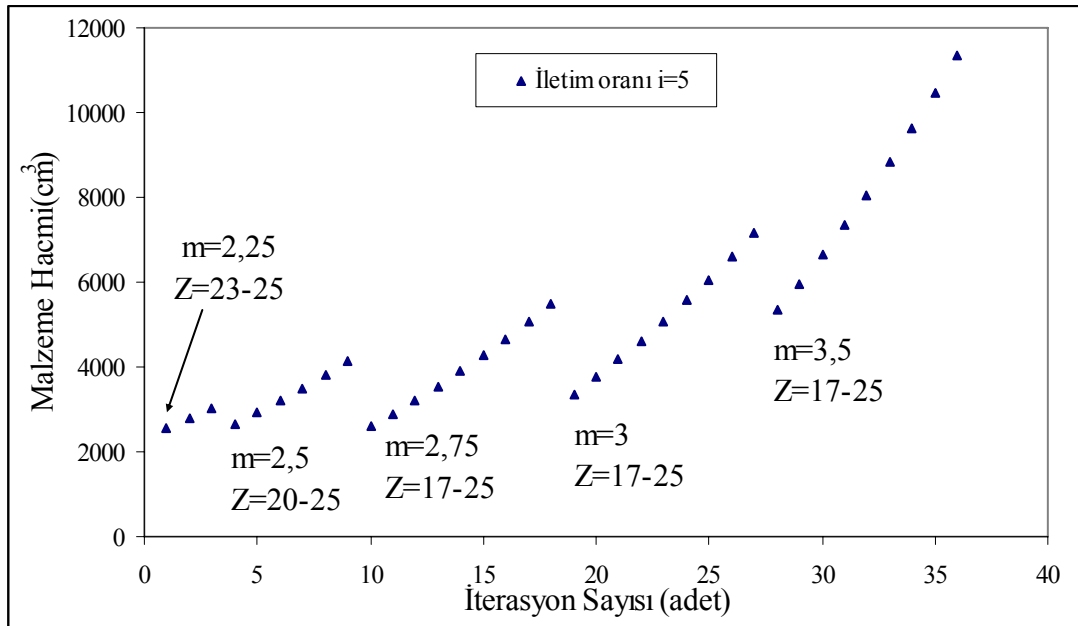
İletim oranı 4 için iterasyon sürecinde sınırlama fonksiyonlarını sağlayan modül ve diş sayısı kombinezonları ve “malzeme hacmi” değerlerini gösteren grafik Şekil 4.15’de görülmektedir.



Şekil 4.15. Analitik çözüm, helisel dişli çark, tek kademe, $i=4$ için malzeme hacmi iterasyon sürecindeki modül ve diş sayısı değişkenleri

Grafiğe göre, sınırlama fonksiyonlarını sağlayan ve minimum malzeme hacmini veren ilk iterasyonda $m=2,25$ ve diş sayısı ise $Z=23$ değerinde sonuç elde edilmektedir. Sonrasında ise modül değerleri artarak değişirken, diş sayısı ise gittikçe azalarak değişmekte ve $m=2,75$, $m=3$ ve $m=3,5$ değerleri için diş sayısı en alt limit olan 17 değerlerinde sınırlama fonksiyonlarını sağlayan uygun çözümler elde edilmektedir.

İletim oranı 5 için ise iterasyon sürecinde sınırlama fonksiyonlarını sağlayan modül ve diş sayısı kombinasyonları ve “malzeme hacmi” değerlerini gösteren grafik Şekil 4.16’da görülmektedir.



Şekil 4.16. Analitik yaklaşımlı çözüm, helisel dişli çark, tek kademe, $i=5$ için malzeme hacmi iterasyon sürecindeki modül ve diş sayısı değişkenleri

Bu grafiğe göre, sınırlama fonksiyonlarını sağlayan ve minimum malzeme hacmini veren ilk iterasyonda $m=2,25$ ve diş sayısı ise $Z=23$ değerinde sonuç elde edilmektedir. Sonraki iterasyon döngülerinde modül değerleri büyümekte ancak diş sayısı değişkeni ise alt sınırlarında, sınırlama fonksiyonlarını sağlayan çözümler elde edilmektedir.

4.2.6. Analitik yaklaşım, helisel dişli çark, iki kademeli mekanizma çözümü

Helisel dişli çarkların tek kademe analitik yaklaşımlı çözümünde maksimum iletim oranı 5 alındığından, iki kademeli mekanizma analitik çözüm için ise iletim oranları tek kademeden farklı olarak, 6, 11, 16 ve 21 değerleri olmak üzere dört farklı değer için çözümler yapılmıştır.

Çizelge 4.5'de iki kademeli helisel dişli mekanizması için farklı iletim oranlarında elde edilen değişkenler ve malzeme hacmi değerleri görülmektedir. Tasarım işleminde malzeme olarak 16MnCr5 sembolü sementasyon çeliği seçilmiştir.

Çizelge 4.5. Analitik yaklaşımlı çözüm, helisel dişli çark, iki kademe parametre ve değişkenleri

Güç (kW)	Giriş Devri (dv/dk)	Çıkış Devri (dv/dk)	İletim Oranı	Modül (mm)	Pinyon	Çark	Diş Geniş. (mm)	Eksenler Arası (mm)	Min. Malz. Hacmi (cm ³)
7.5	1800	85,7	21	2,75	17	88	55	144,38	11662,12
				4	22	89	80	222	
7.5	1800	112,5	16	2,25	23	101	45	139,5	8321,69
				3,5	25	91	70	203	
7.5	1800	163,6	11	2,25	23	87	45	123,75	5376,63
				3,5	24	69	70	162,75	
7.5	1800	300	6	2,75	18	45	55	86,6	2860,51
				3,5	20	48	70	119	

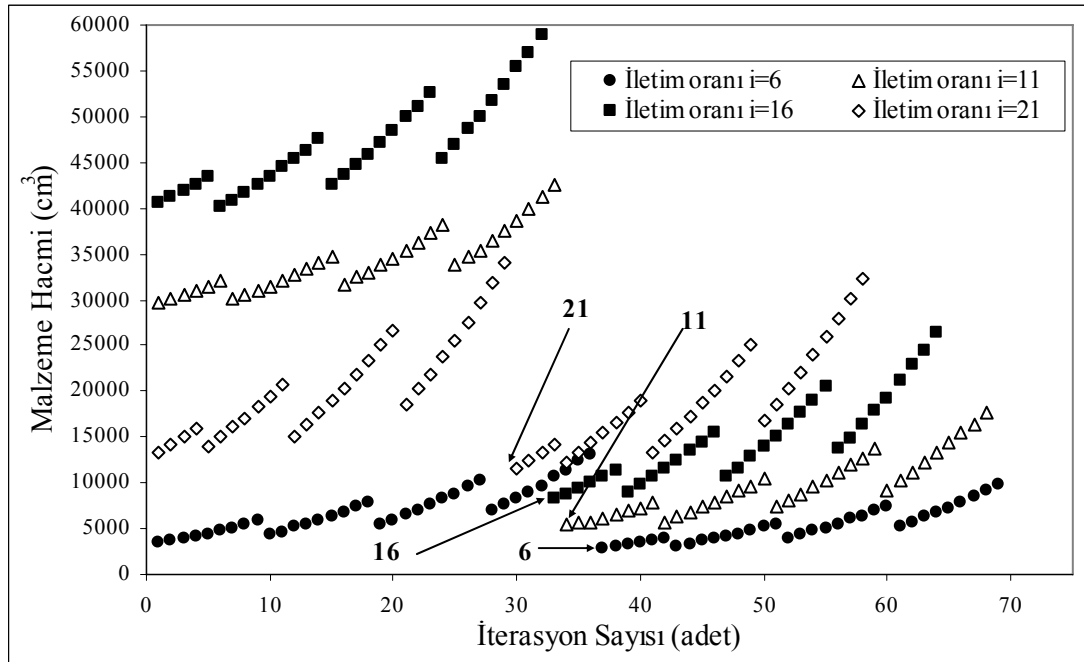
Çizelge 4.5’de aynı malzeme, güç ve giriş devri için iki kademeli bir mekanizmanın farklı iletim oranlarında, modül, pinyon ve çark dişlisi, diş genişliği, eksenler arası mesafe ve minimum malzeme hacminin aldığı değerler görülmektedir. Çizelgede, iki kademeli helisel dişli çark mekanizması tasarımında, küçük iletim oranlarında daha küçük malzeme hacmine sahip tasarım elde edildiği görülmektedir.

İki kademeli helisel dişli çark tasarımı için farklı iletim oranlarında elde edilen hacim değerlerinin iterasyona bağlı olarak değişimi ise Şekil 4.17’de verilmiştir.

Şekil 4.17’de verilen grafikte, iterasyon sayısının her iletim oranı için aynı olmaması ve büyük iterasyon sayılarından dolayı, grafikte iterasyon işleminin daha anlaşılır olması için, her iletim oranı için elde edilen “minimum malzeme hacmi” değerinin altında ve üstünde düzgün veri dotaları oluşturan modül ve diş sayısı kombinezonları dikkate alınarak veriler çizdirilmiştir.

Şekil 4.17’deki grafikte 6, 11, 16 ve 21 ile gösterilen noktalar, bu iletim oranlarında elde edilen “minimum malzeme hacmi” değerlerinin bulunduğu yeri ifade etmektedir. Burada belirtilmiş olan “malzeme hacmi” değerlerinden, iki kademeli

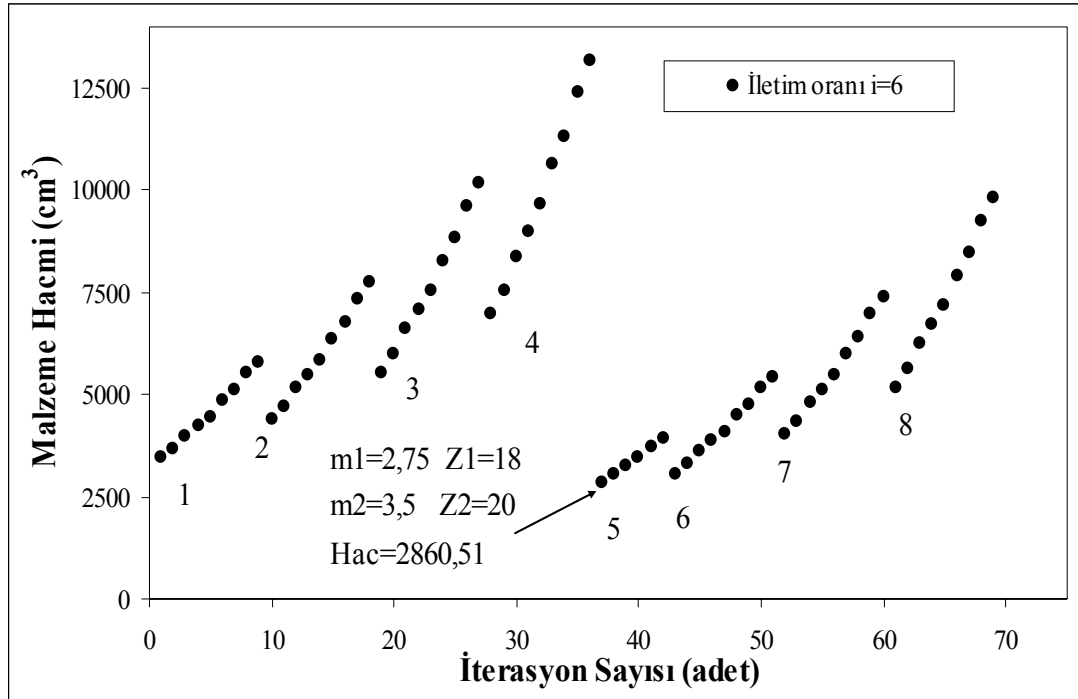
helisel dişli çark mekanizmalarında, küçük iletim oranlarında küçük hacimlerin elde edildiği görülmektedir.



Şekil 4.17. Analitik yaklaşımlı çözüm, helisel dişli çark, iki kademe, farklı iletim oranlarında malzeme hacmi değişimi

İki kademeli helisel dişli çark mekanizması, $i=6$ için analitik yaklaşımlı çözüm programı çalıştırıldığında elde edilen dişli parametreleri ve çarkların boyutlandırılmasına ait tasarım sonuçları iki kademeli mekanizma sonuç menüsünde verilmiştir (Ek 5).

Analitik yaklaşımlı çözüm ile iletim oranı 6 için elde edilen “malzeme hacmi” değişimi ve minimum malzeme hacmindeki modül ve diş sayısı değişkenleri Şekil 4.18’de görülmektedir.



Şekil 4.18. Analitik yaklaşımli çözüm, helisel dişli çark, iki kademe, $i=6$ için malzeme hacminin iterasyona göre değişimi ve minimum malzeme hacmi değişkenleri

Şekil 4.18'deki grafikte, iterasyon sayısının büyük olması nedeniyle, iletim oranı 6 için bulunan uygun çözümün 30 alt ve 30 üst aralığındaki iterasyon değerleri dikkate alınarak grafik çizdirilmiştir. Grafikte, ok ile gösterilen iterasyon döngüsü en düşük malzeme hacminin elde edildiği döngüyü ifade etmektedir. Bu grafikte 1 ile gösterilen iterasyon döngüsünde iletim oranları $i_1=2,5$ ve $i_2=2,4$ değerleri seçildikten sonra, birinci kademe için $m=2,5$ ve $Z=25$ değerleri seçilip, sonrasında ikinci kademe için $m=4$ ve Z ise 17 ile 25 aralığında tarama yapılarak elde edilen dokuz farklı malzeme hacmi değerlerini göstermektedir. 2 ile gösterilen döngüde ise sadece ikinci kademenin modülü değişip $m=4,5$ olmakta ve Z ise 17 ile 25 aralığında tarama yapılarak dokuz farklı malzeme hacmi değerleri elde edilmektedir. Bu işlem 4 ile gösterilen döngü sonuna kadar devam etmektedir. Grafikte 5 ile gösterilen döngünün birinci kademesindeki modül değeri, 1~4 döngülerinin birinci kademelerinde almış olduğu değerlerin bir üstünü ve uygun diş sayısını aldıktan sonra, 5, 6, 7, 8 döngülerinde ikinci kademenin modül değerleri değişmekte ve seçilen her modül için Z değerleri taranmaktadır.

Analitik yaklaşımlı çözüm helisel dişli çark, iki kademe $i=6$ için (Bkz. Şekil.4.18) verilen grafik ve anlatılanlar, grafikte verilen (Bkz. Şekil 4.17) diğer iletim oranları içinde benzer şekilde gerçekleşmekte ve iterasyonlar neticesinde “minimum malzeme hacmi” elde edilmiş olmaktadır.

4.3. Konik Dişli Çark Kademeleri İçin Analitik Yaklaşımlı Çözüm

Konik dişli çarkların analitik yaklaşımlı çözümü, düz ve helisel dişli çarklarda anlatıldığı gibi, mukavemet hesaplamalarında kullanılan genel formüllerden yararlanılarak “malzeme hacmi” amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. Sınırlama fonksiyonları ise dişli çark mekanizmasının mukavemet hesaplamalarına bağlı olan ve amaç fonksiyonunun sağlanmasında kullanılan eşitlikler şeklinde modellenmiştir.

Konik dişli çarklar, düz ve helis dişli çarkların tam tersine paralel olmayan, 90° den küçük, 90° den büyük ve 90° açı ile çalışan mekanizmalar olduğundan genellikle düz ve helis dişli mekanizmalarında olduğu gibi tek, iki ve üç kademe olarak konik dişli çark dizileri oluşturacak şekilde kullanılmazlar.

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 ve konik~helis şeklinde iki tip konik dişli çiftleri oluşturulmuş ve bu dişli mekanizmalarının çözüm işlemi gerçekleştirilmiştir.

4.3.1. Tasarım değişkenlerinin tanımlanması

Düz dişli çarklar için Bölüm 4.1.1’de anlatılan ifadeler, konik dişli çarkların analitik yaklaşımla çözümü için gerekli olan tasarım değişkenlerinin belirlenmesinde de geçerlidir. Buna göre “Eş. 4.1”, “Eş. 4.2” konik dişli çarklar için de geçerlidir. Ancak “Eş. 4.3” de ifade edilen pinyon diş sayısı değişkeni konik dişli çarklarda farklıdır. Modül değeri konik dişli çark çiftlerinde, birinci kademedeki konik dişli mukavemet hesaplamalarında “Eş.4.2” de verilen ifade sınırları içerisinde 0,1 artışla iterasyon işleminde dikkate alınmıştır.

Konik dişli çarklarda dikkate alınan pinyon diş sayısı, $14 \leq Z_1 \leq 30$ aralığında değer almaktadır.

4.3.2. Çalışma şartı ve sabit değişkenlerin tanımlanması

Konik dişli çarklarda geçerli olan çalışma şartı ve sabit değişken değerleri için, düz dişli çarklarda verilen (Bkz. Çizelge 4.1) ifadeler geçerlidir. Ancak iletim oranı değerleri ve genişlik faktörü değerleri düz dişli çarklardan farklı olmaktadır.

Konik dişli çarklarda, konik~düz ve konik~helis dişli çiftlerinin her ikisi içinde $i=30$ olarak bir tek iletim oranı değeri dikkate alınmış ve çözüm yapılmıştır. Genişlik faktörü (φ_m) konik dişli çarklarda $10 \leq \varphi_m \leq 40$ aralığında dikkate alınmıştır

4.3.3. Sınırlama fonksiyonlarının oluşturulması

Konik dişli çarkların sınırlama fonksiyonlarının oluşturulması, düz ve helisel dişli çarkların sınırlama fonksiyonları ile benzerlik göstermektedir. Buna göre düz ve helisel dişli çarklarda kullanılan “Eş. 4.3”, “Eş. 4.4” ve “Eş. 4.5” konik dişli çarkların analitik çözümünde de geçerlidir.

Yüzey genişliği, eğilme dayanımı ve aşınma dayanımı sınırlama fonksiyonlarının oluşturulmasında ise, “Eş. 3.8”, “Eş. 3.35” ve “Eş. 3.37” de verilen yüzey genişliği, eğilme dayanımı ve aşınma dayanımı mukavemet eşitlikleri kullanılmıştır. Bunlara göre iki kademeli bir konik dişli çark çifti için sınırlama fonksiyonları:

$$g_1(x) = K_d K_{fe} K_c Ft_1 - \varepsilon b_1 m_{o1} (0,55 \sigma_K) \leq 0 \quad [4.27]$$

$$g_2(x) = K_d K_{fe} K_c Ft_2 - \varepsilon b_2 m_{o2} (0,55 \sigma_K) \leq 0 \quad [4.28]$$

$$g_3(x) = K_{s1} F_{t1} \left(\frac{Z_{e2} + Z_{e1}}{Z_{e1}} \right) - b_1 m_{o1} Z_{e2} (P_{em})^2 \leq 0 \quad [4.29]$$

$$g_4(x) = K_{s1} F_{t1} \left(\frac{Z_{e4} + Z_{e3}}{Z_{e3}} \right) - b_2 m_{o2} Z_{e4} (P_{em})^2 \leq 0 \quad [4.30]$$

$$g_5(x) = ((10 m_{o1}) - b_1) \leq 0 \quad [4.31]$$

$$g_6(x) = (b_1 - (40 m_{o1})) \leq 0 \quad [4.32]$$

$$g_7(x) = ((10 m_{o2}) - b_2) \leq 0 \quad [4.33]$$

$$g_8(x) = (b_2 - (40 m_{o2})) \leq 0 \quad [4.34]$$

şeklinde elde edilir.

4.3.4. Amaç fonksiyonunun oluşturulması

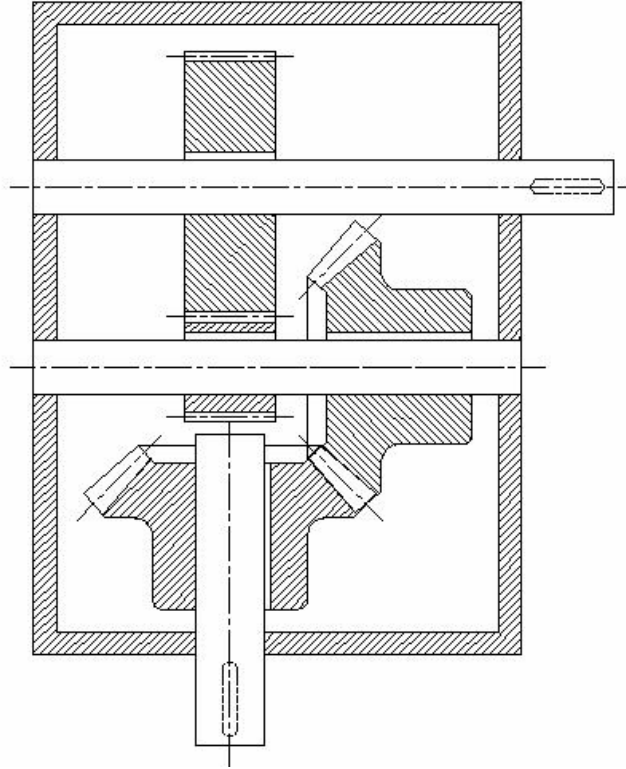
Konik dişli çarklarda amaç fonksiyonunun oluşturulması, düz dişli çarklarda amaç fonksiyonunun oluşturulması Bölüm 4.1.4’de anlatıldığı gibi gerçekleştirilmiştir. Ancak düz dişli çarklardan farklı olarak konik dişli çarklarda standart modül m_a ve hesaplamalarda kullanılan ortalama modül m_o olmak üzere iki farklı modül değeri olduğundan, konik dişli çarklarda amaç fonksiyonu, ortalama modül cinsinden oluşturulur. Ancak standart modül m_a ortalama modüle bağlı olarak bulunur.

Buna göre konik~düz ve konik~helis şeklinde iki kademededen oluşan konik dişli çark çiftlerinin “malzeme hacmi” amaç fonksiyonu, modül, diş sayısı ve diş genişliğinin bir fonksiyonu olmak üzere:

$$F_{\min} = [0,785 ((m_{o1} Z_1)^2 + (m_{o1} Z_2)^2) b_1 + 0,785 ((m_{o2} Z_3)^2 + (m_{o2} Z_4)^2) b_2] \quad [4.35]$$

şeklinde elde edilir.

Konik dişli çarklar yukarıda anlatılan mukavemet esaslarına göre, iki kademeli mekanizma, analitik yaklaşımlı çözüm olarak “malzeme hacmi” amaç fonksiyonu için çözülmüştür. Şekil 4.19’da iki kademeli bir konik dişli çark mekanizması görülmektedir.



Şekil 4.19. İki kademeli konik dişli çark mekanizması.

4.3.5. Analitik yaklaşım, konik~düz ve konik~helis dişli çiftleri için çözüm

Konik dişli çarkların analitik yaklaşımlı çözümü, düz ve helis dişli çarklar için kullanılan birleşik tasarım programı (Ek 1) ile gerçekleştirilmiştir. Konik dişli çarklarda tek kademedeki maksimum iletim oranı 7’ye kadar alınabilmektedir (57). Buna göre konik dişli çark çiftleri, düz ve helis dişli çark mekanizmalarının iletim oranlarından farklı olarak, $i=30$ iletim oranı için analitik yaklaşımlı çözümleri yapılmıştır. Konik dişli çark mekanizmaları iki ayrı mekanizma olarak dikkate alındığından, bu dişli çiftleri kendi aralarında iletim oranı 30 için çözümleri elde edilip karşılaştırılmış, ayrıca düz ve helis dişlilerde olduğu gibi her konik çifti için

farklı iletim oranlarında çözümler yapılmamıştır. Çünkü aynı mekanizma için, küçük iletim oranlarında, küçük malzeme hacimlerine sahip tasarımlar elde edildiği (Bkz. Bölüm 4.1, Bölüm 4.2) yapılan çözümlerden görülmektedir.

iki kademeli konik~düz ve konik~helis dişli mekanizması için elde edilen değişkenler ve minimum malzeme hacmi değerleri Çizelge 4.6’da görülmektedir.

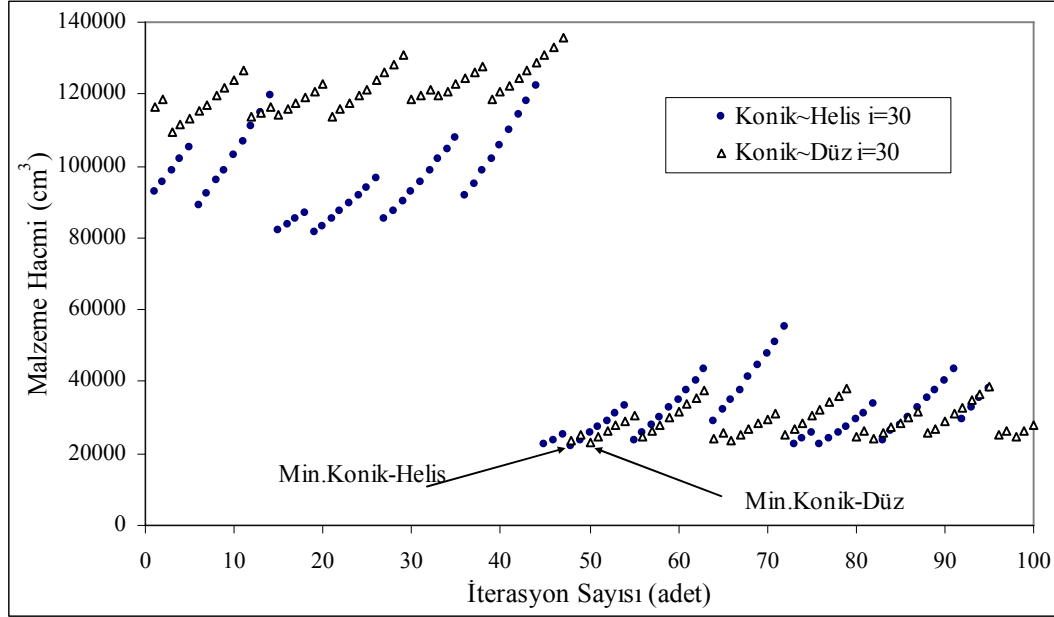
Çizelge 4.6. Analitik yaklaşımli çözüm, konik~düz ve konik~helis dişli mekanizması, iki kademe parametre ve değişkenleri

Konik Tipi	Güç (kW)	Giriş Devri (dv/dk)	Çıkış Devri (dv/dk)	İletim Oranı	Modül (mm)	Pinyon	Çark	Diş Geniş. (mm)	Eksenler Arası (mm)	Min. Malz. Hacmi (cm ³)
Kon	7.5	1800	60	30	2,59	37	266	25	376,75	23176,33
Düz					5	20	83	90	257	
Kon.	7.5	1800	60	30	2,61	38	217	25	464,75	22068,76
Hel.					4,5	19	100	90	267,75	

Çizelge 4.6’ya göre aynı girdi parametrelerine bağlı olarak konik dişli çiftlerinin malzeme hacimleri incelendiğinde, konik~helis dişli çiftinin malzeme hacmi değerinin, konik~düz dişli çifti malzeme hacmi değerinden küçük olduğu görülmektedir. Ayrıca modül, pinyon~çark diş sayıları ve diş genişliği değerleri çizelgede görülmektedir.

Analitik yaklaşımli çözümde, düz dişli ile helis dişli mekanizmaları incelendiğinde, helis dişli mekanizmalarının düz dişli mekanizmalarından daha küçük hacimde tasarım değerlerine sahip olduğu gerçeğine uygun olarak yukarıda verilen konik dişli çifti tasarım sonuçları da bu kabulü doğrulamaktadır.

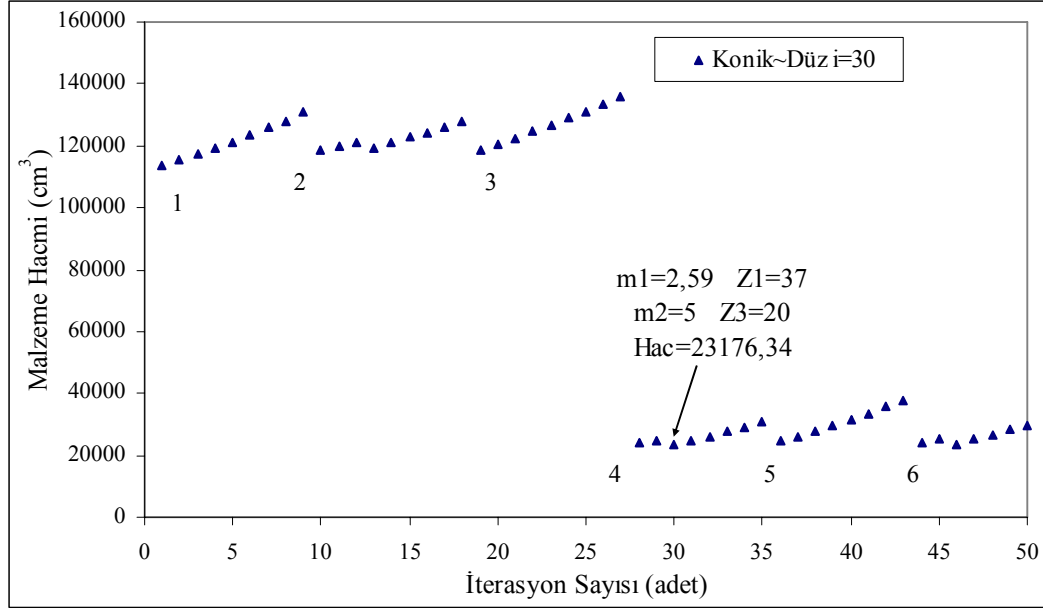
Konik~düz ve konik~helis dişli çiftleri, analitik yaklaşımli çözüm, malzeme hacimlerinin iterasyona bağlı olarak elde edilişi ve değişimi Şekil 4.20’de görülmektedir. Grafikte, konik dişli çiftleri için elde edilen uygun “malzeme hacmi” değerinin altında ve üstünde yaklaşık 50’şer veri dataları dikkate alınarak grafik çizdirilmiştir.



Şekil 4.20. Analitik yaklaşımlı çözüm, konik~düz ve konik~helis dişli çiftleri için malzeme hacmi değişimi

Grafikte konik dişli çiftlerinin iterasyona göre almış oldukları en uygun malzeme değerleri ok'lar ile gösterilmiştir. Konik~düz dişli çifti $i=30$ için analitik yaklaşımlı çözüm programı çalıştırıldığında elde edilen dişli parametreleri ve çarkların boyutlandırılmasına ait tasarım sonuçları konik dişli çark iki kademeli mekanizma sonuç menüsünde verilmiştir (Ek 6).

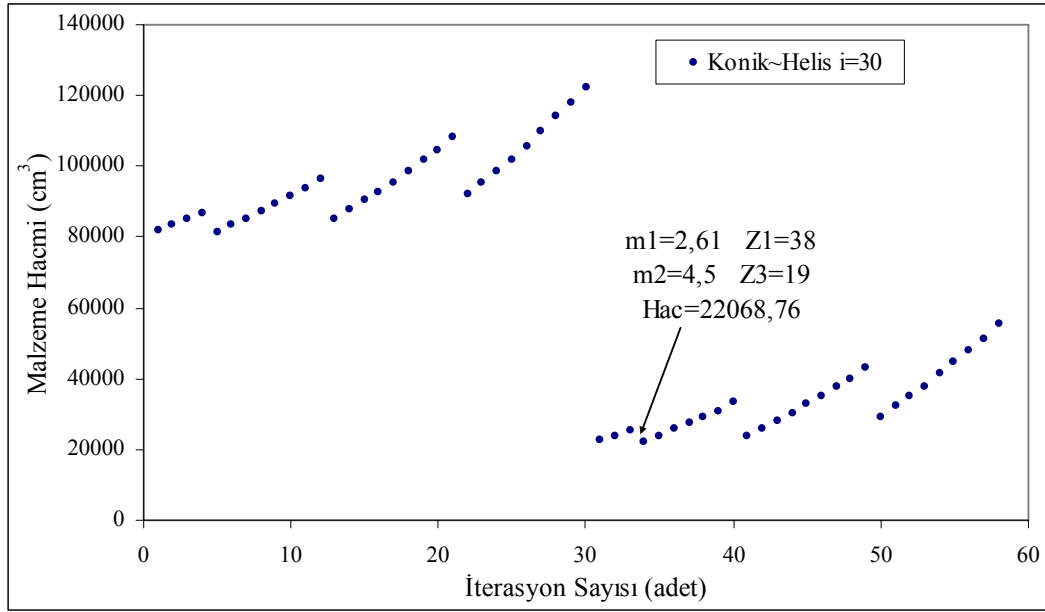
Analitik yaklaşımlı çözüm, konik~düz dişli çifti $i=30$ için elde edilen "malzeme hacmi" değişimi ve en düşük malzeme hacmindeki modül ve diş sayısı değişkenleri Şekil 4.21'de görülmektedir.



Şekil 4.21. Analitik yaklaşımlı çözüm, konik~düz dişli çifti $i=30$ için malzeme hacminin iterasyona göre değişimi ve minimum malzeme hacmi değişkenleri

Şekil 4.21'deki grafikte, ok ile gösterilen iterasyon döngüsü en düşük malzeme hacminin elde edildiği döngüyü ifade etmektedir. Bu grafikte 1 ile gösterilen iterasyon döngüsünde iletim oranları $i_1=6,7$ ve $i_2=4,48$ değerleri seçildikten sonra, birinci kademe için $m=5,71$ ve $Z=39$ değerleri seçilip, sonrasında ikinci kademe için $m=5,5$ ve Z ise 18 ile 25 aralığında tarama yapılarak elde edilen sekiz farklı malzeme hacmi değerlerini göstermektedir. 2 ile gösterilen döngüde ise birinci kademe için $m=5,71$ ve $Z=40$ değerleri seçilip, sonrasında ikinci kademe için $m=4,5$ ve Z 24 ve 25 ve $m=5$ için 20 ile 25 aralığında tarama yapılarak elde edilen sekiz farklı malzeme hacmi değerlerini göstermektedir. 4 ile gösterilen döngüde ise iletim oranları $i_1=7,2$ ve $i_2=4,17$ değerleri seçildikten sonra, birinci kademe için $m=2,59$ ve $Z=37$ değerleri seçilip, sonrasında ikinci kademe için $m=4,5$ ve Z 24 ve 25 ve $m=5$ için 20 ile 25 aralığında tarama yapılarak elde edilen sekiz farklı malzeme hacmi değerlerini göstermektedir. 5 ve 6 ile gösterilen döngülerde birinci kademeden almış olduğu değerler değişmeden ikinci kademe için modül ve diş sayısı değişkenleri taranarak iterasyon gerçekleşmektedir.

Konik~düz dişli çifti için elde edilen grafik ve anlatılanlar (Bkz. Şekil 4.21) benzer şekilde konik~helis dişli çifti içinde geçerli olup, bu dişli çifti için elde edilen grafik Şekil 4.22'de görülmektedir.



Şekil 4.22. Analitik yaklaşımli çözüm, konik~helis dişli çifti $i=30$ için malzeme hacminin iterasyona göre değişimi ve minimum malzeme hacmi değişkenleri

Bu grafikte de iterasyona bağlı olarak sınırlama fonksiyonlarını sağlayan en uygun malzeme hacminin elde edildiği nokta ve değerleri görülmektedir. Burada konik dişli çiftinin birinci kademesi $i=5,7$ ve ikinci kademesi $i=5,26$ iletim oranları değerlerini almaktadır.

5. DİŞLİ ÇARKLARIN GA İLE MODELLENMESİ

5.1. Amaç Fonksiyonunun Oluşturulması

Dişli çark mekanizmalarının GA ile çözümü için gerekli olan amaç fonksiyonu Bölüm 4’de anlatılan (Bkz. Bölüm 4.1.4, 4.2.4 ve 4.3.4) dişli çark tiplerinin amaç fonksiyonlarının oluşturulması başlıkları altında anlatılan ifadeler ve verilen eşitlikler, GA ile çözüm işleminde de amaç fonksiyonu olarak dikkate alınmıştır.

Amaç fonksiyonu, GA’nın çözüm sürecinde uygunluk fonksiyonu olarak değerlendirme ve seçim işleminde kullanılan bir fonksiyon olarak dikkate alınmaktadır.

GA ile çözüm işleminde, “Eş. 4.14” , “Eş. 4.26” ve “Eş. 4.35” de verilen eşitlikler, düz, helis ve konik dişli mekanizmalarının çözüm işleminde amaç fonksiyonu olarak dikkate alınmıştır.

5.2. Sınırlama Fonksiyonlarının Belirlenmesi

Sınırlama fonksiyonlarının belirlenmesi GA için büyük önem taşımaktadır. GA’ların çalışma sistemi, sınırlama fonksiyonu olarak tanımlanan değişkenlere ve fonksiyonlara bağlı olduğundan, bunların uygun bir şekilde belirlenmesi elde edilecek sonucu olumlu veya olumsuz olarak etkilemektedir.

GA’lar ilk yıllarda sınırsız optimizasyon problemlerine uygulanmışlardır. Bu problemler sınırlama fonksiyonları içermeyen sadece değişken sınırlamalarına bağlı olan ve bunlara göre sonuç elde edilen problemler olarak literatürde yer almıştır. Ancak sonraki yıllarda GA’lar değişkenlerin dışında sınırlamalara sahip problemlere de uygulanmaya başlanmıştır. Bu problemlerde kullanılan sınırlamalar fonksiyon şeklinde tanımlanmış ve GA’lar amaç fonksiyonuna bağlı olarak uygun sonucu bulma sürecinde bu sınırlamaları da dikkate alarak işlem görmüşlerdir.

Dişli çark mekanizmalarının tasarım işlemi de yapısı gereği değişken sınırlamalarının dışında, sınırlama fonksiyonları oluşturacak sınırlamalara sahiptir. Bu sınırlamalar dişli çarkların mukavemet hesaplamalarına dayanan temel eşitlikler olup, bunlar ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır (Bkz. Bölüm 3).

Ancak GA'lar dişli çarkların mukavemet esaslarına dayanan bu sınırlamaları doğrudan kullanması mümkün olmadığından, bunların fonksiyon şeklinde GA'nın kullanabileceği bir yapıya dönüştürülmesi gerekmektedir. Dişli çarkların bu sınırlamaları, dişli çark tipine bağlı olarak sınırlama fonksiyonları şeklinde tanımlanmış ve analitik yaklaşımlı çözümde kullanılan bu sınırlama fonksiyonları GA ile çözüm işleminde de kullanılmıştır (Bkz. Bölüm 4.1.3, 4.2.3, 4.3.3).

5.3. Değişkenlerin Tanımlanması Ve Sınır Değerleri

Analitik yaklaşımlı çözüm işleminde olduğu gibi GA ile çözüm işleminde de modül, diş sayısı (pinyon) ve diş genişliği değişkenler olarak dikkate alınmıştır. Ancak dişli çark mekanizmalarının tipine göre bazı değişkenlerin (pinyon diş sayısı) sınır değerleri de farklı olmaktadır.

Dişli çark mekanizmasına bağlı olarak modül, diş sayısı ve diş genişliği değişkenlerinin hangi sınırlılık değerleri içerisinde tanımlandığı Bölüm 4'de anlatılmıştır.

Düz dişli çarklar için Bölüm 4.1.1, helisel dişli çarklar için Bölüm 4.2.1 ve konik dişli çarklar için Bölüm 4.3.1'de, kullanılan değişkenlerin farklılıkları ve sınır değerleri verilmiş olup, burada anlatılanlar GA ile düz, helisel ve konik dişli mekanizmalarının modellenmesi ve çözüm işleminde de kullanılmıştır.

Ancak analitik yaklaşımlı çözüm işleminde mukavemet hesaplamalarına ve sınırlama fonksiyonlarına bağlı olarak değer alan diş genişliği ve ikinci kademelerdeki diş sayısı, GA ile çözüm işleminde GA'nın yapısı gereği sınırlılıklara bağlı olarak

tanımlanması gerekmektedir. Dişli çark tipine ve iletim oranlarına göre bu değişkenlerin almış olduğu sınır değerler Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. GA için, diş genişliği, pinyon ve çark diş sayılarının kademe ve iletim oranlarına göre aldıkları sınır değerler

Dişli Tipi	Kademe Sayısı	İletim oranı	Diş Genişliği	Pinyon Diş Sayısı	Çark Diş Sayısı
Düz Dişli Çark Kademeleri	Tek Kademe	$i = 2$	$15 \leq b \leq 45$	$17 \leq Z_1 \leq 24$	–
		$i = 3$	"	"	–
		$i = 4$	"	"	–
		$i = 5$	"	"	–
	İki Kademe	$i = 6$	$40 \leq b \leq 70$	"	$35 \leq Z_1 \leq 145$
		$i = 11$	$18 \leq b \leq 80$	"	"
		$i = 16$	$18 \leq b \leq 80$	"	"
		$i = 21$	$18 \leq b \leq 80$	"	"
Helisel Dişli Çark Kademeleri	Tek Kademe	$i = 2$	$15 \leq b \leq 50$	"	–
		$i = 3$	$15 \leq b \leq 50$	"	–
		$i = 4$	$15 \leq b \leq 50$	"	–
		$i = 5$	$15 \leq b \leq 50$	"	–
	İki Kademe	$i = 6$	$40 \leq b \leq 70$	"	$35 \leq Z_1 \leq 145$
		$i = 11$	$18 \leq b \leq 80$	"	"
		$i = 16$	$18 \leq b \leq 80$	"	"
		$i = 21$	$18 \leq b \leq 80$	"	"
Konik Dişli Çiftleri	Konik ~Düz	$i = 30$	$18 \leq b \leq 80$	"	"
	Konik ~Helis	$i = 30$	$18 \leq b \leq 80$	"	"

5.4. Düz Dişli Çarkların GA İçin Kodlanması

GA'lar anlatıldığı gibi (Bkz. Bölüm 3) değişkenlerin doğrudan kendileri ile değil, onları temsil eden kromozom dizilerinin kullanılması ile çalışırlar. Çalışmada kodlama sistemi olarak 2'lik sayı sisteminde kodlama dikkate alınmıştır.

Bu amaçla dişli çark mekanizmalarının GA ile çözümü için dikkate alınan değişkenler 2'lik sayı sisteminde kodlanmış ve GA'nın kullanacağı dizi yapısı olan kromozom yapısı bu kodlamalar ile elde edilmiştir.

GA ile çözüm işleminde dikkate alınan değişkenler (Bkz. Bölüm 5.3) modül, diş sayısı ve diş genişliği parametreleridir. Bu parametrelerin kodlama işlemi aşağıdaki bölümlerde açıklanmıştır.

5.4.1. Modül değişkeninin GA için kodlanması

GA ile düz dişli çarkların çözüm işleminde kullanılacak modül değişkeni, Bölüm 4.1.1'de verilen modül alt ve üst sınırları arasında olmak üzere 2'lik sistemde kodlanmıştır. Burada verilen 1 ile 50 aralığındaki 31 farklı modül değerinin kodlanması için 5 bit'lik bir kodlama dizisi kullanılmıştır.

Fakat, analitik yaklaşımlı çözüm işleminde elde edilen modül değerlerine bakılmış ve 5,5 modülden daha büyük modül değerlerinin iterasyon sürecinde kullanılmaması ve GA çözüm işleminin daha kısa zaman alması için modül değişkeni 1 ile 5,5 modül değerleri arasında olmak üzere dikkate alınmıştır.

Bu nedenle, 1 ile 50 aralığında 5 bit olarak kodlama yapıları oluşturulan modül değeri, yukarıda bahsi geçen sebeplerden dolayı 4 bit olarak program aşamasında dikkate alınmıştır. Çizelge 5.2'de 4 bit olarak tanımlanan modül değişkenleri ve kodlama yapıları görülmektedir.

Çizelge 5.2. GA, düz dişli çark, modül değişkenleri ve kodlama yapıları

Modül	10'luk Kod	2'lik Kod
1	0	0000
1,125	1	0001
1,25	2	0010
1,375	3	0011
1,5	4	0100
1,75	5	0101
2	6	0110
2,25	7	0111
2,5	8	1000
2,75	9	1001
3	10	1010
3,5	11	1011
4	12	1100
4,5	13	1101
5	14	1110
5,5	15	1111

5.4.2. Diş sayısı değişkeninin GA için kodlanması

GA için diş sayısının kodlanması işlemi Bölüm 4.1.1'de anlatılan ifadeler gereği yapılmıştır. Analitik yaklaşımlı çözümde, literatürde geçen ve yaygın olarak kullanılan, pinyon diş sayısının 17 ile 25 diş aralığında alınması kabulü ile çözüm işlemi gerçekleştirilmiştir. GA ile çözüm işleminde ise her bir değişkenin kodlama işlemi, değişkenin alt ve üst sınırlarına, artış aralığının sürekli olması veya olmamasına ve 2'lik kodlama yapısının değişkenin üst sınırını tam olarak kapsamasına bağlı olarak farklılık oluşturmaktadır.

Bu nedenle analitik yaklaşımlı çözüm işleminde dikkate alınan 17 ile 25 aralığındaki diş sayısı değişkeni, 2'lik kodlama yapısında 3 bit'lik dizi uzunluğu ile tam olarak ifade edilememektedir. Bunu sağlamak için dizi uzunluğu 4 bit alınabilir ama bu şekilde ise 17 ile 25 aralığında dokuz adet tamsayı tanımlama şeklinde verilen diş

sayısı, verilen aralık dışında diş sayılarını da kapsayacaktır. Bu ise GA'nın performansını ve çalışma süresini olumsuz olarak etkilemektedir.

Bu olumsuzluklardan dolayı GA ile çözüm işleminde, diş sayısı değişkeni 17 ile 24 aralığında tamsayı tanımla olarak dikkate alınmış ve dizi yapısı ise 3 bit uzunluğunda oluşturulmuştur. GA ile 25 dişe sahip pinyon dişlisi çözüm işleminde ihmal edilmiş olmakta fakat diş sayısının bu şekilde tanımlanması ve kodlanması ile pinyon diş sayısı olarak verilen aralık değerlerinin dışında arama yapması ve zaman kaybetmesi önlenmiş ve çözüm işlemi hızlandırılmıştır. Çizelge 5.3'de 3 bit olarak tanımlanan pinyon diş sayısı değişkeni ve kodlama yapıları görülmektedir.

Çizelge 5.3. GA, düz dişli çark, pinyon diş sayısı değişkeni ve kodlama yapısı

Pinyon Diş Sayısı	10'luk Kod	2'lik Kod		
17	0	0	0	0
18	1	0	0	1
19	2	0	1	0
20	3	0	1	1
21	4	1	0	0
22	5	1	0	1
23	6	1	1	0
24	7	1	1	1

Tek kademeli mekanizmalar için pinyon ve çark dişlilerinden sadece pinyon dişlisinin 2'lik sistemde kodlanması dişli çarkın GA çözümü için yeterli olmaktadır. Çünkü çark dişlisinin diş sayısı, sistemim iletim oranı ve GA ile elde edilen pinyon dişlisi diş sayısından çıkarılmaktadır.

Ancak iki kademeli mekanizmalarda, sadece pinyon diş sayısının dizi yapısı şeklinde kodlanması yeterli olmamaktadır. Bu nedenle pinyon diş sayısının GA için kodlanması ile birlikte çark dişlisinin de GA için 2'lik sistemde dizi yapısında kodlanması gerekmektedir. Çark dişlisi, iki kademe için verilen sınır değerler arasında (Bkz. Çizelge 5.1) 2'lik sayı sisteminde kodlanmıştır.

Çark dişlisinin $35 \leq Z_2 \leq 145$ aralığında kodlama işleminde kaç bit uzunluğunda dizi oluşturacağı, oluşturulan bu dizi ile elde edilen değerlerin 2'lik sistemden gerçek değerlerine nasıl dönüştürüleceği, Bölüm 3.1.4'de anlatılan ifadeler ve verilen eşitlikler ile gerçekleştirilmiştir.

Çark dişlisi bu sınır değerleri arasında 7 bit uzunluğunda dizi olarak kodlanmış ve tanımlanmıştır. Çizelge 5.4'de 7 bit olarak tanımlanan çark dişlisi diş sayısı değişkeni ve kodlama yapısı görülmektedir.

Çizelge 5.4. GA, düz dişli çark, çark dişlisi diş sayısı değişkeni ve kodlama yapısı

Çark Dişlisi Diş Sayısı	2'lik Kodlama						
35	0	1	0	0	0	1	1
36	0	1	0	0	1	0	0
37	0	1	0	0	1	0	1
....
....
....
144	1	1	0	1	1	0	1
145	1	1	0	1	1	1	0

5.4.3. Diş genişliği değişkeninin GA için kodlanması

Analitik yaklaşımli çözümde, “Eş. 3.8” ve Çizelge 4.1'de verilen genişlik faktörü değerlerine bağlı olarak elde edilen diş genişliği, GA ile çözüm işleminde alması mümkün olan değer aralıkları olarak 2'lik sistemde kodlanmıştır. Diş genişliği dizi kodlamaları programda uygunluk fonksiyonu ve sınırlama fonksiyonlarında kullanılırken gerçek değerlerine dönüştürülüp, “Eş. 3.8” ve Çizelge 4.1'de verilen genişlik faktörü değerleri ile oluşturulan genişlik faktörü sınırlama fonksiyonlarını sağlayıp sağlamadıkları kontrol edilmiştir.

Diş genişliği değeri, analitik çözümden elde edilen değerlerde dikkate alınıp, alması muhtemel olan sınır değerler olarak, kademeler için verilen (Bkz. Çizelge 5.1) sınır değerler aralığında, GA ile çözüm işleminde tanımlanmıştır.

Diş genişliğinin sınır değerler aralığında kodlama işleminde kaç bit uzunluğunda dizi oluşturacağı, 2'lik kodlama sisteminden gerçek değerlerine nasıl dönüştürüleceği, anlatılan ifadeler ve verilen eşitlikler ile gerçekleştirilmiştir (Bkz. Bölüm 3.1.4).

Diş genişliği verilen sınır değerler arasında 5 bit uzunluğunda dizi olarak kodlanmış ve tanımlanmıştır.

5.4.4. Düz dişli çark kromozom yapısının GA için oluşturulması

GA'lar işleyiş yapısı gereği, değişkenleri diziler şeklinde tanımlanmış değerler ve bu dizilerin bir araya getirilmesi ile elde edilen ve GA'nın tüm aşamalarında kullanılan kromozom yapısını kullanarak işlem görür. GA çözüm sürecinde değişkenlerden oluşan kromozom yapısı, ilgili problemin mümkün tüm çözümlerini oluşturur ve sınırlama ve uygunluk fonksiyonlarının değerlendirilmesi bu kromozom yapısından elde edilen değerler ile gerçekleştirilir.

Düz dişli çarkların GA ile çözümü için gerekli olan kromozom yapısının oluşturulmasında kullanılan değişkenler (Bkz. Bölüm 5.4.1, 5.4.2, 5.4.3) modül, diş sayısı ve diş genişliği değişkenleri olup, bunların bir araya gelmesi ile kromozom yapısı oluşturulmuştur.

GA ile iki kademeli düz dişli çarkların çözümü için gerekli olan değişkenlerin kodlanması ve dizi uzunlukları Çizelge 5.5'de verilmiştir. Kromozom yapısının oluşturulması ve dizi uzunluğu ise Çizelge 5.6'de verilmiştir.

Çizelge 5.5. GA ile çözüm için, değişkenlerin kodlanması ve dizi uzunlukları

Tasarım Değişkenleri		2'lik Kodlama Yapısı	<i>l</i>
Modül (1. kademe)	m_1	1010	4
Pinyon diş sayısı "	Z_1	101	3
Diş genişliği "	b_1	10010	5
Çark diş sayısı "	Z_2	1011100	7
Modül (2. kademe)	m_2	0111	4
Pinyon diş sayısı "	Z_3	011	3
Diş genişliği "	b_2	11001	5

Çizelgede görüldüğü gibi iki kademeli düz dişli çarkların GA ile çözüm işleminde, kademelerin tasarımlarında kullanılan, modül, diş sayısı ve diş genişliği değişkenlerinden oluşan yedi adet dizi kullanılmıştır. Bu değişkenler kademelere bağlı olarak $_1$ ve $_2$ indisleri ile ifade edilmişlerdir.

Çizelge 5.6'da ise kullanılan değişkenlerin dizi uzunluklarının çizelgede verilen sıralama ile birleştirilmesi sonucunda tasarımı yapılmak istenen iki kademeli düz dişli çarkların kromozom yapısının almış olduğu bit değerleri ve kromozomun dizi uzunluğu görülmektedir.

Çizelge 5.6 GA ile çözüm için, kromozom yapısının oluşturulması ve dizi uzunluğu

Tas.Değişkenleri	m_1	Z_1	b_1	Z_2	m_2	Z_3	b_2	Kromozom Dizi Uzunluğu (<i>l</i>)
Dizi Uzunluğu	4 bit	3 bit	5 bit	7 bit	4 bit	3 bit	5 bit	
Bit Değerleri	1010	101	10010	1011100	0111	011	11001	
Kromozom Yapısı	1010101100101011100011101111001							31 bit

5.5. Helisel Dişli Çarkların GA İçin Kodlanması

Helisel dişli çarkların GA ile çözüm işleminde dikkate alınan değişkenler (Bkz. Bölüm 5.3) modül, diş sayısı ve diş genişliği parametreleridir. Bu amaçla dişli çark mekanizmasının GA ile çözümü için değişkenler 2'lik sayı sisteminde kodlanmış ve GA'nın kullanacağı dizi yapısı olan kromozom yapısı bu kodlamalar ile elde edilmiştir. Bu parametrelerin kodlama işlemi aşağıdaki bölümlerde açıklanmıştır.

5.5.1. Modül değişkeninin GA için kodlanması

Helisel dişli çarkların GA ile çözüm işleminde, düz dişli çarklar için anlatılanlar (Bkz. Bölüm 5.4.1) geçerli olup, helisel dişli çarklarda da modül değişkeni 1 mm ile 5,5 mm modül değerleri arasında birbirinden ayrık olarak 4 bit uzunluğunda tasarlanmıştır.

Helisel dişli çarkların GA ile çözüm işleminde de verilen modül değerleri ve kodlama yapıları kullanılmıştır (Bkz. Çizelge 5.2).

5.5.2. Diş sayısı değişkeninin GA için kodlanması

GA ile çözüm işleminde ise her bir değişkenin kodlama işlemi, değişkenin alt ve üst sınırlarına, artış aralığının sürekli olması veya olmamasına ve 2'lik kodlama yapısının değişkenin üst sınırını tam olarak kapsamamasına bağlı olarak farklılık oluşturmaktadır.

GA için helisel dişli çarkların pinyon ve çark dişlilerinin kodlanması işlemi, bu dişliler için verilmiş olan (Bkz. Çizelge 5.1) ve düz dişlilerin diş sayısı değişkenlerinin kodlanması için anlatılan ifadeler (Bkz. Bölüm 5.3 ve 5.4.2), helisel dişli çarkların diş sayılarının kodlanması işleminde de geçerli olup, bunlara göre kodlama işlemi gerçekleştirilmiştir.

Helisel dişli mekanizmalarının pinyon ve çark dişlilerinin, sınır değerlerine bağlı olarak kodlanması (Bkz. Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4) düz dişli çarklarda ifade edildiği şekilde yapılmıştır. GA için 7 bit olarak tanımlanan çark dişlisi diş sayısı değişkenleri ve kodlama yapısı verilmiştir (Bkz. Çizelge 5.4).

5.5.3. Diş genişliği değişkeninin GA için kodlanması

Helisel dişli çarkların GA ile çözümü için, diş genişliği değişkeni, analitik çözümden elde edilen değerlerde dikkate alınıp, alması muhtemel olan sınır değerler olarak, kademeler için verilen (Bkz. Çizelge 5.1) sınır değerler aralığında tanımlanmıştır.

Diş genişliğinin sınır değerler aralığında kodlama işleminde kaç bit uzunluğunda dizi oluşturacağı, 2'lik kodlama sisteminden gerçek değerlerine nasıl dönüştürüleceği, Bölüm 3.1.4'de anlatılan ifadeler ve verilen eşitlikler ile gerçekleştirilmiştir.

Diş genişliği kademeler için verilen sınır değerler arasında 5 bit uzunluğunda dizi olarak kodlanmış ve tanımlanmıştır.

5.5.4. Helisel dişli çark kromozom yapısının GA için oluşturulması

Helisel dişli çark mekanizmaları değişkenlerinin, sınır değerler içerisinde, diziler şeklinde kodlanması ve bu dizilerin bir araya getirilmesi ile kromozom yapısının oluşturulması işlemi, düz dişli çarklarda anlatılan (Bkz. Bölüm 5.4.4) değişken dizilerinin tanımlanması ve kromozom yapısının oluşturulmasında anlatılan bilgiler kapsamında gerçekleştirilmiştir.

5.6. Konik Dişli Çarkların GA İçin Kodlanması

Konik dişli çark mekanizmalarını oluşturan, konik~düz ve konik~helis dişli çiftlerinin GA ile çözüm işleminde, düz ve helis dişlilerde anlatıldığı gibi, modül, diş sayısı ve diş genişliği değişkenleri dikkate alınmıştır.

Bu değişkenlerin kodlanması, düz dişlilerde anlatıldığı gibi (Bkz. Çizelge 5.1, Çizelge 5.2, Çizelge 5.3, Çizelge 5.4) gerçekleştirilmiş ve kodlanan değişken dizilerinden de kromozom yapısı oluşturulmuştur.

6. GA İLE HIZ KUTUSU DİŞLİ ÇARK TASARIMLARI

Gerçekleştirilen çalışma kapsamında, analitik yaklaşımla çözümü yapılan dişli çark mekanizmalarının, GA ile de çözümü gerçekleştirilmiştir.

Analitik yaklaşımlı çözüm işleminde olduğu gibi GA ile de düz, helisel ve konik dişli çark mekanizmaları, tek ve iki kademe şeklinde farklı iletim oranı değerleri için çözülmüştür. GA ile çözüm işleminde dikkate alınan, tasarım değişkenleri, amaç fonksiyonu ve sınırlama fonksiyonları, analitik yaklaşım ile çözüm (Bkz. Bölüm 4) ve GA ile modelleme (Bkz. Bölüm 5) bölümleri altında anlatıldığı şekilde gerçekleştirilmiştir.

GA ile çözüm sürecinde, GA'nın çalışma ve sonuca gitme performansına etki eden, seçim, çaprazlama ve mutasyon gibi GA parametre değerleri incelenmiştir. GA parametre değerleri tasarım sürecinde sonuca etki eden en önemli değişkenler olup bu değişkenlerin uygun seçilmesi tasarım sonucunda elde edilen amaç fonksiyonu değerinin de uygun olup olmamasını sağlamaktadır. Sınırlama fonksiyonları, GA çözüm sürecinde kromozomlardan elde edilen dişli değişkenlerinin mukavemet kontrollerinde kullanılmaktadır.

GA için hazırlanan birleşik dişli tasarım programı ile düz, helisel ve konik dişli çarkların çözümleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar çizelge ve grafikler ile ifade edilmiştir. Ayrıca farklı iletim oranlarına göre elde edilen sonuçların uygunluk grafikleri dişli çark tipleri için verilmiş ve sonuçlar irdelenmiştir.

6.1. Düz Dişli Çarkların GA ile Tasarımı

Düz dişli çarkların GA ile çözüm işlemi hazırlanmış olan GA birleşik dişli tasarım programı ile yapılmıştır. Düz dişli çarklar analitik çözümde olduğu gibi, GA ile de tek ve iki kademeli mekanizmalar şeklinde tasarımı yapılmıştır. Hız kutusu girdileri olarak motor gücü, giriş devri ve çıkış devri değişkenleri dikkate alınmıştır. Çıkış

devrinin farklı değerlerine bağlı olarak, mekanizmalar tek veya iki kademeli mekanizma şeklinde tanımlanmıştır.

6.1.1. GA ile tek kademeli düz dişli çark tasarımı

Tek kademeli düz dişli çarkların GA ile tasarımı, “malzeme hacmi” amaç fonksiyonu için, belirlenmiş olan değişkenlere ve sınırlama fonksiyonlarına bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Analitik çözümde olduğu gibi GA ile de tek kademe için iletim oranı 2, 3, 4, 5 değerlerinde çözümler elde edilmiştir.

GA ile dişli tasarımı için temel olarak, GA parametre değerleri, hız kutusu (redüktör) girdileri ve sınırlama fonksiyonları olmak üzere üç ayrı bilgi grubundan değerler girilmekte ve bu değerlere bağlı olarak tasarım işlemi yapılmaktadır. Tasarım sürecinde kullanıcı sınırlama fonksiyonlarını isteğe bağlı olarak kendisi seçebilmektedir.

GA ile dişli tasarımı için hazırlanan birleşik dişli tasarım programının ana menüsü ve bu menü de tek kademeli düz dişli tasarımı için belirlenmiş olan GA parametre değerleri, hız kutusu girdileri ve sınırlama fonksiyonları görülmektedir (Ek 7).

Tek kademeli düz dişli tasarımı için GA programı 500, 800, 1000 jenerasyon sayılarında çalıştırılmış ve 100 jenerasyon sayısından sonraki jenerasyonlarda amaç fonksiyonu eğrisinin değişmediği görülmüştür. Bu nedenle GA'nın uygun çözümler elde edilemeyen jenerasyonlar için işlem yapmasını önlemek ve çözüm sürecinin de kısılmasını sağlamak için jenerasyon sayısı 200 olarak alınmıştır.

Sonraki aşamada GA'nın uygun çözüm elde etmesine etki eden parametrelerden bir tanesi olan mutasyon oranı, 0,1; 0,01; 0,001 değerleri için ve çaprazlama oranı ise 0,5; 0,7; 0,9 değerleri için program çalıştırılmıştır. Mutasyon oranı için 0,001 değerinin ve çaprazlama oranı için ise 0,9 değerinin, GA'nın performansına ve uygun çözüm elde etmesine etki eden parametre değerleri olduğu gözlemlenmiştir.

Tek kademeli mekanizma $i=2$ için ilk jenerasyonun populasyon dağılımı Çizelge 6.1'de verilmiştir.

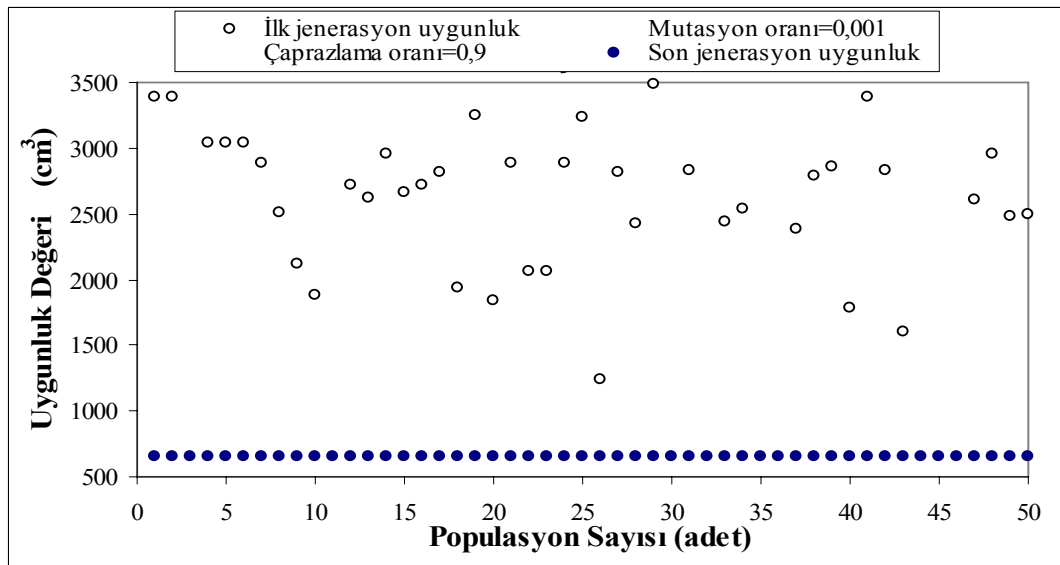
Çizelge 6.1. Düz dişli çark, tek kademe, $i=2$ için ilk jenerasyon populasyon dağılımı

Birey	İkilik Kodlama	Tasarım Değişkenleri			
		x(1)	x(2)	x(3)	x(4)
1	010001101001	2,75	23	46	22,74
2	010001101001	2,75	23	46	22,74
3	000010001100	4	17	34	15,97
4	010111100000	1	23	46	25,65
5	010001000010	1,25	21	42	22,74
6	010001000010	1,25	21	42	22,74
7	011001000001	1,3	21	42	26,61
8	111011010000	1	22	44	43,06
9	110001110011	1,38	24	48	38,23
10	111011110011	1,38	24	48	43,06
11	000110010011	1,38	18	36	17,9
12	010111100100	1,5	23	46	25,65
13	100010101001	2,75	19	38	31,45
14	010101000010	1,25	21	42	24,68
15	100101000010	1,25	21	42	32,42
16	010111100100	1,5	23	46	25,65
17	010101110101	1,75	24	48	24,68
18	111001110011	1,38	24	48	42,1
19	010110000000	1	17	34	25,65
20	101001100111	2,25	23	46	34,35
21	011001000001	1,3	21	42	26,61
22	110011110011	1,38	24	48	39,19
23	110011110011	1,38	24	48	39,19
24	100011010000	1	22	44	31,45
25	001101000011	1,38	21	42	20,81
26	110011101000	2,5	23	46	39,19
27	010101110101	1,75	24	48	24,68
28	110100001100	4	17	34	40,16
29	001000000010	1,25	17	34	18,87
30	001110101110	5	19	38	21,77
31	011000110101	1,75	20	40	26,61
32	001101101011	3,5	23	46	20,81
33	101000001000	2,5	17	34	34,35
34	101001010001	1,3	22	44	34,35
35	000100010100	1,5	18	36	16,94
36	000110111011	3,5	20	40	17,9
37	101000000111	2,25	17	34	34,35
38	010101100011	1,38	23	46	24,68
39	101000001100	4	17	34	34,35
40	110100000111	2,25	17	34	40,16

Çizelge 6.1. Düz dişli çark, tek kademe, $i=2$ için ilk jenerasyon popülasyon dağılımı (devamı)

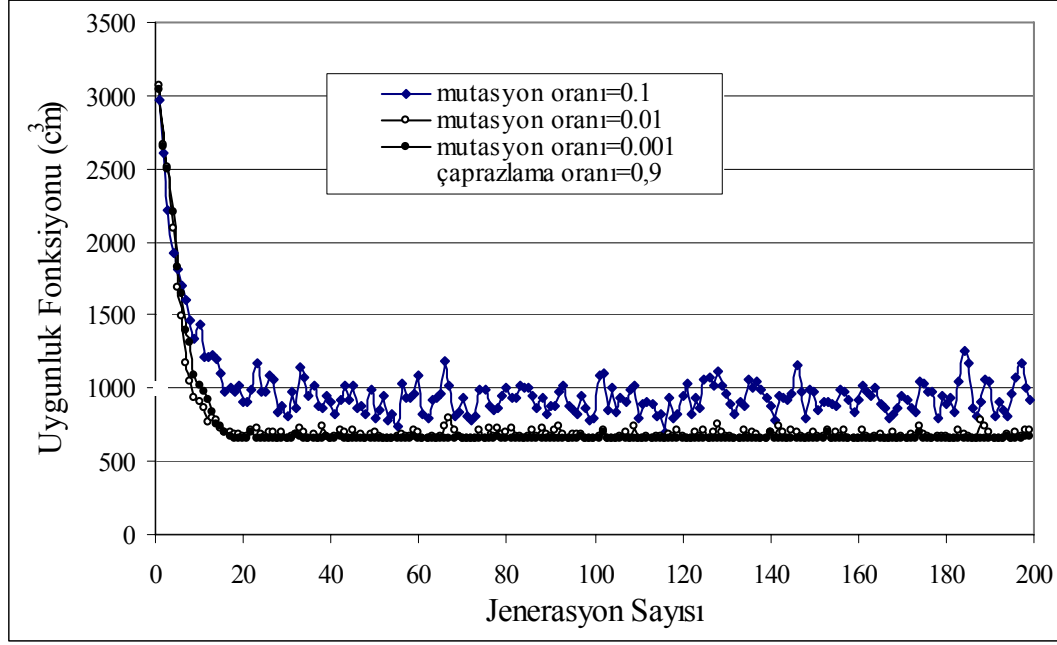
Birey	İkili Kodlama	Tasarım Değişkenleri			
		x(1)	x(2)	x(3)	x(4)
41	010001101001	2,75	23	46	22,74
42	011000110101	1,75	20	40	26,61
43	110110011001	2,75	18	36	41,13
44	000010001100	4	17	34	15,97
45	100111101110	5	23	46	33,39
46	000010010111	2,25	18	36	15,97
47	111001000000	1	21	42	42,1
48	010011010010	1,25	22	44	23,71
49	111010010001	1,3	18	36	43,06
50	110110000011	1,38	17	34	41,13

Çizelge 6.1’de GA ile çözümden elde edilen ilk jenerasyonda elde edilen kromozomlar ve bunların değişken değerleri, jenerasyonun popülasyon sayısına göre sıralanmıştır. Çizelgede kromozomların birbirlerinden oldukça ayrı değerler aldıkları gerek kromozom yapılarından ve gerekse değişkenlerin değerlerinden açıkça görülmektedir. Son jenerasyonda elde edilen kromozomlar ve değişken değerleri de verilmiştir (Ek 8). İlk ve son jenerasyon uygunluk değeri dağılımı Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1. GA çözüm, düz dişli çark, tek kademe, $i=2$ için ilk jenerasyon ve son jenerasyon uygunluk fonksiyonu dağılımı

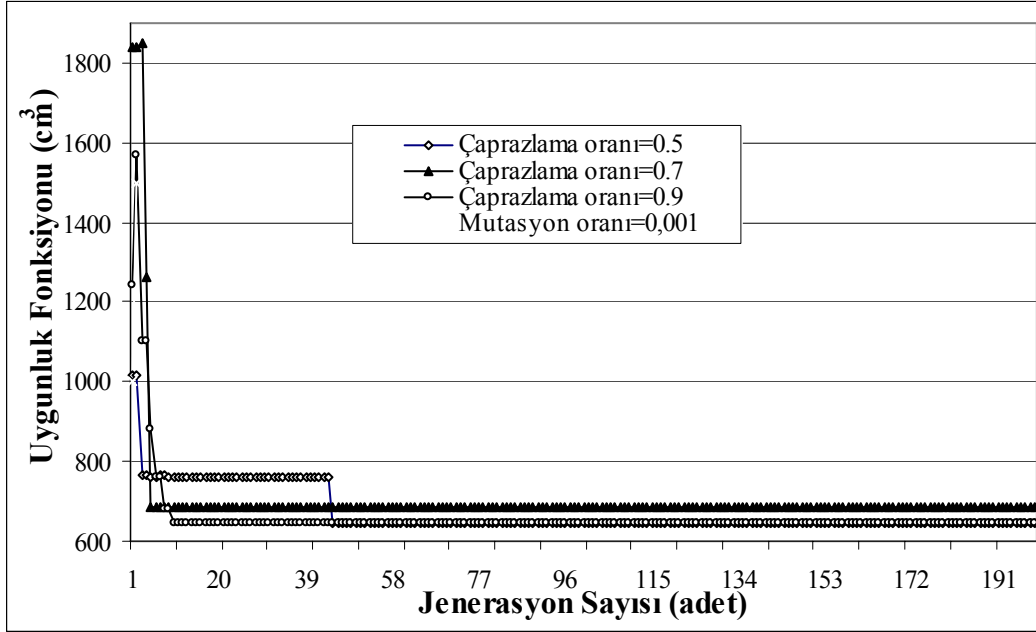
Mutasyon oranı değerleri için elde edilen uygunluk değerleri (malzeme hacmi) grafiği Şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.2. Mutasyon oranının uygunluk fonksiyonu sonuçlarına etkileri

Grafikte, çaprazlama oranı 0,9 için farklı mutasyon oranlarında elde edilen uygunluk fonksiyonlarının dağılımı görülmektedir. GA çalışma prensibi gereği sürekli iyileşen çözümler üreterek sonuca giden bir yapıda çalışmaktadır. Mutasyon oranı 0,1 ve 0,01 değerlerinde, uygunluk fonksiyonu eğrileri için sürekli iyileşen çözümler elde edilememektedir. Mutasyon oranı 0,001 değerinde ise GA'nın çalışma prensiplerine uygun olarak veriler elde edilmekte ve uygun "malzeme hacmi" değeri bu parametrede elde edilmiş olmaktadır.

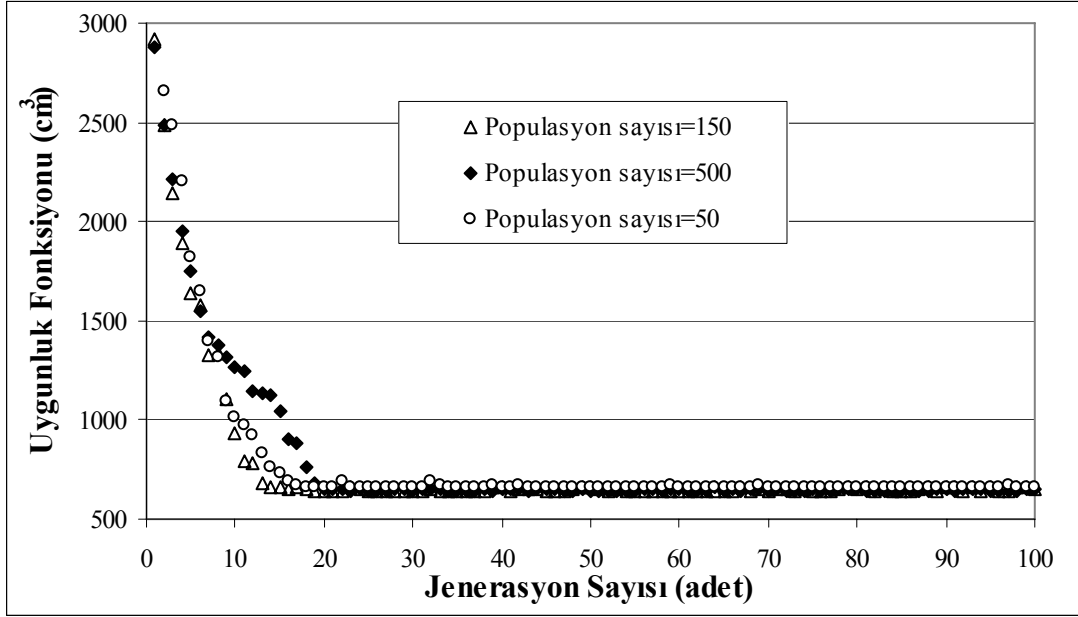
Çaprazlama oranı, 0,5; 0,7; 0,9 değerleri için elde edilen uygunluk fonksiyonu grafiği Şekil 6.3’de verilmiştir.



Şekil 6.3. Çaprazlama oranının uygunluk fonksiyonu sonuçlarına etkileri

Grafikte görüldüğü gibi, uygunluk fonksiyonunun en küçük değerine ilk olarak 0,9 çaprazlama oranında ulaşılmaktadır. Sonrasında 0,7 çaprazlama oranında, 0,9 değerine yaklaşılmakta fakat aynı değerleri sağlamadan paralellik göstererek devam etmektedir. 0,5 değerinde ise uygunluk fonksiyonunun küçük değerine en geç ulaşılmakta ancak burada 0,9 için bulunan değere 45. jenerasyon sayısında ulaşmakta ve bu noktadan sonra 0,9 ile aynı sonuçlar elde edilmektedir. Sonuç olarak büyük çaprazlama oranında erken jenerasyonlarda uygun değerlere ulaşılırken, küçük çaprazlama oranında ise uygun sonuçlara daha geç jenerasyonlarda ulaşılmaktadır.

Populasyon sayısı, 50, 150, 500 için elde edilen uygunluk fonksiyonu grafiği Şekil 6.4'de verilmiştir.



Şekil 6.4. Populasyon sayısının uygunluk fonksiyonu sonuçlarına etkileri

Populasyon sayısı grafiğinde, uygunluk fonksiyonunun en küçük değerine 500 ve 150 populasyon sayılarında ulaşılmış, 50 populasyon sayısında ise diğer populasyon sayılarında elde edilen uygunluk değerinden büyük değer elde edilmiştir. Ayrıca 150 Populasyon sayısı daha erken uygun değere yakınsama yapmıştır.

GA ile tek kademeli mekanizma $i=2$ için program çalıştırılmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 6.2’de verilmiştir. Çizelgede tek kademe için farklı iletim oranlarında elde edilen dişli çark parametreleri ve hacimleri görülmektedir.

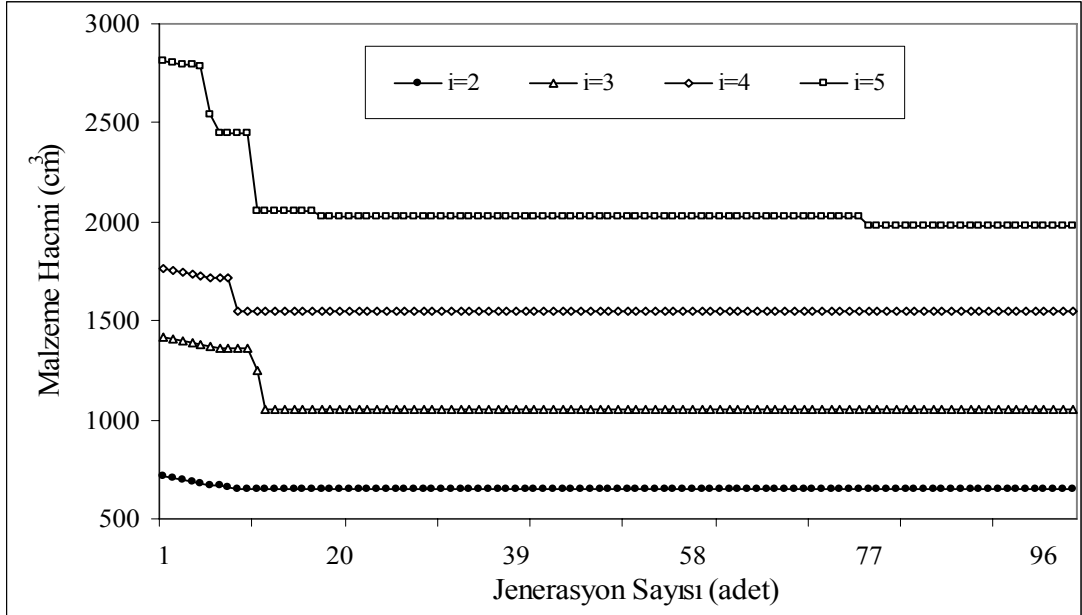
Çizelge 6.2. GA ile çözüm, düz dişli çark, tek kademe parametre ve değişkenleri

Güç (kW)	Giriş Devri (dv/dk)	Çıkış Devri (dv/dk)	İletim Oranı	Modül (mm)	Pinyon	Çark	Diş Geniş. (mm)	Min. Malz. Hacmi (cm ³)
7.5	1800	360	5	2	23	115	44,03	1979,07
7.5	1800	450	4	2,25	23	92	41,13	1546,39
7.5	1800	600	3	2,5	21	63	45	1049,59
7.5	1800	900	2	2,5	23	46	45	646,67

Bu çizelgede görüldüğü gibi, aynı güç ve giriş devri için küçük iletim oranlarında, küçük “malzeme hacmi” değerlerinde tasarımlar elde edilmektedir.

Tek kademe $i=2$ için GA ile elde edilen malzeme hacmi ve tasarım değişkenleri, GA tek kademeli mekanizma sonuç menüsünde görülmektedir (Ek 9).

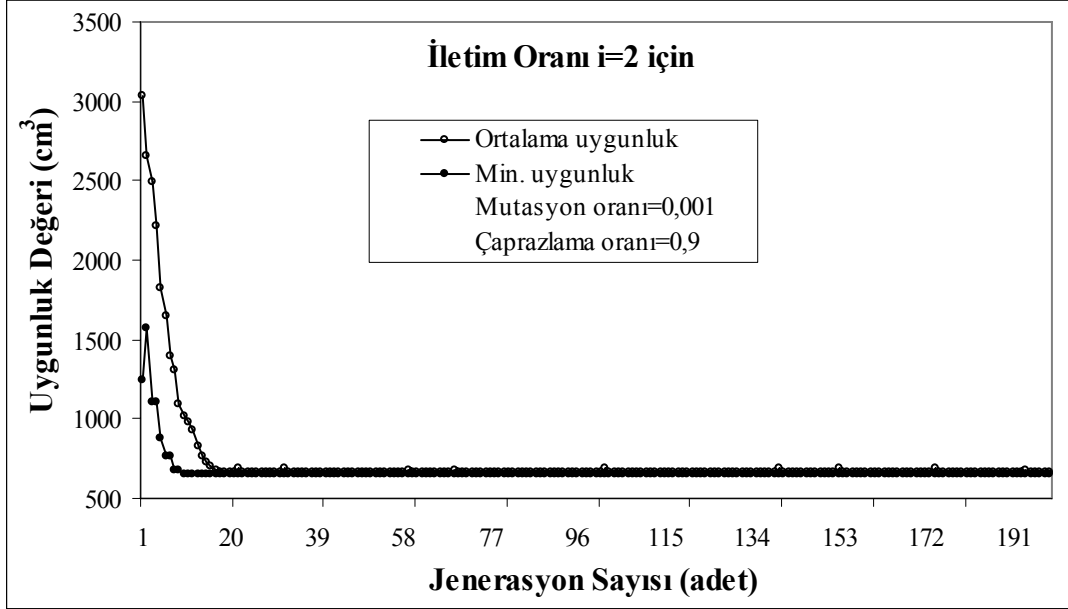
Tek kademeli düz dişli çark mekanizması için GA ile farklı iletim oranlarında çözüm yapıldığında, jenerasyon sayısına bağlı olarak malzeme hacmi değerlerinin değişimi ve birbirleri ile kıyaslanması Şekil 6.5’de verilmiştir.



Şekil 6.5. GA çözüm, düz dişli çark, tek kademe, farklı iletim oranlarındaki malzeme hacmi değişimi

Bu grafikte, malzeme hacmi değerleri analitik çözümde elde edilen değerlerin dağılımının tam tersine sapmalar göstermeden, bir başlangıç noktasından sürekli iyileşen çözümler şeklinde elde edilmiştir. Ayrıca analitik çözüm de olduğu gibi burada da küçük iletim oranlarında elde edilen malzeme hacimlerinin diğer iletim oranlarından elde edilen hacimlerden daha küçük olduğu görülmektedir.

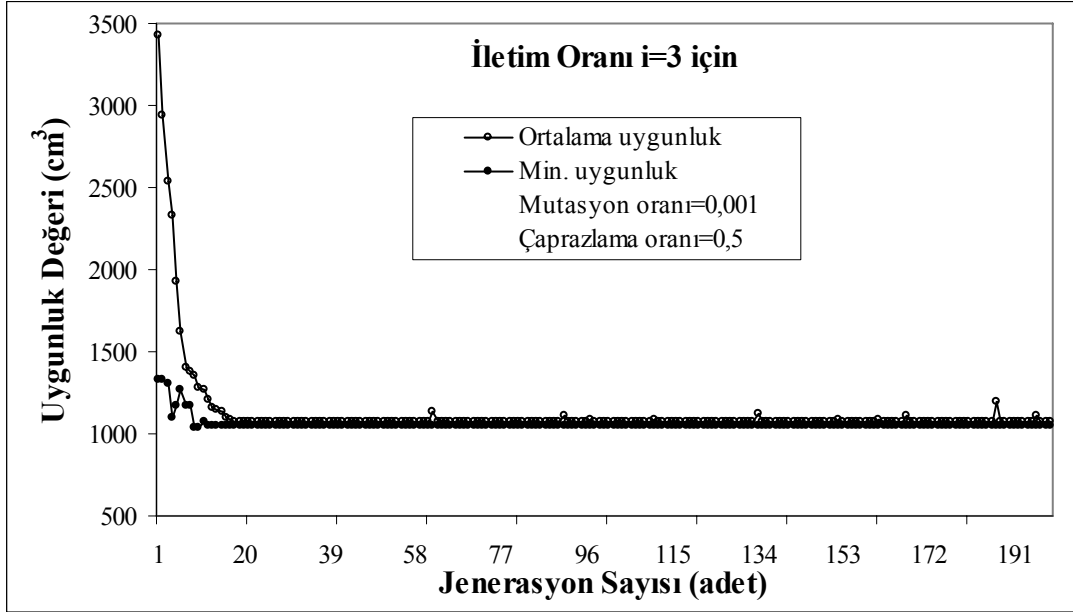
Tek kademe GA çözüm $i=2$ için jenerasyon sayısına bağlı uygunluk fonksiyonu değişimini gösteren grafik ise Şekil 6.6'da verilmiştir.



Şekil 6.6. GA çözüm düz dişli çark,, tek kademe, $i=2$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı

Şekil 6.6'da verilen grafikte başlangıçta ortalama uygunluk değerinin minimum uygunluk değerinden ayrık olarak dağılım gösterdiği ancak jenerasyon sayısı arttıkça minimum uygunluk değerine yaklaştığı ve bir noktadan sonra artık aynı değerleri almakta veya aynı eğilimi sergilemektedir. Bu ise GA'nın istenilen amaca ulaşmada başarılı olduğunu göstermektedir.

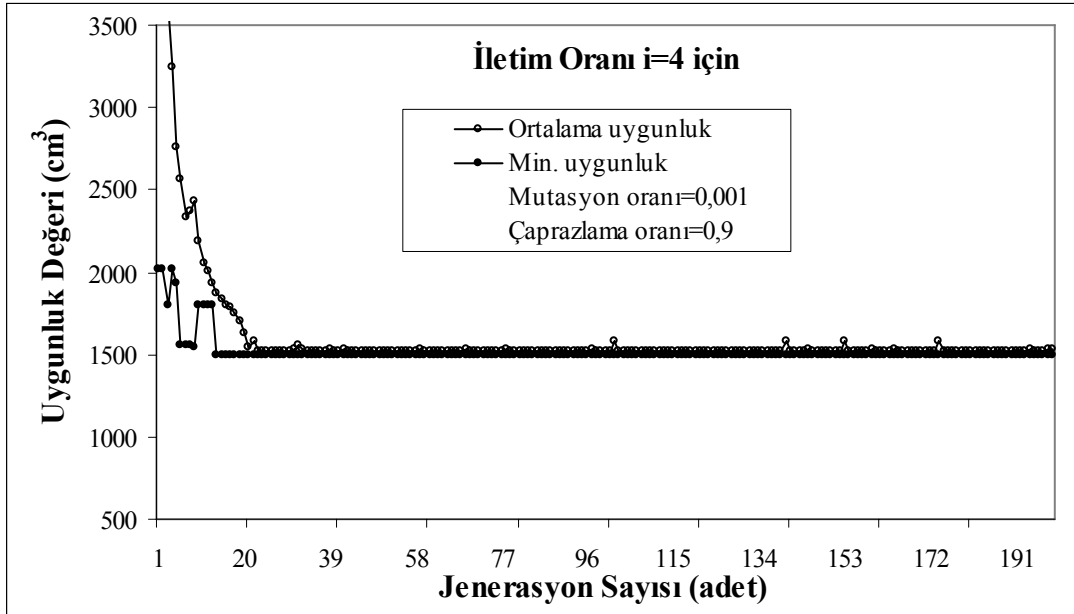
İletim oranı 3 için GA çözüm, jenerasyon sayısına bağlı uygunluk fonksiyonu değişimini gösteren grafik ise Şekil 6.7'de verilmiştir.



Şekil 6.7. GA çözüm, düz dişli çark, tek kademe, $i=3$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı

Bu grafikte, ortalama uygunluk değeri sürekli iyileşen değişimlerle, minimum uygunluk değerine doğru değişimler gösterip ilerlerken, minimum uygunluk değeri ise 15. jenerasyona kadar başlangıç değeri ile en düşük değeri arasında sapmalar göstermiş ve bu jenerasyondan sonra değişim göstermeden sabit hale gelmiştir. Ortalama uygunluk değeri bu grafikte 22. jenerasyonda minimum uygunluk grafiği ile paralel hale gelmiş ve uygun sonuç burada elde edilmiş olup diğer jenerasyonlarda da aynı değerler elde edilmiştir.

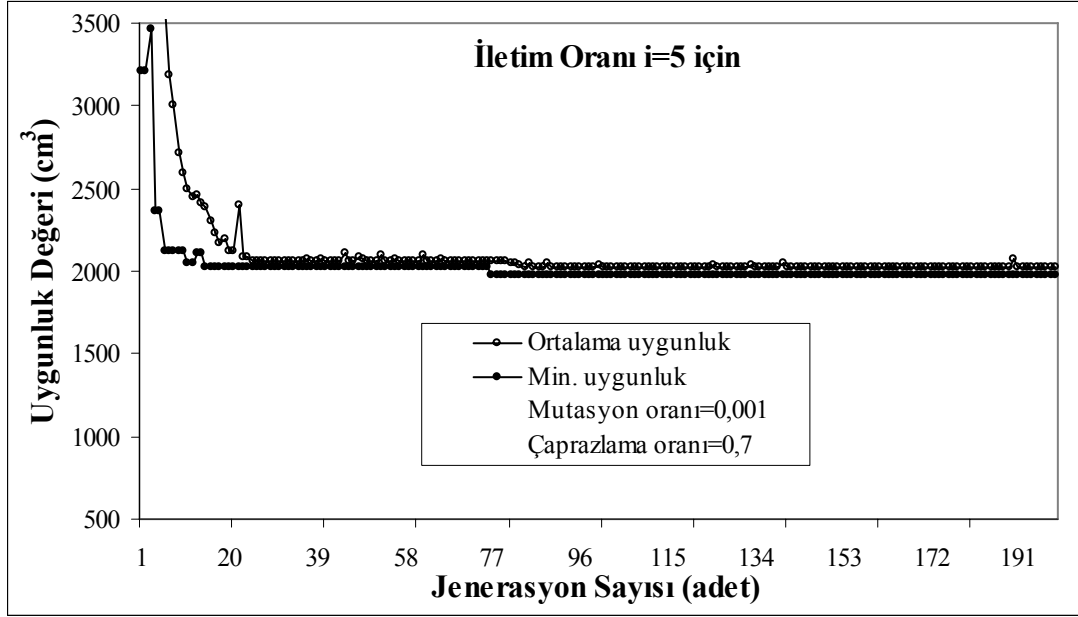
İletim oranı 4 için GA çözüm, jenerasyon sayısına bağlı uygunluk fonksiyonu değişimini gösteren grafik ise Şekil 6.8’de verilmiştir.



Şekil 6.8. GA çözüm düz dişli çark,, tek kademe, $i=4$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı

Grafikte, minimum uygunluk değeri sapmalar gösterip 17 . jenerasyona kadar farklı değerler almış ancak bu jenerasyondan sonra değişmeden sabit bir değerde devam etmiştir. Ortalama uygunluk değeri ise 25. jenerasyonda minimum uygunluk ile paralellik gösteren değerler almış ve bu şekilde çözüme gidilmiştir.

İletim oranı 5 için GA çözüm, jenerasyon sayısına bağlı uygunluk fonksiyonu değişimini gösteren grafik ise Şekil 6.9’da verilmiştir.



Şekil 6.9. GA çözüm, düz dişli çark, tek kademe, $i=5$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı

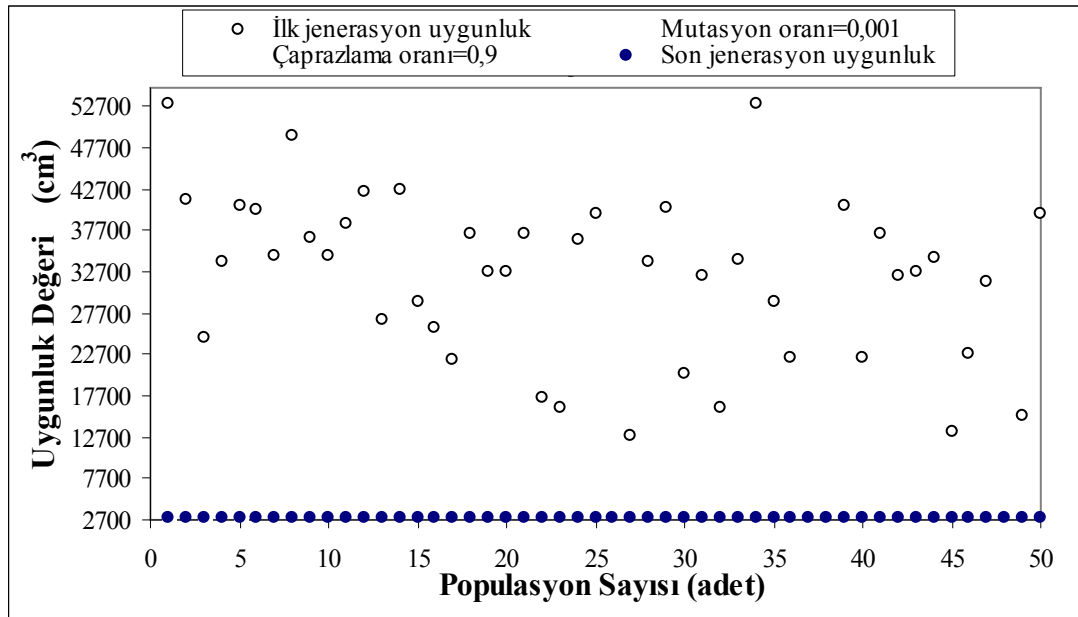
İletim oranı 5 için elde edilen grafiğe göre, minimum uygunluk değeri 15. jenerasyona kadar sapmalar göstermiş ve bu değerden sonra 77. jenerasyona kadar aynı değeri alıp eğri paralellik gösterirken 77. jenerasyondan sonra tekrar bir iyileşme ile uygunluk değerinde düşme olmuş ve bu yeni değer ile jenerasyon işlemi tamamlanmıştır. Ortalama uygunluk değeri ise 26. jenerasyonda minimum uygunluk değeri ile paralellik gösterecek şekilde değerler almaya başlamış ve 88. jenerasyonda ikinci defa bir düşme göstermiş ve minimum uygunluk değeri ile yine paralellik sergileyerek devam etmiş ve jenerasyon tamamlanmıştır.

Şekil 6.9'daki grafikte minimum ve ortalama uygunluk eğrilerinin birbirine paralel şekilde eğilim göstermeleri GA'nın performansının iyi yönde devam ettiğini ve uygun sonuca gidildiğini göstermektedir.

6.1.2. GA ile iki kademeli düz dişli çark tasarımı

Düz dişli çark iki kademe için, tek kademeli çözümde anlatılan (Bkz. Bölüm 6.1.1) bilgiler geçerli olup, GA ile çözümler elde edilmiştir. Tek kademeli düz dişli çarkların GA ile tasarımı, “malzeme hacmi” amaç fonksiyonu için, belirlenmiş olan değişkenlere ve sınırlama fonksiyonlarına bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Analitik çözümde olduğu gibi GA ile de iki kademe için iletim oranı 6, 11, 16, 21 değerlerinde çözümler elde edilmiştir.

İki kademeli mekanizma iletim oranı 6 için GA ile elde edilen ilk jenerasyon ile son jenerasyon uygunluk fonksiyonu dağılımı Şekil 6.10’da verilmiştir.



Şekil 6.10. GA çözüm, düz dişli çark, iki kademe, $i=6$ için ilk jenerasyon ve son jenerasyon uygunluk fonksiyonu dağılımı

Bu grafikte tek kademeli dişli tasarımında olduğu gibi, ilk jenerasyonda uygunluk değerleri oldukça farklı değerler almakta iken son jenerasyonda uygunluk değerleri aynı değerleri almaktadır. Yani kromozomların tamamı aynı bit değerlerini almış olmaktadır.

GA ile iki kademeli mekanizma için program çalıştırılmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 6.3’de verilmiştir. Çizelgede iki kademe için farklı iletim oranlarında elde edilen dişli çark parametreleri ve hacimleri görülmektedir.

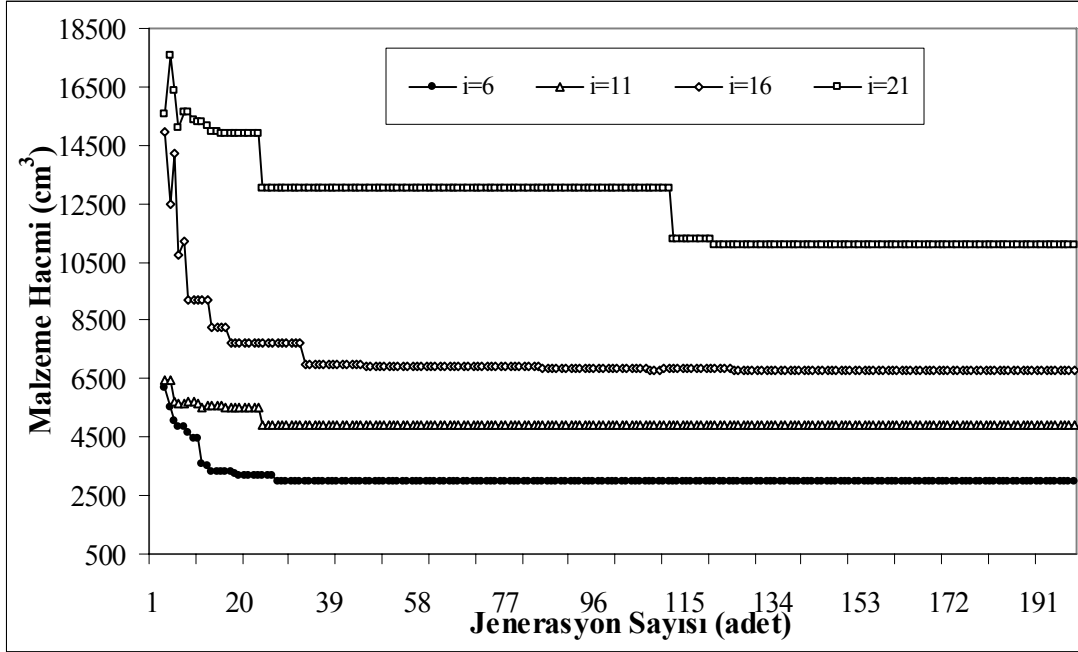
Çizelge 6.3. GA ile çözüm, düz dişli çark, iki kademe parametre ve değişkenleri

Güç (kW)	Giriş Devri (dv/dk)	Çıkış Devri (dv/dk)	İletim Oranı	Modül (mm)	Pinyon	Çark	Diş Geniş. (mm)	Min. Malz. Hacmi (cm ³)
7.5	1800	85,7	21	2,5	19	131	50	11058,23
				405	24	73	66	
7.5	1800	112,5	16	2,25	17	103	58	6820,47
				4	22	58	80	
7.5	1800	163,6	11	2,5	19	83	50	4923,15
				3,5	24	60	70	
7.5	1800	300	6	2,5	21	55	63,23	2988,21
				3,5	21	48	70	

Bu çizelgede görüldüğü gibi, aynı güç ve giriş devri için küçük iletim oranlarında, küçük “malzeme hacmi” değerlerinde tasarımlar elde edilmektedir.

İki kademe $i=6$ için GA ile elde edilen malzeme hacmi ve tasarım değişkenleri, GA iki kademeli mekanizma sonuç menüsünde görülmektedir (Ek 10).

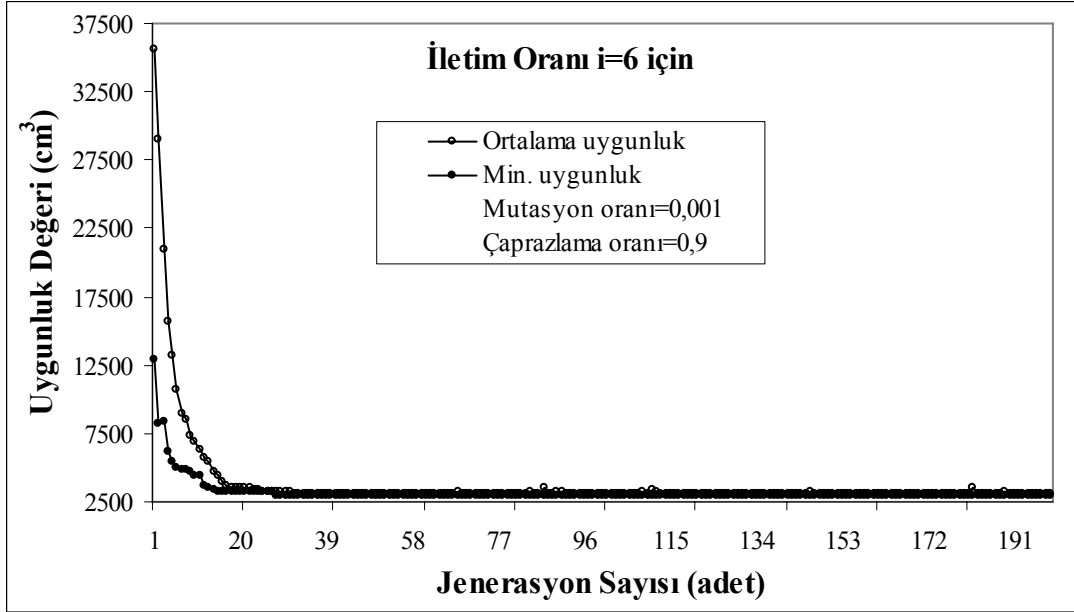
İki kademeli düz dişli çark mekanizması için GA ile farklı iletim oranlarında çözüm yapıldığında, jenerasyon sayısına bağlı olarak malzeme hacmi değerlerinin değişimi ve birbirleri ile kıyaslanması Şekil 6.11’de verilmiştir.



Şekil 6.11. GA çözüm, düz dişli çark, iki kademe, farklı iletim oranlarındaki malzeme hacmi değişimi

Bu grafikte, malzeme hacmi değerleri analitik çözümde elde edilen değerlerin dağılımının tam tersine sapmalar göstermeden, bir başlangıç noktasından sürekli iyileşen çözümler şeklinde elde edilmiştir. Ayrıca analitik çözüm de olduğu gibi burada da küçük iletim oranlarında elde edilen malzeme hacimlerinin diğer iletim oranlarından elde edilen hacimlerden daha küçük olduğu görülmektedir.

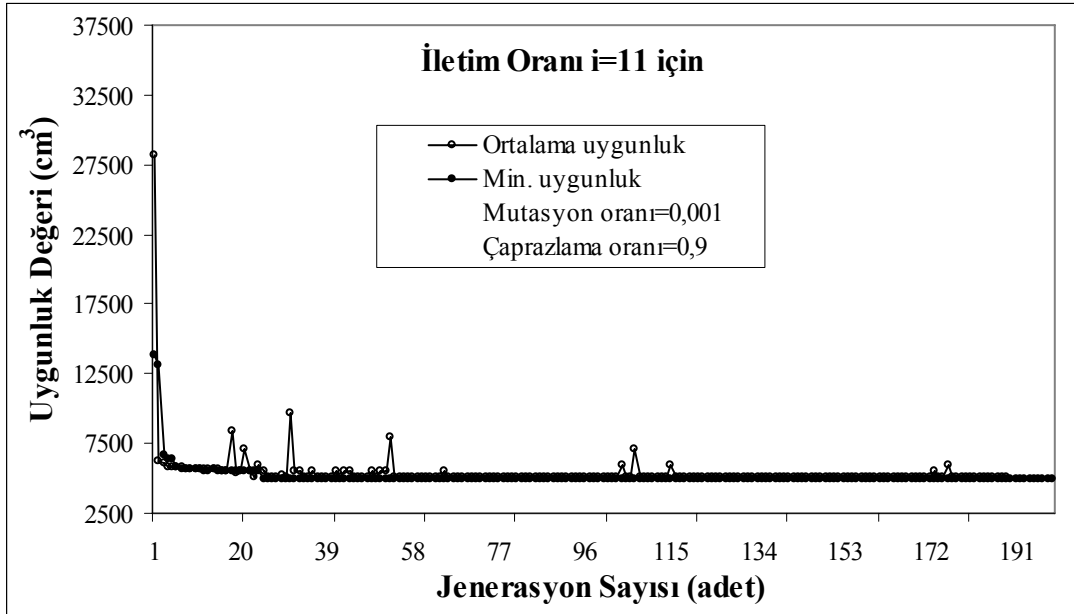
İki kademe GA çözüm $i=6$ için jenerasyon sayısına bağlı uygunluk fonksiyonu değişimini gösteren grafik ise Şekil 6.12’de verilmiştir.



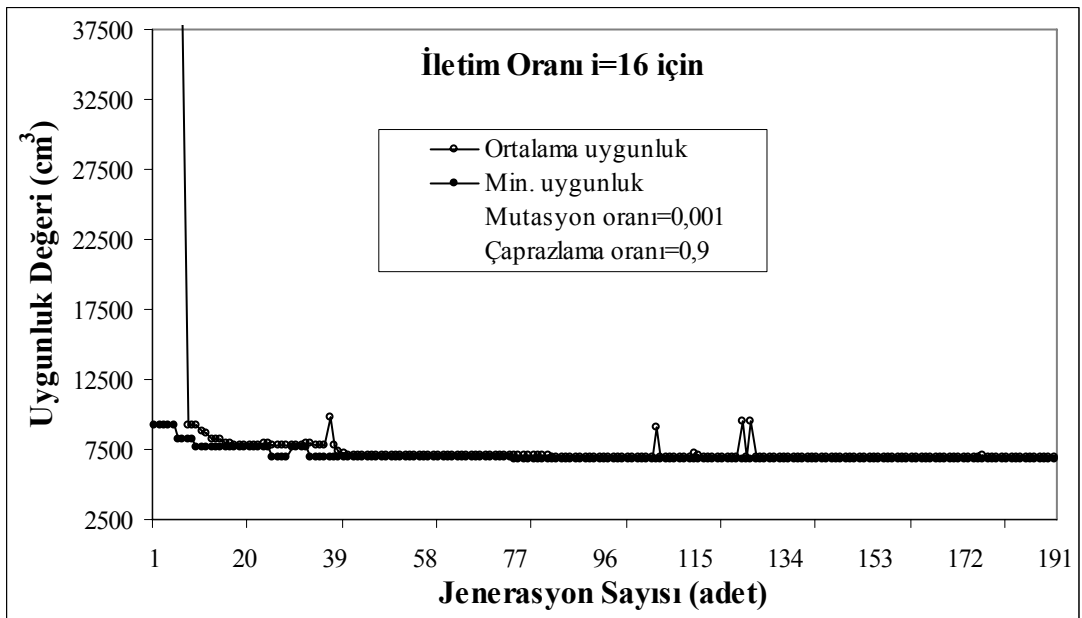
Şekil 6.12. GA çözüm, düz dişli çark, iki kademe, $i=6$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı

Grafikte 30. jenerasyona kadar eğriler arasında sapmalar olmakta ancak 30. jenerasyondan sonra ortalama uygunluk ile minimum uygunluk eğrileri paralel olarak devam etmektedir. Bu GA'nın performansının iyi yönde olduğunu göstermektedir.

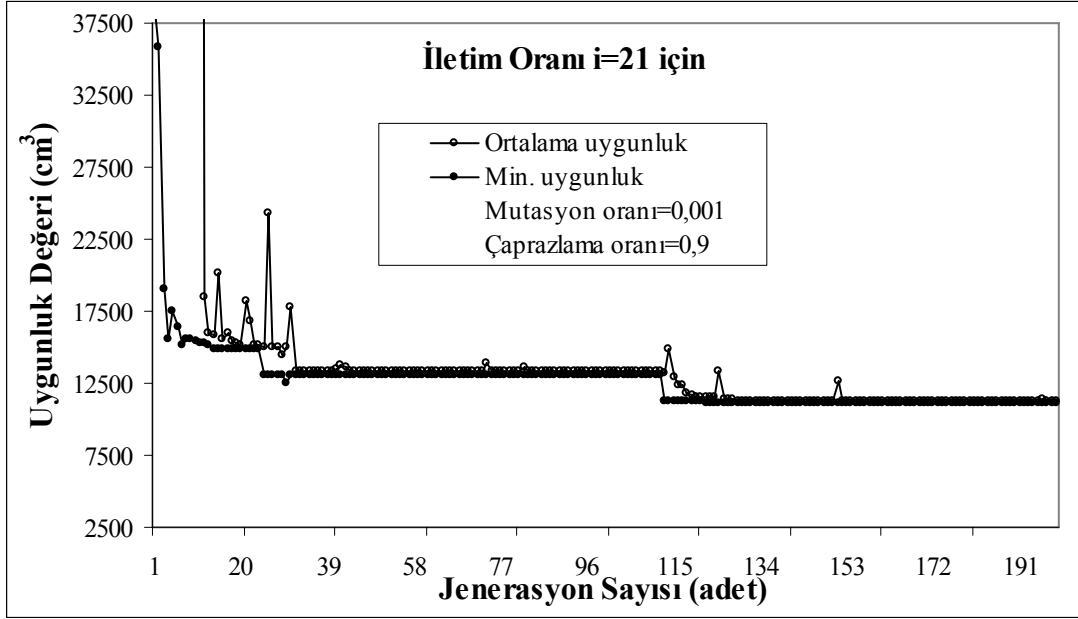
İki kademeli mekanizma iletim oranları 11, 16 ve 21 değerleri içinde uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımları Şekil 6.13, Şekil 6.14 ve Şekil 6.15'de verilmiştir. Bu grafiklerde de ortalama uygunluk eğrilerinin jenerasyon sayısı sürecinde göstermiş olduğu dağılım ve bunların minimum uygunluk eğrileri ile nasıl bir yaklaşım gösterdikleri görülmektedir. Ancak bu grafiklerde ortalama uygunluk eğrileri jenerasyonun ileri aşamalarında az da olsa sapmalar göstermişlerdir.



Şekil 6.13. GA çözüm, düz dişli çark, iki kademe, $i=11$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı



Şekil 6.14. GA çözüm, düz dişli çark, iki kademe, $i=16$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı



Şekil 6.15. GA çözüm, düz dişli çark, iki kademe, $i=21$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı

6.2. Helisel Dişli Çarkların GA ile Tasarımı

Helis dişli çarkların GA ile çözümü için öncelikli olarak amaç fonksiyonunun ve sınırlama fonksiyonlarının belirlenmesi gerekmektedir. Helis dişli çarklarda amaç fonksiyonu minimum malzeme hacmi olarak belirlenmiştir. Helis dişli çarklardaki amaç fonksiyonunun oluşturulması düz dişli çarklarda anlatılanlar ile aynıdır. Ayrıca sınırlama fonksiyonları ise mukavemet hesaplamalarında kullanılan eğilme, aşınma ve yüzey genişliği faktörleridir.

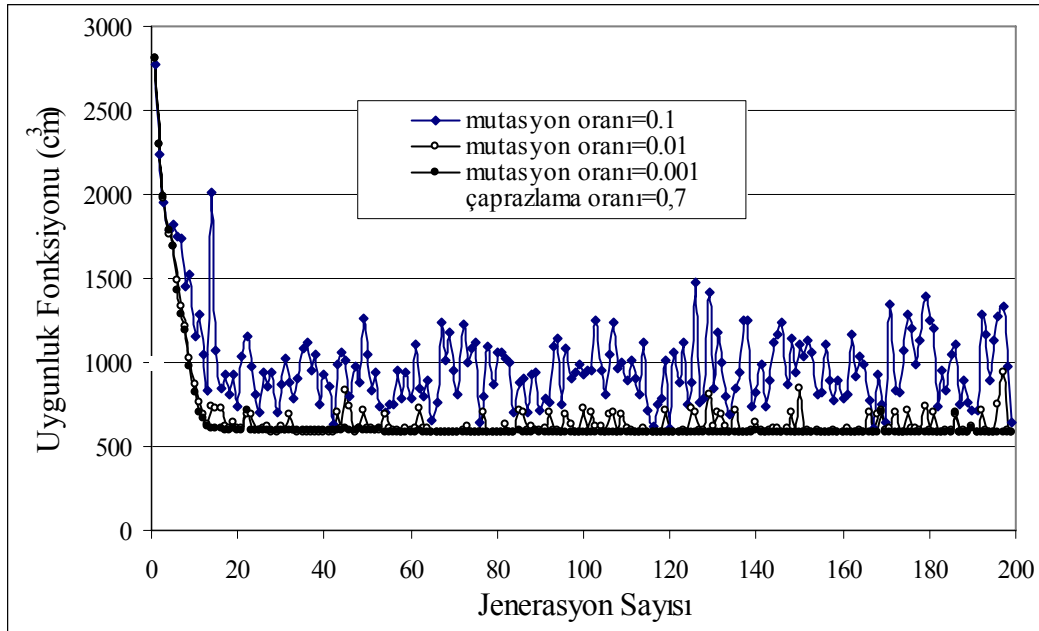
Bu amaçla öncelikle helis dişli çarklarda dişli çarkı oluşturan değişkenlerin belirlenmesi gerekmektedir. Helis dişlilerde, düz dişlilerde olduğu gibi, modül, diş sayısı, diş genişliği değişkenler olarak dikkate alınmıştır. Amaç fonksiyonu ve sınırlama fonksiyonları bu değişkenlere bağlı olarak oluşturulmuştur.

6.2.1. GA ile tek kademeli helisel dişli çark tasarımı

Helis dişli arkların GA ile çözümü, düz dişlilerde anlatılan GA programı ile yapılmıştır. Burada analitik çözümde kullanılan değişkenler ve parametrelere göre GA programı helis dişli çarklar için düzenlenmiş ve işlem gerçekleştirilmiştir. Amaç fonksiyonu ve sınırlama fonksiyonları da analitik yaklaşımlı çözümde dikkate alınanlar ile aynıdır.

Tek kademeli helis dişli tasarımı için GA programı, Jenerasyon sayısı 200 sabit alınıp, mutasyon oranı ise 0,1-0,01-0,001 değerleri için ve Crossover (aprazlama) oranı 0,5-0,7-0,9 değerleri için çalıştırılmıştır.

Mutasyon oranı değerleri için elde edilen uygunluk değerleri (malzeme hacmi) grafiği Şekil 6.16'da verilmiştir.

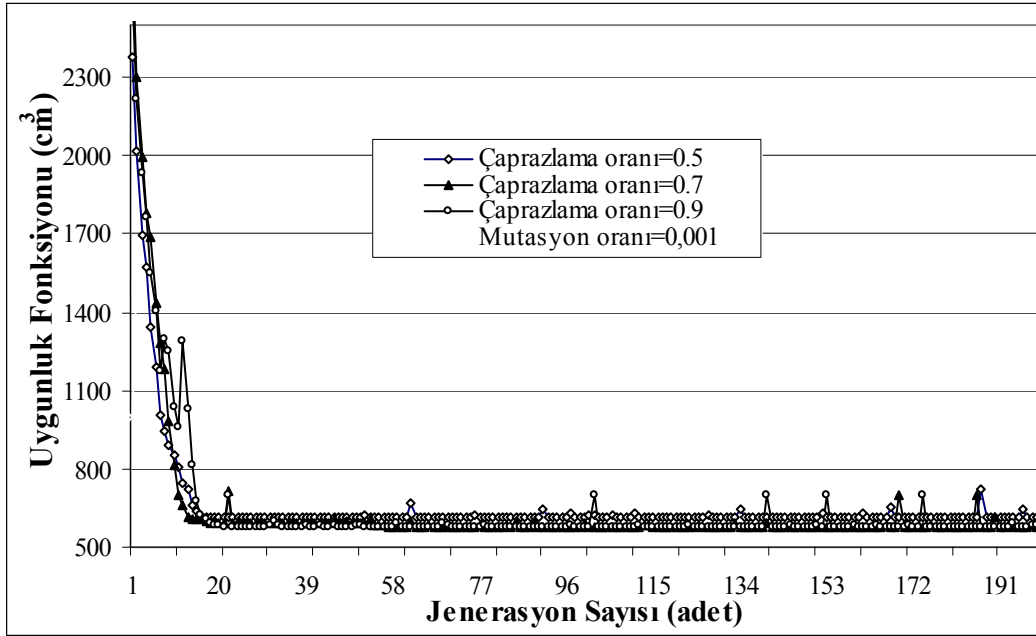


Şekil 6.16. Mutasyon oranının uygunluk fonksiyonu sonuçlarına etkileri

Grafikte, aprazlama oranı 0,9 için farklı mutasyon oranlarında elde edilen uygunluk fonksiyonlarının dağılımı görülmektedir. GA alışma prensibi gereği sürekli iyileşen

çözümler üreterek sonuca giden bir yapıda çalışmaktadır. Mutasyon oranı 0,1 ve 0,01 değerlerinde, uygunluk fonksiyonu eğrileri için sürekli iyileşen çözümler elde edilememektedir. Mutasyon oranı 0,001 değerinde ise GA'nın çalışma prensiplerine uygun olarak veriler elde edilmekte ve uygun "malzeme hacmi" değeri bu parametrede elde edilmiş olmaktadır.

Çaprazlama oranı, 0,5; 0,7; 0,9 değerleri için elde edilen uygunluk fonksiyonu grafiği Şekil 6.17'de verilmiştir.



Şekil 6.17. Çaprazlama oranının uygunluk fonksiyonu sonuçlarına etkileri

Grafikte görüldüğü gibi, uygunluk fonksiyonunun en küçük değerine 0,7 çaprazlama oranında ulaşılmaktadır. Sonrasında 0,9 çaprazlama oranında, 0,7 çaprazlama oranına yakın değerler elde edilmektedir. 0,5 çaprazlama oranında ise uygunluk fonksiyonu daha büyük değerler elde edilmektedir. Grafiğe göre 0,7 çaprazlama oranı en düşük uygunluk fonksiyonunu vermektedir.

GA ile tek kademeli mekanizma $i=2$ için program çalıştırılmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 6.4’de verilmiştir. Çizelgede tek kademe için farklı iletim oranlarında elde edilen dişli çark parametreleri ve hacimleri görülmektedir.

Çizelge 6.4. GA ile çözüm, helisel dişli çark, tek kademe parametre ve değişkenleri

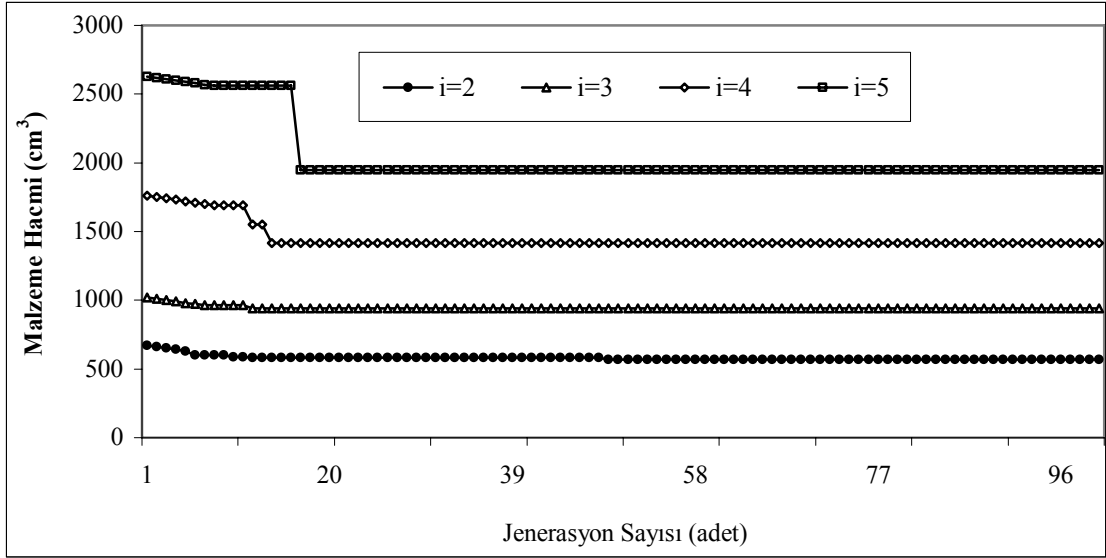
Güç (kW)	Giriş Devri (dv/dk)	Çıkış Devri (dv/dk)	İletim Oranı	Modül (mm)	Pinyon	Çark	Diş Geniş. (mm)	Min. Malz. Hacmi (cm³)
7.5	1800	360	5	2,25	20	100	45	1947,13
7.5	1800	450	4	2,25	21	84	45	1417,25
7.5	1800	600	3	2,25	22	66	45,48	939,93
7.5	1800	900	2	2,25	23	46	48,87	568,85

Bu çizelgede görüldüğü gibi, aynı güç ve giriş devri için küçük iletim oranlarında, küçük “malzeme hacmi” değerlerinde tasarımlar elde edilmektedir.

Tek kademe $i=2$ için GA ile elde edilen malzeme hacmi ve tasarım değişkenleri, GA tek kademeli mekanizma sonuç menüsünde görülmektedir (Ek 11).

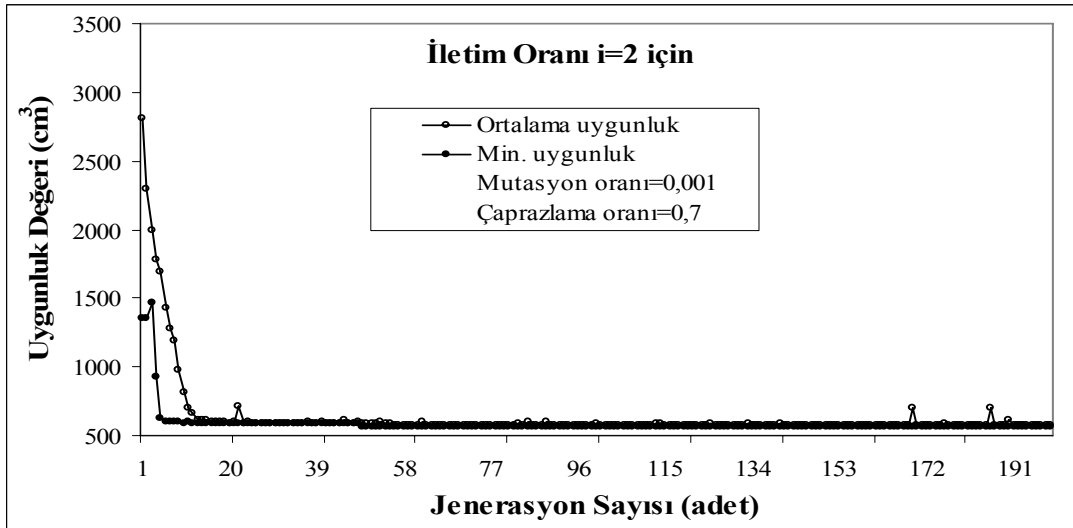
Tek kademeli helisel dişli çark mekanizması için GA ile farklı iletim oranlarında çözüm yapıldığında, jenerasyon sayısına bağlı olarak malzeme hacmi değerlerinin değişimi ve birbirleri ile kıyaslanması Şekil 6.18’de verilmiştir.

Bu grafikte, malzeme hacmi değerleri analitik çözümde elde edilen değerlerin dağılımının tam tersine sapmalar göstermeden, bir başlangıç noktasından sürekli iyileşen çözümler şeklinde elde edilmiştir. Ayrıca analitik çözüm de olduğu gibi burada da küçük iletim oranlarında elde edilen malzeme hacimlerinin diğer iletim oranlarından elde edilen hacimlerden daha küçük olduğu görülmektedir.



Şekil 6.18. GA çözüm, helisel dişli çark, tek kademe, , farklı iletim oranlarındaki malzeme hacmi değişimi

Tek kademe GA çözüm $i=2$ için jenerasyon sayısına bağlı uygunluk fonksiyonu değişimini gösteren grafik ise Şekil 6.19'da verilmiştir.

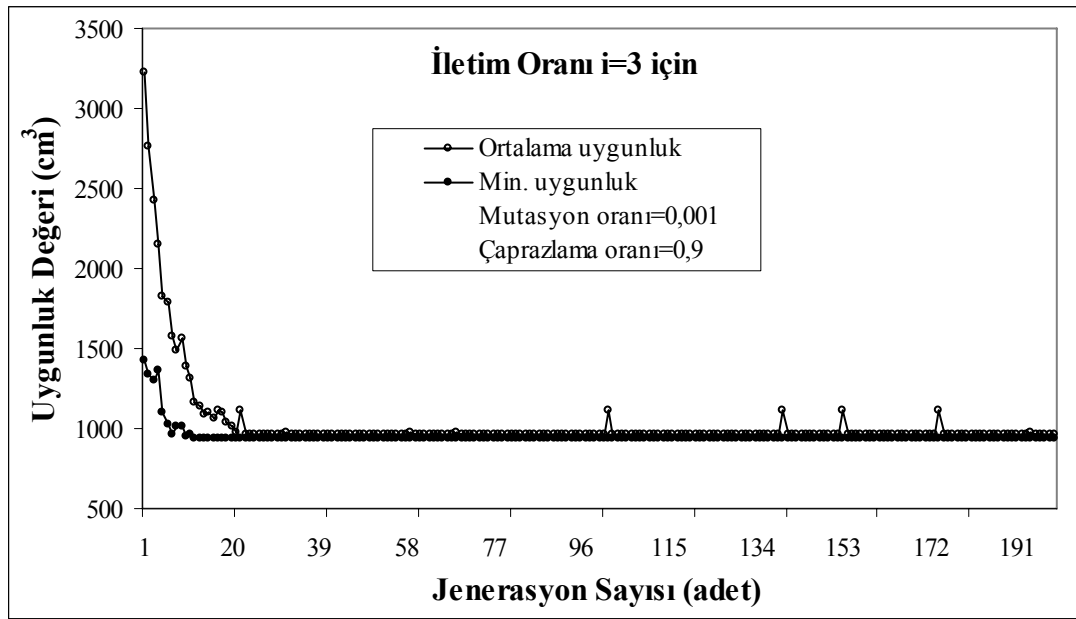


Şekil 6.19. GA çözüm, helisel dişli çark, tek kademe, $i=2$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı

Bu grafikte ortalama uygunluk değeri 26. jenerasyonda minimum uygunluk grafiği ile paralel hale gelmiş ve uygun sonuç burada elde edilmiş olup diğer

jenerasyonlarda da aynı değerler elde edilmiştir. Ancak 51. jenerasyondan sonra tekrar her iki eğride düşme görülmüş ve aynı eğilim ile devam etmiştir.

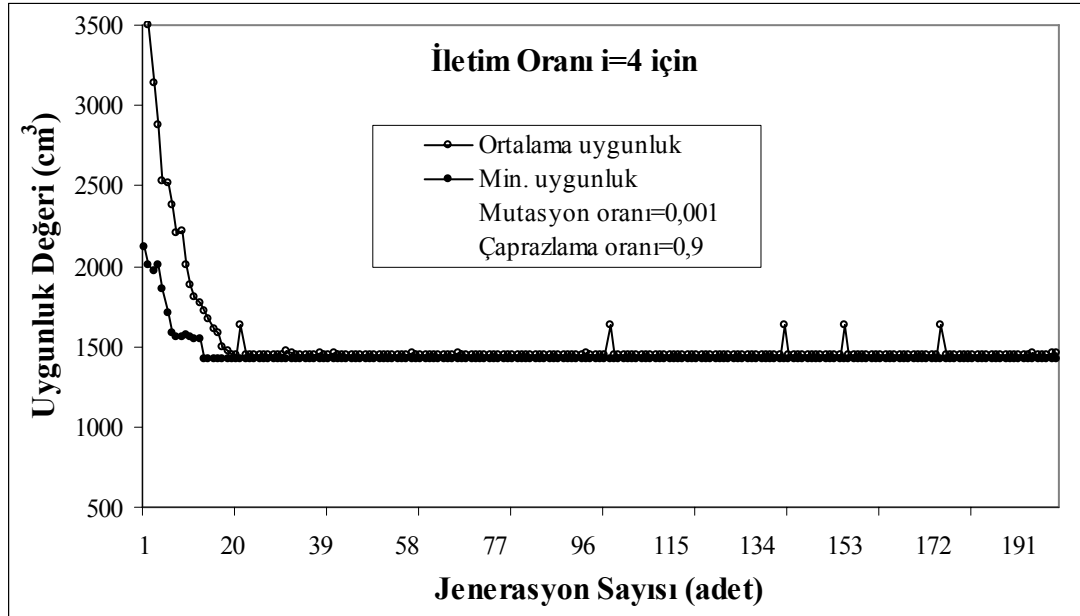
İletim oranı 3 için GA çözüm, jenerasyon sayısına bağlı uygunluk fonksiyonu değişimini gösteren grafik ise Şekil 6.20’de verilmiştir.



Şekil 6.20. GA çözüm, helisel dişli çark, tek kademe, $i=3$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı

Bu grafikte minimum uygunluk değeri 14. jenerasyona kadar sapmalar gösterip değer almış ve bu jenerasyondan sonra değişmeden devam etmiştir. Ortalama uygunluk değeri ise 25. jenerasyona kadar sapmalar göstermiş buradan sonra minimum uygunluk değeri ile paralel bir şekilde devam etmiştir. Bu eğriler 0,9 çaprazlama oranı ile elde edilmiştir.

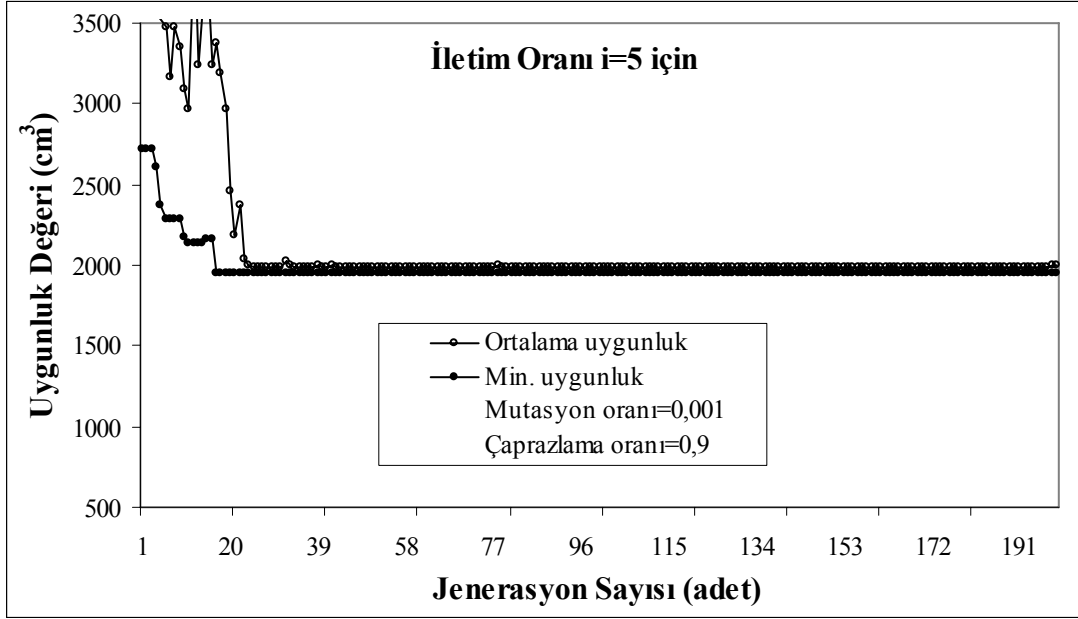
İletim oranı 4 için GA çözüm, jenerasyon sayısına bağlı uygunluk fonksiyonu değişimini gösteren grafik ise Şekil 6.21’de verilmiştir.



Şekil 6.21. GA çözüm, helisel dişli çark, tek kademe, $i=4$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı

Grafikte, minimum uygunluk değeri sapmalar gösterip 16 . jenerasyona kadar farklı değerler almış ancak bu jenerasyondan sonra değişmeden sabit bir değerde devam etmiştir. Ortalama uygunluk değeri ise 25. jenerasyonda minimum uygunluk ile paralellik gösteren değerler almış ve bu şekilde çözüme gidilmiştir.

İletim oranı 5 için GA çözüm, jenerasyon sayısına bağlı uygunluk fonksiyonu değişimini gösteren grafik ise Şekil 6.22’de verilmiştir.



Şekil 6.22. GA çözüm, helisel dişli çark, tek kademe, $i=5$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı

Grafikte, minimum uygunluk değeri sapmalar gösterip 19 jenerasyona kadar farklı değerler almış ancak bu jenerasyondan sonra değişmeden sabit bir değerde devam etmiştir. Ortalama uygunluk değeri ise 27. jenerasyonda minimum uygunluk ile paralellik gösteren değerler almış ve bu şekilde çözüme gidilmiştir. Grafikte minimum ve ortalama uygunluk eğrilerinin birbirine paralel şekilde eğilim göstermeleri GA'nın performansının iyi yönde devam ettiğini ve uygun sonuca gidildiğini göstermektedir.

6.2.2. GA ile iki kademeli helisel dişli çark tasarımı

Helisel dişli çark iki kademe için, tek kademeli çözümde anlatılan (Bkz. Bölüm 6.2.1) bilgiler geçerli olup, GA ile çözümler elde edilmiştir. İki kademeli helisel dişli çarkların GA ile tasarımı, "malzeme hacmi" amaç fonksiyonu için, belirlenmiş olan değişkenlere ve sınırlama fonksiyonlarına bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Analitik çözümde olduğu gibi GA ile de iki kademe için iletim oranı 6, 11, 16, 21 değerlerinde çözümler elde edilmiştir.

GA ile iki kademeli mekanizma için program çalıştırılmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 6.5’de verilmiştir. Çizelgede iki kademe için farklı iletim oranlarında elde edilen dişli çark parametreleri ve hacimleri görülmektedir.

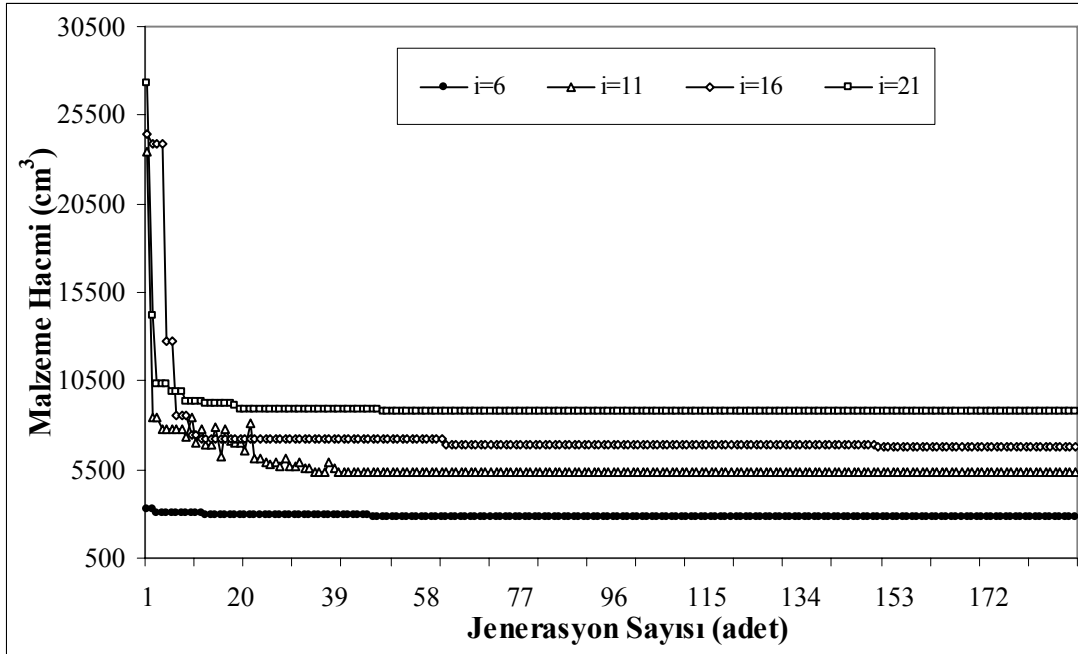
Çizelge 6.5. GA ile çözüm, helisel dişli çark, iki kademe parametre ve değişkenleri

Güç (kW)	Giriş Devri (dv/dk)	Çıkış Devri (dv/dk)	İletim Oranı	Modül (mm)	Pinyon	Çark	Diş Geniş. (mm)	Min. Malz. Hacmi (cm ³)
7.5	1800	85,7	21	2,5	17	117	50	8790,98
				4	22	67	78	
7.5	1800	112,5	16	2,5	17	89	54	6758,45
				305	23	70	80	
7.5	1800	163,6	11	2	22	75	64	5395,69
				305	22	71	72	
7.5	1800	300	6	2	22	57	69,03	2849,76
				3	24	56	69,03	

Bu çizelgede görüldüğü gibi, aynı güç ve giriş devri için küçük iletim oranlarında, küçük “malzeme hacmi” değerlerinde tasarımlar elde edilmektedir.

İki kademe $i=6$ için GA ile elde edilen malzeme hacmi ve tasarım değişkenleri, GA iki kademeli mekanizma sonuç menüsünde görülmektedir (Ek 12).

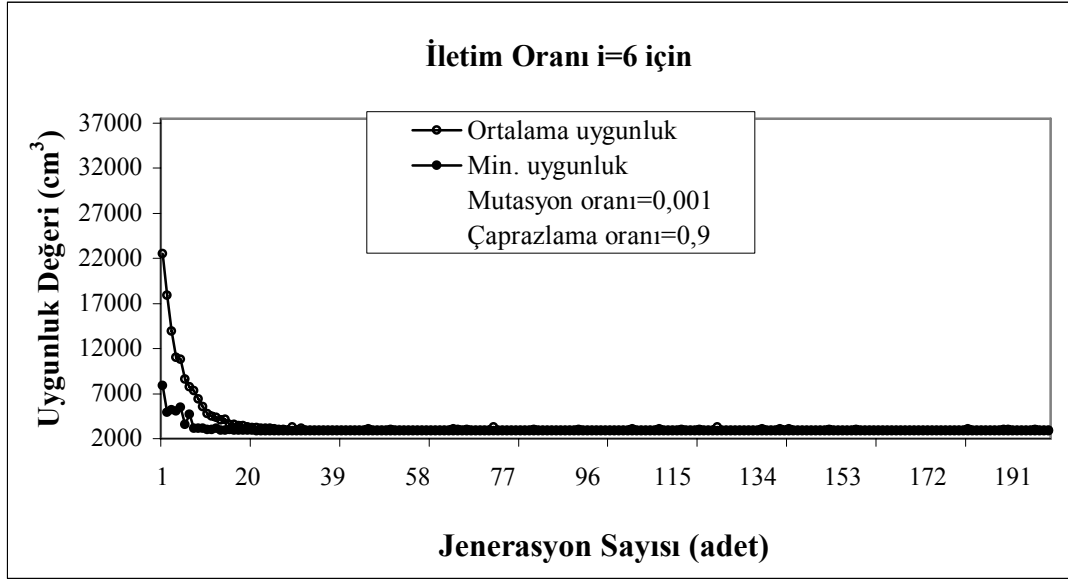
İki kademeli helisel dişli çark mekanizması için GA ile farklı iletim oranlarında çözüm yapıldığında, jenerasyon sayısına bağlı olarak malzeme hacmi değerlerinin değişimi ve birbirleri ile kıyaslanması Şekil 6.23’de verilmiştir.



Şekil 6.23. GA çözüm, helisel dişli çark, iki kademe, farklı iletim oranlarındaki malzeme hacmi değişimi

Bu grafikte, malzeme hacmi değerleri analitik çözümde elde edilen değerlerin dağılımından farklı olarak, bir başlangıç noktasından sürekli iyileşen çözümler şeklinde elde edilmiştir. Ayrıca analitik çözüm de olduğu gibi burada da küçük iletim oranlarında elde edilen malzeme hacimlerinin diğer iletim oranlarından elde edilen hacimlerden daha küçük olduğu görülmektedir.

İki kademe GA çözüm $i=6$ için jenerasyon sayısına bağlı uygunluk fonksiyonu değişimini gösteren grafik ise Şekil 6.24’de verilmiştir.

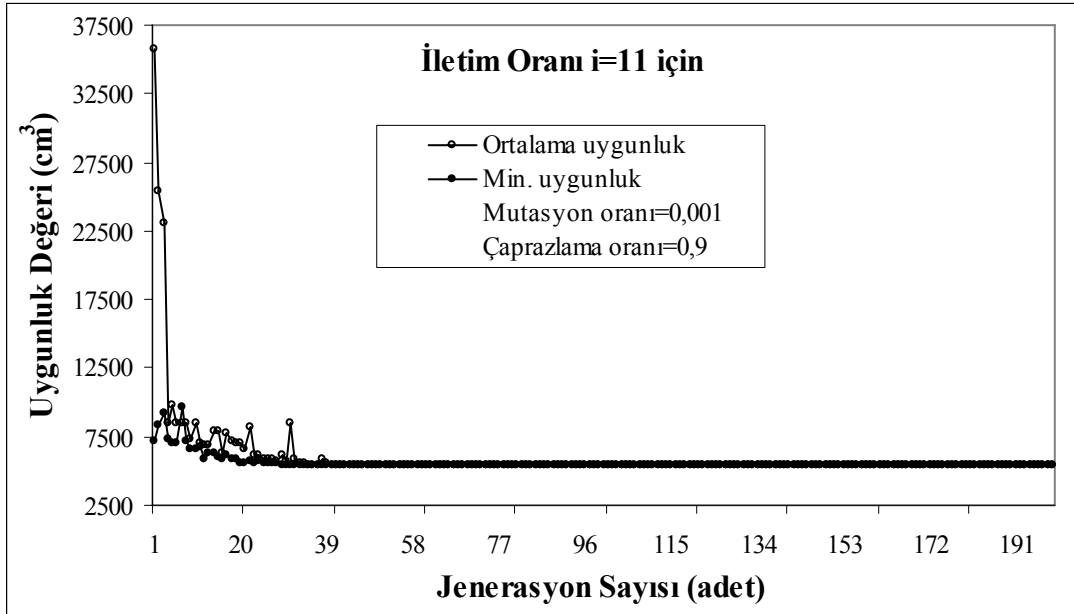


Şekil 6.24. GA çözüm, helisel dişli çark, iki kademe, $i=6$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı

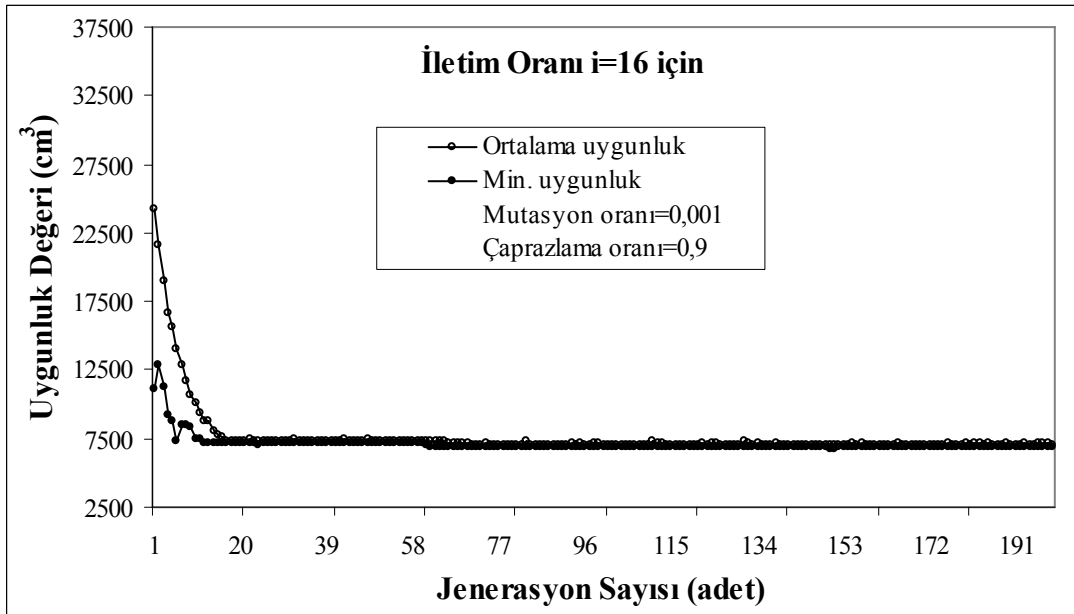
Bu grafikte, 40. jenerasyona kadar ortalama uygunluk değerinde sapmalar olmakta ancak buradan sonra minimum uygunluk ile paralel olacak şekilde değerler almakta ve uygun sonuç bulunmaktadır.

İki kademeli mekanizma iletim oranları 11, 16 ve 21 değerleri içinde uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımları Şekil 6.25, Şekil 6.26 ve Şekil 6.27'de verilmiştir.

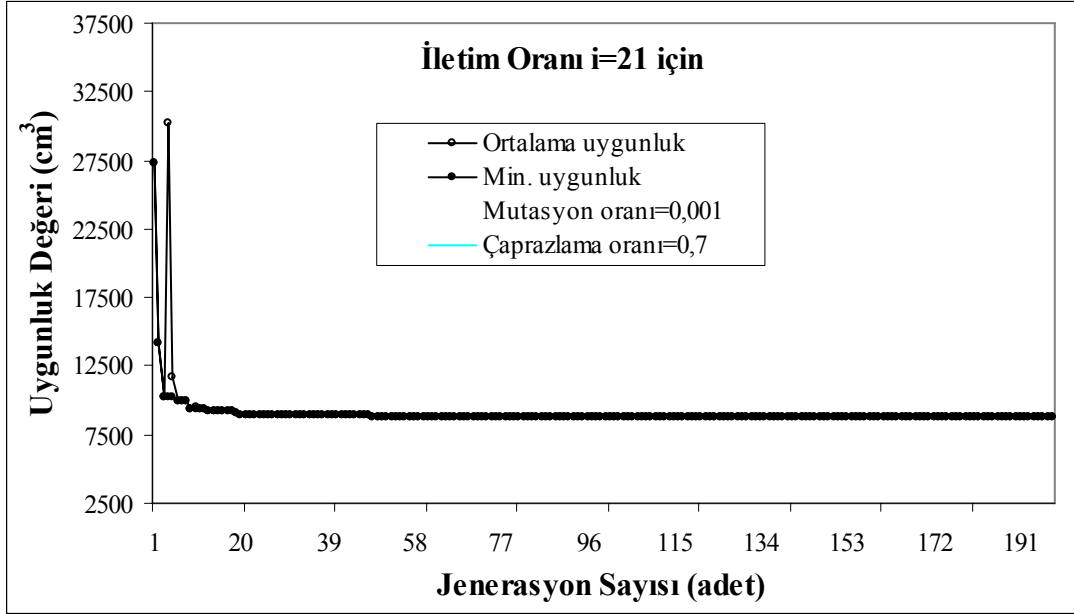
Bu grafiklerde de ortalama uygunluk eğrilerinin jenerasyon sayısı sürecinde göstermiş olduğu dağılım ve bunların minimum uygunluk eğrileri ile nasıl bir yaklaşım gösterdikleri görülmektedir. Ancak bu grafiklerde ortalama uygunluk eğrileri jenerasyonun ileri aşamalarında az da olsa sapmalar göstermişlerdir.



Şekil 6.25. GA çözüm, helisel dişli çark, iki kademe, $i=11$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı



Şekil 6.26. GA çözüm, helisel dişli çark, iki kademe, $i=16$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı



Şekil 6.27. GA çözüm, helisel dişli çark, iki kademe, $i=21$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı

6.3. Konik Dişli Çarkların GA ile Tasarımı

Analitik çözümde kullanılan girdi parametreleri ve sınırlama fonksiyonları ile konik dişli çifti mekanizmaları GA ile çözülmüştür. Konik dişlinin GA ile çözüm işleminde konik pinyon diş sayısı 4 bit ve çark diş sayısı da 7 bit olarak tasarımda dikkate alınmıştır. Malzeme olarak da 16MnCr5 sembolü sementasyon çeliği seçilmiştir.

GA ile iki kademeli konik dişli çark mekanizmaları çözülmüş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 6.6'da verilmiştir. Konik dişli çark mekanizmalarının GA ile çözümünde eğilme, aşınma ve yüzey genişliği sınırlamaları dikkate alınarak çözüm elde edilmiştir.

Tabloda verilen değerler eğilme ve aşınma sınırlamalarını sağlarken yüzey genişliği sınırlamalarını sağlamamaktadır. Konik-düz dişli mekanizmasında, ikinci kademe olan düz dişli tasarımı yüzey genişliğini sağlamazken, konik-helis dişli mekanizmasında ise birinci kademeyi oluşturan konik dişli tasarımı yüzey genişliğini sağlamamaktadır.

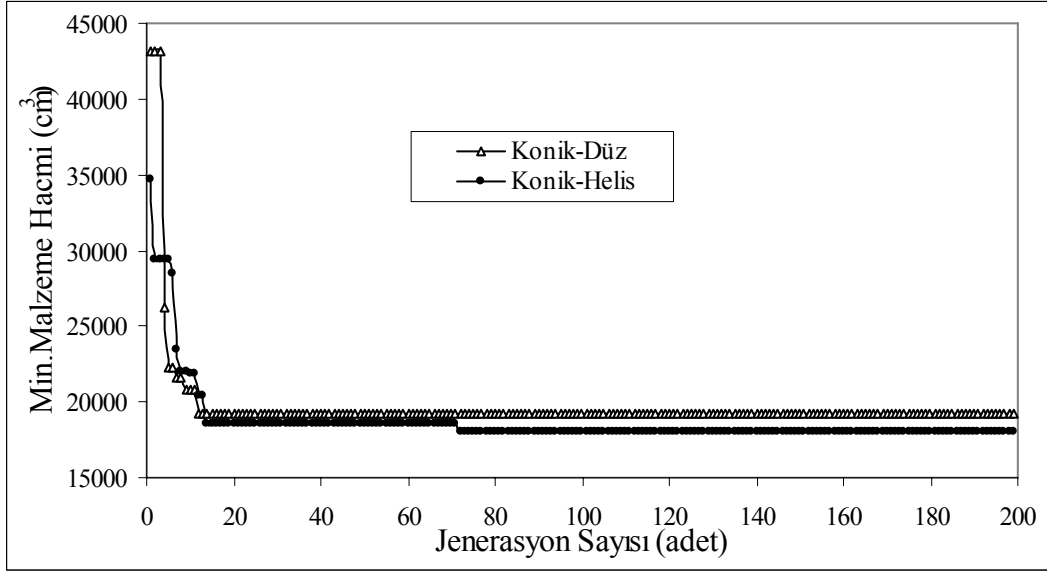
Çizelge 6.6. GA çözüm, iki kademe konik-düz ve konik-helis çifti, parametre ve değişkenleri

Konik Tipi	Güç (kW)	Giriş Devri (dv/dk)	Çıkış Devri (dv/dk)	İletim Oranı	Modül (mm)	Pinyon	Çark	Diş Geniş. (mm)	Min. Malz. Hacmi (cm ³)
Kon	7.5	1800	60	30	4,5	18	124	20	19223,77
Düz					5	21	91	78	
Kon.	7.5	1800	60	30	3	17	108	46	18017,43
Hel.					4	24	113	80	

Konik-düz dişli çiftinin $i=30$ iletim oranı için GA çözüm sonuç ekranı ve değerleri verilmiştir (Ek 13).

Çizelge 6.6'da değerleri verilen konik-düz ve konik-helis dişli çiftlerinin GA çözümü ile elde edilen malzeme hacminin jenerasyon sayısına bağlı olarak değişimi ve konik dişlinin düz ve helis dişli ile kullanımı sonucunda oluşan malzeme farklılığı Şekil 6.28'de verilen grafikte görülmektedir.

Grafiğe göre konik dişlinin helis dişli ile kullanımı sonucunda düz dişlilere oranla daha düşük malzeme hacminde tasarım elde edildiği görülmektedir.



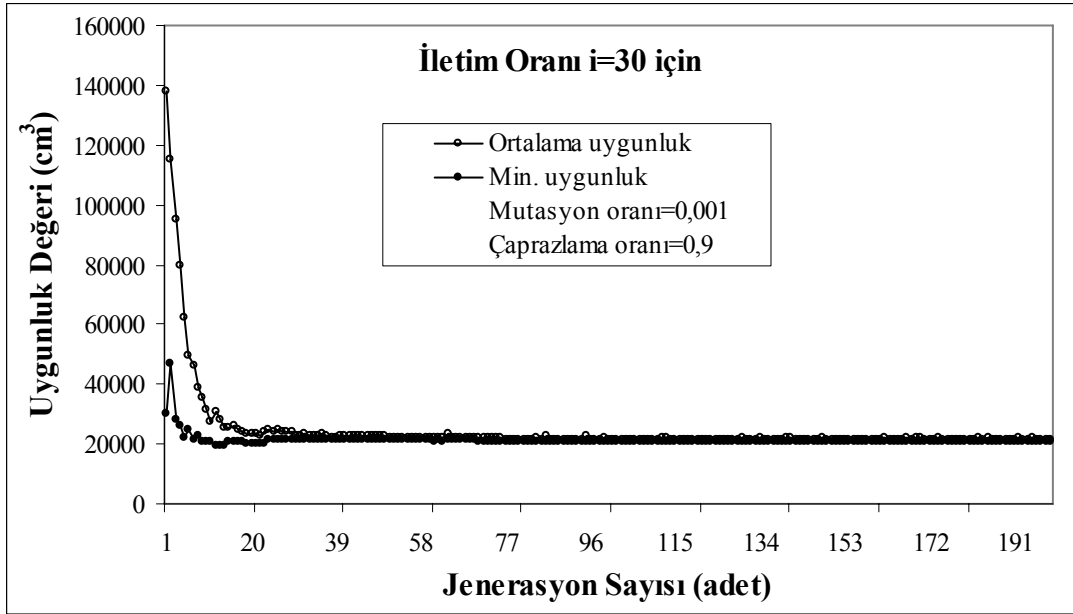
Şekil 6.28. GA çözüm, konik-düz ve konik-helis çifti $i=30$ için malzeme hacmi değişimi.

Bu grafiğe göre konik~helis çifti ile elde edilen malzeme hacmi, konik~düz çifti ile elde edilen malzeme hacminden daha küçüktür. Ayrıca konik~helis çifti jenerasyon dağılımında 75. jenerasyonda tekrar iyileşme göstermekte ve malzeme hacmi düşmektedir.

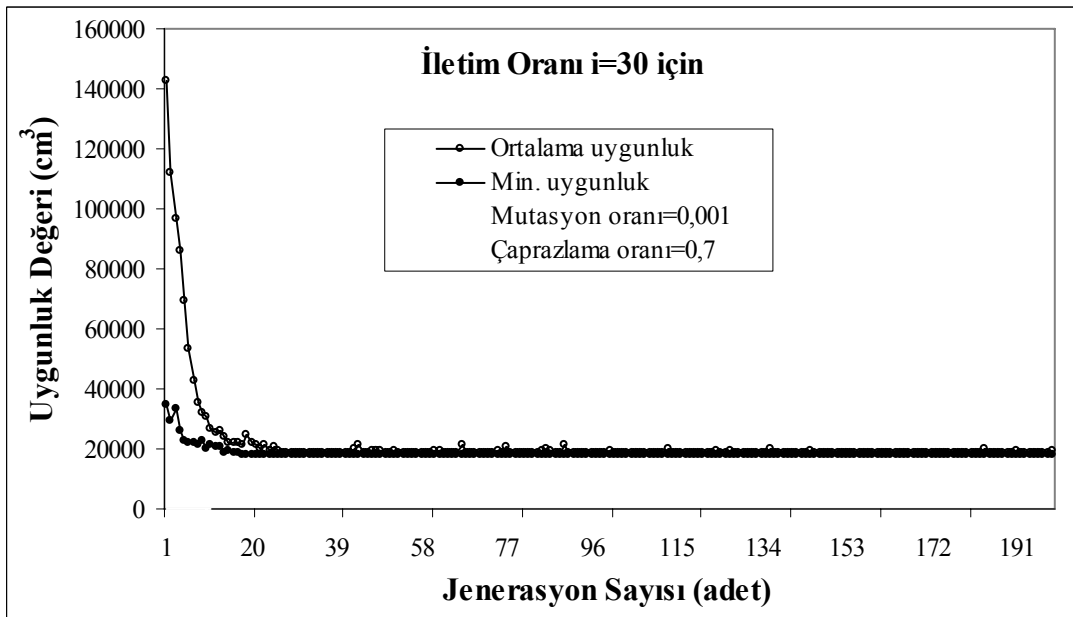
Konik-düz ve konik-helis dişli çiftinin uygunluk fonksiyonunu değişimini gösteren grafik Şekil 6.29'da ve Şekil 6.30.da verilmiştir.

Şekil 6.29'da konik~düz dişli çifti için elde edilen uygunluk fonksiyonu jenerasyon sayısı dağılımı 0,9 çaprazlama oranında elde edilmiştir.

Şekil 6.30'da konik~helis dişli çifti için elde edilen uygunluk fonksiyonu jenerasyon sayısı dağılımı 0,7 çaprazlama oranında elde edilmiştir.



Şekil 6.29. GA konik-düz dişli çifti $i=30$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı

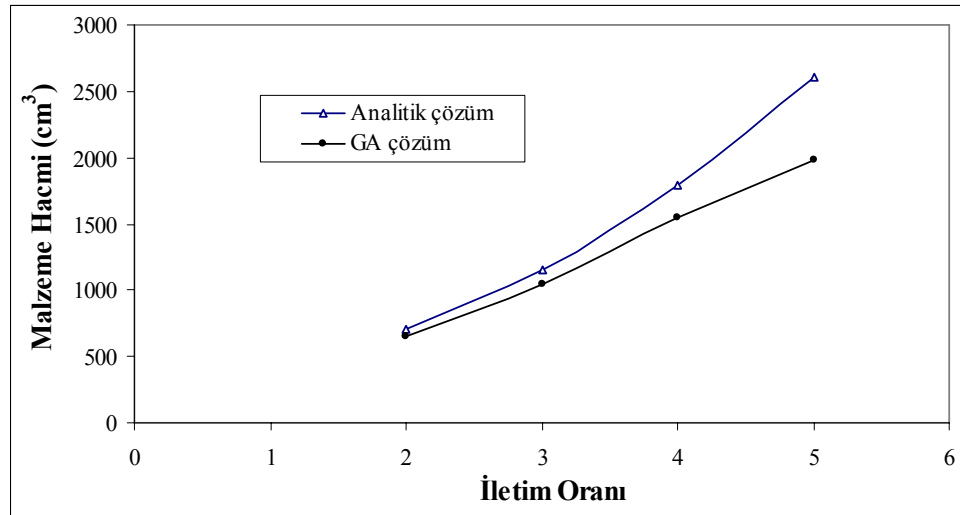


Şekil 6.30. GA konik-helis dişli çifti $i=30$ için uygunluk fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre dağılımı

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Düz dişli çarkların Analitik yaklaşımlı tek ve iki kademe ve GA ile tek ve iki kademe tasarlanması sonucunda elde edilen çözümler önceki bölümlerde çizelge ve şekiller ile ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Burada önceki bölümlerde elde edilen tek ve iki kademe tasarımların Analitik yaklaşım ve GA ile çözümünün karşılaştırılması yapılacaktır. Buna göre tek kademeli bir mekanizma için Analitik yaklaşımlı ve GA ile çözüm minimum malzeme hacmi değerlerinin kıyaslanması Şekil 7.1’de görülmektedir.



Şekil 7.1. Düz dişli çark, Analitik yaklaşımlı ve GA ile çözüm, tek kademe, minimum malzeme hacmi karşılaştırılması

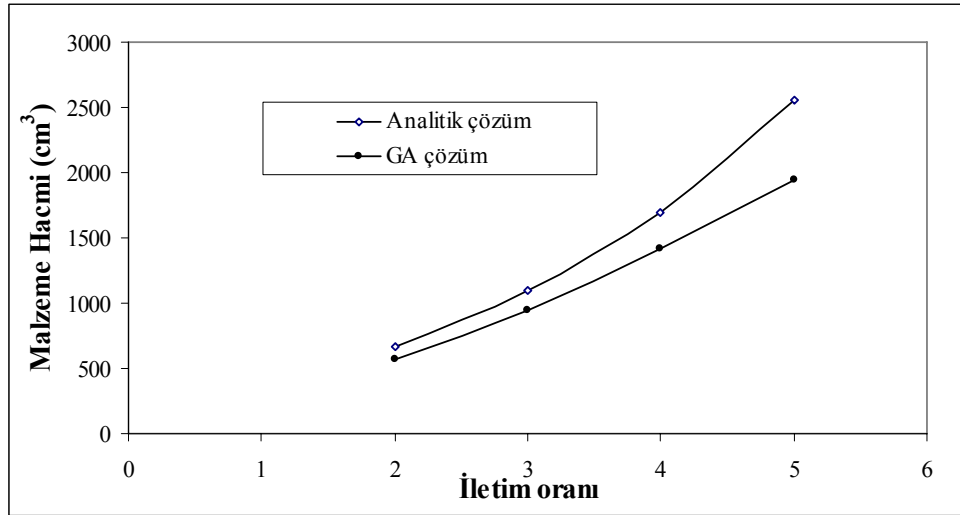
Şekil 7.1’de GA ile elde edilen minimum malzeme hacmi değerlerinin Analitik yaklaşımla elde edilen çözüm değerlerinden küçük olduğu görülmektedir. Grafikten ayrıca iletim oranı arttıkça GA ile elde edilen malzeme hacmi değerlerinin Analitik yaklaşımlı çözüm ile elde edilen değerlerden daha küçük olduğu görülmektedir. Tek kademeli düz dişli mekanizmasının Analitik yaklaşımlı ve GA ile çözümleri sonucunda elde edilen malzeme hacmi değerlerinin % olarak değişimi Çizelge 7.1’de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Analitik yaklaşımlı ve GA ile çözüm, düz dişli çark, tek kademe, %'de malzeme hacmi değişimi

İletim oranı	Analitik Çözüm Hacim (cm ³)	GA Çözüm Hacim (cm ³)	%'de Değişim
5	2604,77	1979,07	24
4	1795,81	1546,39	13,88
3	1148,06	1049,59	8,57
2	701,20	646,67	7,77

Helis dişli çarkların Analitik yaklaşımlı olarak tek ve iki kademeli tasarlanması ve GA ile tek ve iki kademeli tasarlanması sonucunda elde edilen veriler önceki bölümlerde tablo ve grafik şeklinde sunulmuştur.

Burada önceki bölümlerde elde edilen tek ve iki kademe tasarımların Analitik ve GA karşılaştırılması yapılmıştır. Buna göre tek kademeli bir mekanizma için Analitik yaklaşım ve GA ile çözüm minimum malzeme hacmi değerlerinin kıyaslanması Şekil 7.2'de görülmektedir.



Şekil 7.2. Helis dişli çark, Analitik yaklaşımlı ve GA ile çözüm, tek kademe, minimum malzeme hacmi karşılaştırılması

GA ile elde edilen minimum malzeme hacmi değerlerinin Analitik yaklaşımlı çözümden elde edilen değerlerden küçük olduğu görülmektedir.

Grafiğe göre (Bkz. Şekil 7.2) Analitik çözüm ile GA çözümden elde edilen malzeme hacmi değerlerinin % değişimi ise Çizelge 7.2’de verilmiştir.

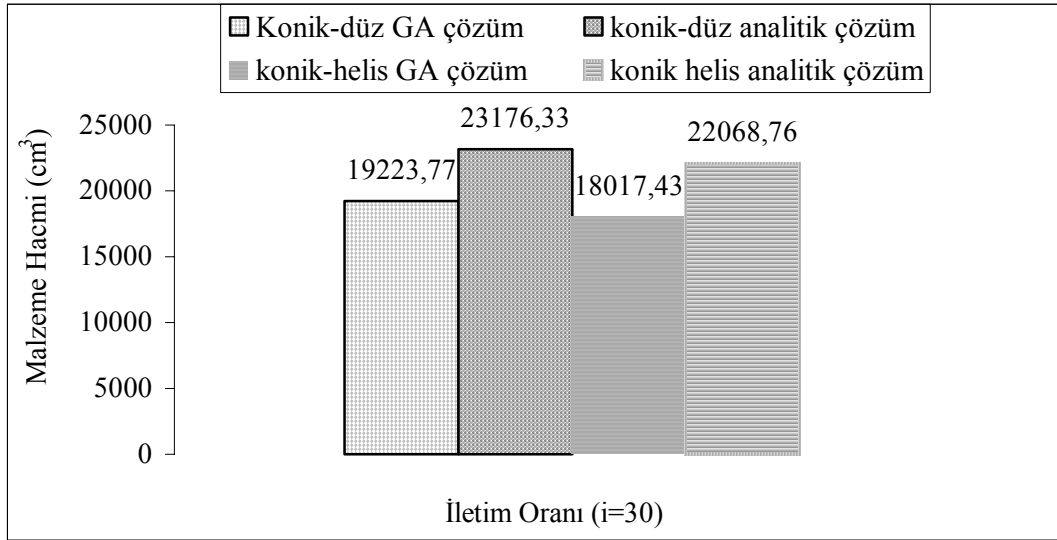
Çizelge 7.2. Analitik yaklaşımlı ve GA ile çözüm, helisel dişli çark, tek kademe, %’de malzeme hacmi değişimi

İletim Oranı	Analitik Çözüm Hacim (cm³)	GA Çözüm Hacim (cm³)	%’de Değişim
5	2559,81	1947,13	23
4	1691,94	1417,25	16
3	1100,18	939,93	14,56
2	660,38	568,85	13,86

Konik dişli çarklar, konik-düz ve konik-helis olmak üzere iki kademedan meydana gelen tasarım şekillerinin $i=30$ için Analitik yaklaşımlı ve GA çözümleri önceki bölümlerde sunulmuştur.

Bu bölümde konik dişli mekanizmalarının Analitik yaklaşımlı çözümleri ve GA çözümleri ile elde edilen malzeme hacmi değerlerinin kıyaslanması yapılacaktır. Buna göre konik-düz ve konik-helis dişli çiftinin Analitik yaklaşımlı ve GA karşılaştırılması grafik olarak Şekil 7.3’de verilmiştir.

Grafik incelendiğinde konik dişli mekanizmasının Analitik çözümünden elde edilen malzeme hacminin GA ile elde edilen malzeme hacmi değerinden büyük olduğu görülmektedir. Ayrıca konik mekanizmasının düz ve helis ile oluşturduğu dişli çifti açısından bakıldığında yine GA ile elde edilen sonuçların Analitik yaklaşımlı çözümden elde edilen sonuçlardan daha küçük olduğu görülmektedir.



Şekil 7.3. Konik dişli çark, tek kademe, Analitik yaklaşımlı ve GA ile çözüm, minimum malzeme hacmi karşılaştırılması

Konik dişli mekanizması tipleri için elde edilen analitik ve GA malzeme hacmi değerlerinin % olarak değişimi ise Çizelge 7.3’de verilmiştir.

Çizelge 7.3. Konik-düz ve konik-helis, analitik çözüm ve GA çözüm % malzeme hacmi değişimi

Konik Tipi	İletim Oranı	Analitik Çözüm Hacim (cm ³)	GA Çözüm Hacim (cm ³)	% Değişim
Konik-Düz	30	23176,33	19223,77	17
Konik-Helis	30	22068,76	18017,43	18

GA ile dişli tasarımı konulu bu çalışma, düz, helis ve konik dişli çarklara uygulanmış ve sonuçlar elde edilmiştir. Analitik yaklaşımlı çözümden elde edilen sonuçlar ile GA ile çözümden elde edilen sonuçlara bakıldığında GA ile yapılan tasarım işleminin Analitik yaklaşımlı sonuçlara yakın ve hatta daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Özellikle bu çalışmada ele alınan doğrusal olmayan değişkenlerin çok amaçlı ve sınır şartlı çözümünde, GA’lar ile daha iyi sonuçlar elde edilebilmektedir. Geleneksel optimizasyon yöntemlerinde yerel optimizasyon araştırılmakta ve bu değer bulunduğu işlem sonlandırılmaktadır. Geleneksel yöntemlerin aksine GA ile yapılan dişli tasarımında yerel optimizasyon değil genel optimizasyon işlemi

gerçekleştirilmiş ve arama uzayı burada çok daha geniş bir alanı kapsadığından, geleneksel yöntemlerde elde edilen sonuçlar burada da elde edildiği gibi daha iyi sonuçlar da elde edilebilmektedir.

GA ile tasarımı yapılan düz dişli, helis dişli ve konik dişli çark mekanizmalarında uygun sonuçlar elde edilmesinde GA parametre değerlerinin büyük önem taşıdığı görülmüştür. Çünkü parametre değerleri GA'nın arama uzayını oluşturmakta ve bu değerler ne kadar uygun seçilirse sonuçlarda o kadar uygun olmaktadır. Ancak burada şuna da dikkat etmek gerekli ki, o da parametre değerleri birbirinden çok bağımsız ve rastgele olarak seçilirse, bunun sonucunda GA'nın tarama sürecinde artacak ve sonuca ulaşması da zaman alacaktır.

Analitik yaklaşım ile çözüm elde edilirken sınırlama fonksiyonları olarak eğilme, aşınma mukavemeti ve diş genişliği dikkate alınmış, ayrıca makine elemanları kaynaklarında geçen, dişli tasarım işleminde, genellikle 1. kademedeki iletim oranının 2. kademedeki iletim oranından büyük alınması ($i_1 > i_2$) kabulüne göre işlem gerçekleştirilmiştir. GA ile çözüm işleminde ise $i_1 > i_2$ kabulü dikkate alınmadan sadece eğilme, aşınma mukavemeti ve diş genişliği sınırlama fonksiyonu olarak dikkate alınmış ve , i_1 ve i_2 ise değişkenlerin ve sınırlama fonksiyonlarının aralık değerlerine göre GA'nın kendisi tarafından bulunması istenmiştir. Bu şartlarda gerçekleştirilen GA ile çözüm sonucunda elde edilen minimum malzeme hacmi değerleri, analitik yaklaşım ile elde edilen minimum malzeme hacmi sonuçlarından küçük çıkmaktadır.

Bu çalışma göstermiştir ki; GA'lar çözümü istenilen problemin sınırlarının çok iyi belirlenmesi, amaç fonksiyonunun çok iyi seçilmesi, sınırlama fonksiyonlarının uygun olarak belirlenmesi ve değişkenlerin sınırlılıklarının uygun tanımlanması ile mekanik tasarım sürecinde, kavramsal tasarımdan son tasarıma, tasarımdan analize, analizden üretime kadar geçen tüm süreçlerde rahatlıkla kullanılabilir ve etkin çözümler elde edilebilir.

Gerçekleştirilen bu çalışma ile daha çok kısıtsız optimizasyon problemlerine uygulanan GA'ların kısıtlı optimizasyon problemlerine de rahatlıkla uygulanabileceği ve özellikle tasarım işlemlerinde etkili bir şekilde kullanılacak bir arama ve optimizasyon yöntemi olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada düz dişli, helis dişli ve konik dişli çark mekanizmaları minimum malzeme hacmi amaç fonksiyonu olmak üzere, eğilme mukavemeti, aşınma mukavemeti, minimum pinyon diş sayısı ve yüzey genişliği sınırlama fonksiyonlarına bağlı olarak tasarlanmış ve çözüm gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu çalışma ile sanayide, istenilen özelliklerde bir hız kutusu tasarımını, yine istenilen amaç ve sınırlama fonksiyonlarına bağlı olarak uygun bir şekilde gerçekleştirme ve değişiklikleri ise eş zamanlı olarak görme imkanı sağlanmıştır.

Gerçekleştirilen bu tez çalışması, hız kutusu için dişli tasarımını içermektedir. Ancak bu çalışma bir hız kutusu mekanizması tasarımı şeklinde, hız kutusu mekanizmasında bulunan bütün dişlilerin, millerin ve rulmanların tasarımını yapacak şekilde geliştirilebilir. Ayrıca tasarlanan dişli çarkların gerilme analizleri de sonlu elemanlar yönteminde olduğu gibi GA ile modellenerek gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

1. Ognjanovic, M., "Decisions in gear train transmission design", *Research in Engineering Design*, 8(3): 178-187 (1996).
2. Flodin, A., "Wear investigation of spur gear teeth", *TriboTest*, 7 (1): 45-60 (2000).
3. Su, D., Wakelam, M., Jambunathan, K., "Integration Of A Knowledge-Based System, Artificial Neural Networks And Multimedia for Gear Design", *Journal of Materials Processing Technology*, 107 (1-3): 53-59, (2000).
4. Chen, M., "Expert system of designing cylindrical gear transmission", *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 22 (5): 402-406 (1998).
5. Liansheng, Z.R., 1992, "Expert system for cylindrical gear reducer design", *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 26 (2): 29-38 (1992).
6. Myint, S., Tabucanon, M. T., "The framework for an expert system to generate alternative products in concurrent engineering design", *Computers in Industry*, 37 (2): 125-134 (1998).
7. Marcelin, J. L., "Genetic optimisation of gear", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17: 910-915 (2001).
8. Yokota, T., Taguchi, T. and Gen, M., "A solution method for optimal weight design problem of the gear using genetic algorithms", *Computers and Industrial Engineering*, 35 (3-4): 523-526 (1998).
9. Li, Q., Zhou, J., and Zhong, Y., "Complex genetic algorithm for mechanical dynamic optimization design", *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 35 (5): 27-30 (1999).
10. Duan, G., Zha, J., Lin, J., and Weng, Q., "Use of genetic algorithms in designing movements of clocks and watches", *Journal of Software*, 9 (7): 515-519 (1998).
11. Myint, S., "Concurrent engineering (CE) in product design: a multicriteria decision-making approach", *Concurrent Engineering Research and Applications*, 7 (1): 2-9 (1999).
12. Tan, J., Fan, W., Wei, X., and Xu, J., "Approach to graphic genetic modelon", *Journal of Computer Science and Technology*, 13: 116-123 (1998).

13. Shariat, P.M., and Toogood, R.W., "Genetic algorithm based approach to parametric design of machine components", *Intelligent Engineering Systems Through Artificial Neural Networks*, ASME, 5: 375-380 (1995).
14. Peng, Z., Yang, H., and Zhong, T., "Real-coded genetic algorithm for planetary gear transmission optimization", *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 33 (7): 833-836 (1999).
15. Fan, X., Ma, D., Yan, J., and Chen, M., "Hierarchical optimization for geometrical dimension tolerances", *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 33 (7): 829-832 (1999).
16. Gaspersic, J., and Flasker, J., "Optimisation of gear assemblies", *Journal of Mechanical Engineering*, 42 (9-10): 299-308 (1996).
17. Liu, P., Hu, Y., Yan, Y., Zheng, D., and Yang, S., "Using counter-proposal to optimize genetic algorithm based cooperative negotiation", *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Processing Systems*, ICIPS, 1: 891-895 (1998).
18. Deb, K., "A flexible optimization procedure for mechanical component design based on genetic adaptive search", *Journal of Mechanical Design Transactions of the ASME*, 120: 162-164 (1998).
19. Annicchiarico, W., Cerrolaza, M., "Finite elements, genetic algorithms and β splines: a combined technique for shape optimization", *Finite Element in Analysis and Design*, 33: 125-141 (1999).
20. Matsuoka, T.; Yamamoto, S.; Takahara, M., "Prediction of structures and mechanical properties of composites using a genetic algorithm and finite element method", *Journal of Materials Science*, 36 (1): 27-33 (2001).
21. Singha, M.K.; Ramachandra, L.S.; Bandyopadhyay, J.N., "Optimum design of laminated composite plates for maximum thermal buckling loads", *Journal of Composite Materials*, 34(23): 1982-1997 (2000).
22. Ded, K., "Genetic Algorithms for Optimization", *KanGAL Report 2001-002*, Kanpur, 1-9 (2001).
23. Chambers, L., "Practical Handbook of Genetic Algorithms, *Crc Press*, 30-95 (1995).
24. Baylar, A., Öztürk, M., ve Arslan, A., "Su Kaynakları Sistemlerinde Lineer Olmayan Problemlerin Genetik Algoritma İle Çözümü", *Pamukkale Üni. Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 4 (3): 777-785 (1998).

25. Gen, M., and Cheng, R., "Genetic Algorithms and Engineering Design", *John Wiley & Sons Inc.*, New York 10-50 (1997.)
26. Holland, J. H., "Adaptation in Natural and Artificial Systems", *University of Michigan Press*, Ann Arbor. (1975).
27. Goldberg, D. E., "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning", *Addison Wesley*, New York, (1989).
28. Ded, K., "Genetic Algorithm in Search and Optimization: The Technique and Applications", *Proceeding of International Workshop on Soft Computing and Intelligent Systems*, Calcutta India, 58-87 (1998).
29. Saruhan, H., and Rouch, K. E., "Optimization of Lubricant Film Thickness in Journal Bearings Using Genetic Algorithms", *Balkantrib Sempozyomu*, Kayseri, 367-374 (2002).
30. Altıparmak F., "Genetik Algoritmalar", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11 (3): 523-541 (1998).
31. Chan, F. T. S., Mak, K. L., Luong, L. H. S., and Ming, X. G., "Machine Component Grouping Using Genetic Algorithms", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 14: 339-346 (1998).
32. Yeniay, Ö., "An Overview of Genetic Algorithms", *Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2 (1): 37-49 (2001).
33. Gen, M., and Cheng, R., "Genetic Algorithms and Engineering Design", *John Wiley & Sons Inc.*, New York 15-35 (2000).
34. Saruhan, H., ve Uygur, İ., "Design optimization of Mechanical Systems Using Genetic Algorithms", *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7 (2): 77-84 (2003).
35. Michalewicz, Z., , "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs", *Springer-Verlag*, Berlin, 1-54 (1996).
36. Angantyr, A., "Constrained Optimization of Rotor-Bearing Systems by Evolutionary Algorithms", Licentiate Thesis, *Lulea University of Technology Department of Applied Physics and Mechanical Engineering*, Lulea, 4-23 (2004).
37. Figlali A. ve Engin O., "Genetik Algoritmalarla Akiş Tipi Çizelgelemede Üreme Yöntemi Optimizasyonu", *İstanbul Teknik Üniversitesi Dergisi*, 1-6 (2002).

38. Goldberg, D. E., and Deb, K., "A Comparison of Selection Schemes Used in Genetic Algorithms", *Foundations of Genetic Algorithms*, 69-93 (1991).
39. Rasheed, K. M., "Gado: A Genetic Algorithm for Continuous Design Optimization", Ph.D., *The Graduate School New Brunswick Rutgers, State University of New Jersey*, New Jersey, 1-28 (1998).
40. De Jong, K. A. and Spears W. M., "A Formal Analysis of The Role of Multi-Point Crossover in Genetic Algorithms", *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 5: 1-26 (1992).
41. Saruhan, H., "Design Optimization of Rotor Bearing System Using Genetic Algorithms", Ph.D. Dissertation, *University of Kentucky*, Lexington, KY., 28-38 (2001).
42. Altıparmak F., Dengiz B. and Smith A.E., "An Evolutionary Approach For Reliability Optimization in Fixed Topology Computer Networks", *Transactions On Operational Research*, 12 (1-2): 57-75 (2000).
43. Sinriech D. and Samakh E., "A Genetic Approach to the Pickup/Delivery Station Location Problem in Segmented Flow Based Material Handling Systems", *Journal of Manufacturing Systems*, 18 (2): 81-99 (1999).
44. Goldberg, D. E., "Optimal Initial Population Size for Binary-Coded Genetic Algorithms", *TCGA Report No 850001*, The Clearinghouse for Genetic Algorithms, Tuscaloosa, 25-33 (1985).
45. Schaffer, J. D. Caruana, J. D., Eshelman, L. J., and Das, R., "A Study of Control Parameters Affecting Online Performance of Genetic Algorithms for Function Optimization", *Proceeding of the Third International Conference on Genetic Algorithms*, San Mateo, Morgan Kaufman, 51-60 (1989).
46. Beasley D., Bull D. R. ve Martin R. R., "A Sequential Niche Technique For Multimodal Function Optimization", <http://www.citeseer.nj.nec.com/beasley93sequential.html>. (06.05.2002).
47. Hoffman K. ve Padberg M., "Combinatorial and Integer Optimization", <http://www.iris.gmu.edu/~khoffma/papers/newcomb1.html>. (07/05/2002).
48. Callister, D. W. Jr., "Materials science and engineering an introduction", Wiley international edition, *John Wiley&Sons Inc.*, New York, 480-491, 509-510, 517 (2002).
49. Asi, O., "SAE 8620 (21CrNiMo2) çeliğinde yüksek sıcaklıktaki sementasyon işleminin yorulma dayanımına etkisi", Doktora Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, 125 (2001).

50. TS 3350, “Dişli Çarklar - Terimler ve Semboller”, *TSE* (1979).
51. 71 TS 611, “Makinelerde Kullanılan Silindirik Dişliler İçin Tercih Edilen Modüller ve Çapsal Adımlar”, *TSE* (1974).
52. TS 612, “Genel ve Ağır Hizmet Makinalarında Kullanılan Silindirik Dişlilerin Referans Kremayeri”, *TSE* (1975).
53. Matek, W. , Muhs, D., Wittel, H., “Roloff/Matek Maschinenelemente, 10., Neubearbeitete Auflage”, *Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft GmbH*, Braunschweig, 608-615 (1986).
54. Akkurt, M., “Makine Elemanları”, Cilt II, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 13-76 (1990).
55. Dimarogonas, A. D., “Computer Aided Machine Design”, *Prentice Hall International (UK) Ltd.*, Cambridge, 555-556 (1989).
56. Bozacı, A., Kocaş, İ., Çolak, Ö. Ü., “Makina Elemanlarının Projelendirilmesi”, *Çağlayan Kitabevi*, İstanbul, 14/1-14/16 (2001).
57. Neale, M. J., “Drives and Seals - A Tribology Handbook”, *Butterworth-Heinemann Ltd*, Oxford, 17-24 (1995).

EKLER

Ek-1

Analitik yaklaşımlı çözüm programı ana menüsü

Redüktör Girdileri		Dişli Tipi		Redüktör Mekanizma Tipi		Başla
Giriş Gücü	7,5	<input checked="" type="radio"/> Düz Dişli		<input checked="" type="radio"/> Paralel Milli Mekanizma		Hacim Yazdır
Giriş Devir Sayısı	1800	<input type="radio"/> Helis Dişli		<input type="radio"/> '90' Der. Dönderilmiş Mekanizma		Tablo Listele
Çıkış Devir Sayısı	900	<input type="radio"/> Konik Dişli		<input type="radio"/> Eş Merkezli Mekanizma		Dişli Çiz
İşletme Faktörü	Tahrik Sistemi	Malzeme	İmalat Yöntemi	Helis Açısı		Dosya Kayıt
Az darbeli	Elektrik Motoru	16MnCr5	Hassas İşçilik	0		Çıkış

Ek-2

Analitik yaklaşımlı çözüm, düz dişli çark mekanizması, tek kademe, $i=2$ için sonuç menüsü

TEK KADEMELİ MEKANİZMA

1. KADEME

Dişli Parametreleri

İletim Oranı	2,00	
Modül	2,50	mm
Pinyon Diş Sayısı	24	
Çark Diş Sayısı	48	
Dişli Genişliği	45,00	mm
Eksenler Arası	90,00	mm
Mekanizma Hacmi	701,20	cm ³

Pinyon Dişlisi

Taban Dairesi Çapı	53,75	mm
Yuvarlanma Dair.Çapı	60,00	mm
Baş Dairesi Çapı	65,00	mm

Çark Dişlisi

Taban Dairesi Çapı	113,75	mm
Yuvarlanma Dair.Çapı	120,00	mm
Baş Dairesi Çapı	125,00	mm

Ek-3

Analitik yaklaşımlı çözüm, düz dişli çark mekanizması, iki kademe, $i=6$ için sonuç menüsü

İKİ KADEMELİ MEKANİZMA	
1. KADEME	
Dişli Parametreleri	
İletim Oranı	2,60
Modül	2,75 mm
Pinyon Diş Sayısı	20
Çark Diş Sayısı	52
Dişli Genişliği	49,50 mm
Eksenler Arası	99,00 mm
Mekanizma Hacmi	999,12 cm ³
Pinyon Dişlisi	
Taban Dairesi Çapı	48,13 mm
Yuvarlanma Dair.Çapı	55,00 mm
Baş Dairesi Çapı	60,50 mm
Çark Dişlisi	
Taban Dairesi Çapı	136,13 mm
Yuvarlanma Dair.Çapı	143,00 mm
Baş Dairesi Çapı	148,50 mm
2. KADEME	
Dişli Parametreleri	
İletim Oranı	2,31
Modül	3,50 mm
Pinyon Diş Sayısı	22
Çark Diş Sayısı	51
Dişli Genişliği	63,00 mm
Eksenler Arası	127,75 mm
Mekanizma Hacmi	2050,71 cm ³
Pinyon Dişlisi	
Taban Dairesi Çapı	68,25 mm
Yuvarlanma Dair.Çapı	77,00 mm
Baş Dairesi Çapı	84,00 mm
Çark Dişlisi	
Taban Dairesi Çapı	169,75 mm
Yuvarlanma Dair.Çapı	178,50 mm
Baş Dairesi Çapı	185,50 mm
Toplam Hacim	
TOPLAM MEKANİZMA MALZEME HACMİ	3049,84
ÇIKIŞ	

Analitik yaklaşımli çözüm, helisel dişli çark mekanizması, tek kademe, $i=2$ için sonuç menüsü

TEK KADEMELİ MEKANİZMA

1. KADEME

Dişli Parametreleri

İletim Oranı	2,00	
Modül	2,50	mm
Pinyon Diş Sayısı	22	
Çark Diş Sayısı	44	
Dişli Genişliği	50,00	mm
Eksenler Arası	82,50	mm
Mekanizma Hacmi	660,38	cm ³

Pinyon Dişlisi

Taban Dairesi Çapı	48,75	mm
Yuvarlanma Dair.Çapı	55,00	mm
Baş Dairesi Çapı	60,00	mm

Çark Dişlisi

Taban Dairesi Çapı	103,75	mm
Yuvarlanma Dair.Çapı	110,00	mm
Baş Dairesi Çapı	115,00	mm

ÇIKIŞ

Analitik yaklaşımlı çözüm, helisel dişli çark mekanizması, iki kademe, $i=6$ için sonuç menüsü

İKİ KADEMELİ MEKANİZMA	
1. KADEME	2. KADEME
Dişli Parametreleri	Dişli Parametreleri
İletim Oranı	2,50
Modül	2,75 mm
Pinyon Diş Sayısı	18
Çark Diş Sayısı	45
Dişli Genişliği	55,00 mm
Eksenler Arası	86,63 mm
Mekanizma Hacmi	851,87 cm ³
Pinyon Dişlisi	Pinyon Dişlisi
Taban Dairesi Çapı	42,63 mm
Yuvarlanma Dair.Çapı	49,50 mm
Baş Dairesi Çapı	55,00 mm
Çark Dişlisi	Çark Dişlisi
Taban Dairesi Çapı	116,88 mm
Yuvarlanma Dair.Çapı	123,75 mm
Baş Dairesi Çapı	129,25 mm
Dişli Parametreleri	Dişli Parametreleri
İletim Oranı	2,40
Modül	3,50 mm
Pinyon Diş Sayısı	20
Çark Diş Sayısı	48
Dişli Genişliği	70,00 mm
Eksenler Arası	119,00 mm
Mekanizma Hacmi	2008,64 cm ³
Pinyon Dişlisi	Pinyon Dişlisi
Taban Dairesi Çapı	61,25 mm
Yuvarlanma Dair.Çapı	70,00 mm
Baş Dairesi Çapı	77,00 mm
Çark Dişlisi	Çark Dişlisi
Taban Dairesi Çapı	159,25 mm
Yuvarlanma Dair.Çapı	168,00 mm
Baş Dairesi Çapı	175,00 mm
Toplam Hacim	TOPLAM MEKANİZMA MALZEME HACMİ 2860,51
	ÇIKIŞ

Analitik yaklaşımlı çözüm, konik~düz dişli çifti $i=30$ için sonuç menüsü

Sınırlama Fonksiyonları

Eğilme Mukavemeti Aşınma Mukavemeti Yüzey Genişliği Hepsi

Dişli Çark Değerleri	Dişli Çark Değerleri
Modül (m) 4,50 mm	Modül (m) 5,00 mm
Pinyon (Z1) 18 mm	Pinyon (Z1) 21 mm
Çark (Z2) 124 mm	Çark (Z2) 91 mm
Diş Genişliği (b1) 20,00 mm	Diş Genişliği (b1) 78,00 mm
Malzeme Hacmi	Malzeme Hacmi
5174,55 cm ³	14049,22 cm ³
1.Kademe	2.Kademe

1 KADEME TOPLAM MALZEME HACMİ 19223,77 cm³

Jenerasyon Geri Kapat

GA ile dişli tasarımı için hazırlanan birleşik dişli tasarım programının ana menüsü

Genetik Parametre Değerleri	Redüktör Girdileri	Dişli Tipi	Sınırlama Fonksiyonları
Populasyon Sayısı <input type="text" value="50"/>	Motor Gücü (KW) <input type="text" value="7.5"/>	<input checked="" type="radio"/> Düz Dişli	<input checked="" type="checkbox"/> Eğilme Mukavemeti
Max. Jenerasyon Sayısı <input type="text" value="200"/>	Giriş Devri (dev/dak) <input type="text" value="1800"/>	<input type="radio"/> Helis Dişli	<input checked="" type="checkbox"/> Aşınma Mukavemeti
Crossover Oranı <input type="text" value="0.9"/>	Çıkış Devri (dev/dak) <input type="text" value="900"/>	<input type="radio"/> Konik Dişli	<input checked="" type="checkbox"/> Yüzey Genişliği
Mutasyon Oranı <input type="text" value="0.001"/>			<input checked="" type="checkbox"/> Hepsi
<input type="button" value="Başla"/> <input type="button" value="Jenerasyon"/> <input type="button" value="Çıkış"/>			

GA çözüm düz dişli çark mekan imzası, $i=2$ için son jenerasyonda elde edilen kromozomlar ve değişken değerleri

646.67 cm ³	G200	j: 1)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j: 2)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j: 3)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j: 4)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j: 5)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j: 6)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j: 7)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j: 8)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j: 9)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:10)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:11)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:12)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:13)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:14)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:15)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:16)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:17)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:18)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:19)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:20)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:21)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:22)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:23)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:24)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:25)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:26)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:27)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:28)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:29)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:30)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:31)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:32)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:33)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:34)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:35)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:36)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:37)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:38)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:39)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:40)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:41)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:42)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:43)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00
646.67 cm ³	G200	j:44)	111111101000	m1= 2.50	Z1=23	Z2= 46	b1=45.00

GA ile çözüm, düz dişli çark mekanizması, tek kademe, $i=2$ için elde edilen malzeme hacmi ve tasarım değişkenleri sonuç menüsü

Sınırlama Fonksiyonları

Eğilme Mukavemeti Aşınma Mukavemeti Yüzey Genişliği Hepsi

Dişli Çark Değerleri

Modül (m) 2,50 mm

Pinyon (Z1) 23 mm

Çark (Z2) 46 mm

Diş Genişliği (b1) 45,00 mm

Malzeme Hacmi

646,67 cm³

1.Kademe

1 KADEME TOPLAM MALZEME HACMİ 646,67 cm³

Jenerasyon Geri Kapat

GA ile çözüm, düz dişli çark mekanizması, iki kademe, $i=6$ için elde edilen malzeme hacmi ve tasarım değişkenleri sonuç menüsü

Sınırlama Fonksiyonları

Eğilme Mukavemeti Aşınma Mukavemeti Yüzey Genişliği Hepsi

Değişken	1. Kademe	2. Kademe
Dişli Çark Değerleri		
Modül (m)	2,25 mm	3,50 mm
Pinyon (Z1)	21 mm	21 mm
Çark (Z2)	55 mm	48 mm
Diş Genişliği (b1)	63,23 mm	70,00 mm
Malzeme Hacmi	949,34 cm ³	2038,93 cm ³
1 KADEME TOPLAM MALZEME HACMİ		
		2988,27 cm ³

Jenerasyon **Geri** Kapat

GA ile çözüm, helisel dişli çark mekanizması, tek kademe, $i=2$ için elde edilen malzeme hacmi ve tasarım değişkenleri sonuç menüsü

Sınırlama Fonksiyonları

Eğilme Mukavemeti Aşınma Mukavemeti Yüzey Genişliği Hepsisi

Dişli Çark Değerleri

Modül (m) mm

Pinyon (Z1) mm

Çark (Z2) mm

Diş Genişliği (b1) mm

Malzeme Hacmi

cm³

1.Kademe

1 KADEME TOPLAM MALZEME HACMİ cm³

Jenerasyon **Geri** Kapat

GA ile çözüm, helisel dişli çark mekanizması, iki kademe, $i=6$ için elde edilen malzeme hacmi ve tasarım değişkenleri sonuç menüsü

Sınırlama Fonksiyonları	
<input checked="" type="checkbox"/> Eğilme Mukavemeti	<input checked="" type="checkbox"/> Aşınma Mukavemeti
<input checked="" type="checkbox"/> Yüzey Genişliği	<input checked="" type="checkbox"/> Hepsi

Dişli Çark Değerleri	Dişli Çark Değerleri
Modül (m) <input type="text" value="2,00"/> mm	Modül (m) <input type="text" value="3,00"/> mm
Pinyon (Z1) <input type="text" value="22"/> mm	Pinyon (Z1) <input type="text" value="24"/> mm
Çark (Z2) <input type="text" value="57"/> mm	Çark (Z2) <input type="text" value="56"/> mm
Diş Genişliği (b1) <input type="text" value="69,03"/> mm	Diş Genişliği (b1) <input type="text" value="69,03"/> mm
Malzeme Hacmi	Malzeme Hacmi
<input type="text" value="879,37"/> cm ³	<input type="text" value="1970,30"/> cm ³
1. Kademe	2. Kademe

1 KADEME TOPLAM MALZEME HACMI	<input type="text" value="2849,67"/> cm ³
--------------------------------------	--

Jenerasyon	Geri	Kapat
------------	-------------	-------

GA çözüm, konik~düz dişli çifti $i=30$ için elde edilen tasarım değişkenleri ve sonuç menüsü

Sınırlama Fonksiyonları	
<input checked="" type="checkbox"/> Eğilme Mukavemeti	<input checked="" type="checkbox"/> Aşınma Mukavemeti
<input checked="" type="checkbox"/> Yüzey Genişliği	<input checked="" type="checkbox"/> Hepsi

Dişli Çark Değerleri	
Modül (m)	4,50 mm
Pinyon (Z1)	18 mm
Çark (Z2)	124 mm
Diş Genişliği (b1)	20,00 mm

Malzeme Hacmi	
	5174,55 cm ³
1.Kademe	

Dişli Çark Değerleri	
Modül (m)	5,00 mm
Pinyon (Z1)	21 mm
Çark (Z2)	91 mm
Diş Genişliği (b1)	78,00 mm

Malzeme Hacmi	
	14049,22 cm ³
2.Kademe	

1 KADEME TOPLAM MALZEME HACMİ	
	19223,77 cm ³

Jenerasyon	Geri	Kapat
------------	------	-------