



**RESTORATİF DİŞ MALZEMELERİNDE
AŞINMANIN DENEYSEL VE SONLU
ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ**

Hamid ZAMANLOU

Doktora Tezi

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalı**

Prof. Dr. Sadri ŞEN

2017

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**RESTORATİF DİŞ MALZEMELERİNDE AŞINMANIN DENEYSEL
VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ**

Hamid ZAMANLOU

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalı**

**ERZURUM
2017**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**RESTORATİF DİŞ MALZEMELERİNDE AŞINMANIN DENEYSEL VE SONLU
ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ**

Prof. Dr. Sadri ŞEN danışmanlığında, Hamid ZAMANLOU tarafından hazırlanan bu çalışma 28/07/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı – Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak ~~oybirliği/oy çokluğu~~ (5/5) ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Sadri ŞEN

İmza:

Üye: Prof. Dr. Yusuf Ziya Bayındır

İmza:

Üye: Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ

İmza:

Üye: Prof. Dr. Murat Demir AYDIN

İmza:

Üye: Yrd. Doç. Dr. Ruhi YEŞİLDAL

İmza:

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 10.08.2017 tarih ve 32/34 nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Cavit KAZAZ
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Doktora Tezi

RESTORATİF DİŞ MALZEMELERİNDE AŞINMANIN DENEYSEL VE SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Hamid ZAMANLOU

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Sadri ŞEN

Aşınma, birçok endüstri sektöründe önemli bir tehlike olarak görülmektedir. Bu tehlike karşısında gerekli önlemler alınmadığı takdirde büyük hasarlara sebebiyet verecektir. Ortaya çıkan bu hasarlar ise ekonomik açıdan oldukça maliyetli bir sonuç oluşturacaktır.

Kalıcı aşınma insan dışında ve diş restoratif malzemesinde meydana gelebilecek en ciddi hasarlardan birisidir. Daha kaliteli bir diş ömrü için, dişin doğal yapısına benzer kaliteli restoratif malzemelerin seçilmesi gerekmektedir.

Çok karmaşık konu olan aşınma mekanizması ve malzemelerin aşınma davranışları üzerine araştırmalar yoğun bir şekilde sürdürülmektedir. Önceleri deneysel ağırlıklı olan araştırmalar, yüksek maliyet-uzun zaman gerektirmesinden dolayı, deneysel çalışmalara destek amacıyla bilgisayar teknolojilerindeki gelişmeler doğrultusunda artık başarılı sayısal çalışmalarda yaygın bir şekilde yapılmaktadır. Çeşitli sayısal yöntemlerin Sonlu Eleman Yöntemi olaylara ve gerçek modele uyumundaki esnekliğinden dolayı kendisine önemli bir yer edinmiştir. Böylece, klinik uygulamadan önce dişteki ve dolgudaki malzeme kaybı ve buna bağlı olarak ortaya çıkan ekonomik ve fiziki sıkıntıların önüne geçilebilme sağlanmaya çalışılmaktadır.

Bu çalışmada deneysel ve sayısal olarak (SEY) diş restoratif malzemelerindeki aşınma analizi yapılmıştır. Restoratif diş malzemelerinde aşınmanın deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesinde, indirek kompozitler, Nanohibritler, Mikrohibritler, Rezin nanoseramikler ve Feldespatikler sırasıyla aşınmaya karşı daha iyi bir direnç göstermişlerdir.

2017, 203 sayfa

Anahtar Kelimeler: Aşınma, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Diş Restoratif Malzemeleri

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

INVESTIGATION OF WEAR ON RESTORATIVE DENTAL MATERIALS BY EXPERIMENTAL AND FINITE ELEMENTS METHODS

Hamid ZAMANLOU

Ataturk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering
Division of Designing and Manufacturing

Supervisor: Prof. Dr. Sadri ŞEN

The wear of materials causes very serious problems in many industries and it can be one of the costliest issues if there is no systematic prevention.

Gradual wear of opposing teeth is a normal phenomenon in human dentition. To ensure a higher quality of life through dental health, there is a need for quality dental restorative materials to repair or replace natural teeth.

Calculate the wear on the system and material elements in recent years has been made possible with experimental method and the FEM. On this occasion, the future material losses and economic hardships are quite preventable. The Finite Element Method taken an important place, because of the flexibility of the events and the real model adaptation. Thus, before the clinical application, it is tried to prevent the material loss and the economic and physical troubles that arise due to this.

In this study, wear analysis of tooth restorative materials was performed experimentally and numerically (FEM). Wear in restorative dental materials is studied by the experimental and finite element methods, the Indirect composites, Nanohybrids, Micro-Hybrids, Resin nanoceramics and Feldespatiks show better resistance against wear, respectively.

2017, 203 pages

Keywords: Wear, Finite Element Method, Dental Restorative Material

TEŞEKKÜR

Atatürk Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora tezi olarak hazırladığım bu çalışmada, araştırmalarımı yönlendiren ve hertürlü destek ve yardımını esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Sadri ŞEN'e içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince yaptıkları yardımlardan dolayı Sayın Prof. Dr. Yusuf Ziya BAYINDIR, Sayın Prof. Dr. Murat Demir AYDIN, Sayın Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ Sayın Yrd. Doç. Dr Ruhi YEŞİLDAL, Sayın Prof. Dr. Mustafa TOPARLI ve Sayın Araştırma Görevlisi Dr. Filiz KARABUDAK'a teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmalarım süresince, göstermiş oldukları büyük sabır ve özveriyle bana destek olan anne, baba, abi ve değerli eşime şükranlarımı sunarım.

Hamid ZAMANLOU

Temmuz, 2017

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç	8
1.2. Kapsam.....	9
2. KURAMSAL TEMELLER.....	11
2.1. Sürtünme	11
2.1.1. Sürtünmenin sınıflandırılması	13
2.1.1.a. Kuru sürtünme	13
2.1.1.b. Sınır sürtünmesi.....	15
2.1.1.c. Sıvı sürtünme	16
2.1.1.d. Kayma sürtünmesi.....	18
2.1.1.e. Yuvarlanma sürtünmesi.....	18
2.2. Aşınma.....	19
2.2.1. Zamanla gelişen aşınma	19
2.2.2. Aniden meydana gelen aşınma.....	20
2.2.3. Aşınma sorunlarına giriş	20
2.2.4. Aşınmaya etki eden faktörler.....	21
2.2.5. Genel aşınma türleri.....	21
2.2.6. Abrasiv aşınma	22
2.2.7. Abrasiv aşınma mekanizmaları	23
2.2.7.a. Oymalı abrasiv aşınma	23
2.2.7.b. Yüksek gerilimli abrasiv aşınma	23
2.2.7.c. Düşük gerilimli abrasiv aşınma (erozyon abrasiv aşınması)	24
2.2.7.d. Kesme	24

2.2.7.e. Pulluklama	24
2.2.7.f. Yorulma	25
2.2.8. Adeziv aşınma	25
2.2.9. Yorulma aşınması.....	27
2.2.10. Korozyon aşınması	27
2.2.11. Kayma aşınması teorisi	29
2.3. İnsan Dişi ve Dişte olan Aşınma	31
2.3.1. Diş anatomisi	32
2.3.2. Dişte ortaya çıkan aşınma.....	33
2.3.2.a. Atrizyon	33
2.3.2.b. Erozyon	34
2.3.2.c. İçsel faktörler	34
2.3.2.d. Dışsal faktörler	35
2.3.2.e. Predispozan faktörler	35
2.3.2.f. Abrazyon	36
2.3.2.g. Abfraksiyon	37
2.3.3. Diş dolgusu.....	38
2.3.4. Diş restorasyonu	38
2.3.5. Çeşitli diş restorasyonları:	38
2.3.5.a. Amalgam	38
2.3.5.b. Kompozit dolgular.....	40
2.3.5.c. İnley dolgular.....	41
2.3.5.d. Onley dolgular	42
2.3.5.e. Kuron kaplamalar	43
2.3.5.f. Porselen laminalar	44
2.3.6. Kompozit dolgu maddeleri	45
2.3.7. Aşınmaya dayanıklılık.....	48
2.3.8. Kompozitlerin aşınmasını etkileyen faktörler	50
2.3.9. Dental seramikler	50
2.3.10. Seramiklerin aşınmasını etkileyen faktörler.....	54
2.4. Yüzey Pürüzlülüğü	55
2.4.1. Yüzey yapısının özellikleri ve aşınmaya etkisi	56

2.4.2. Yüzey kalitesinin sayısal olarak değerlendirilmesi	57
2.4.3. Ortalama çizgi (M) sistemi.....	57
2.4.4. Zarf sistemi (E).....	58
2.4.5. Yüzey kalitesini belirlemede esas alınan sayısal değerler.....	60
2.4.6. Ortalama eksen çizgi değeri- Ortalama yüzey pürüzlülük değeri (c_{la} , R_a).....	60
2.4.7. Maksimum tepe-dip yüksekliği (R_{max} , R_t)	63
2.4.8. Profil maksimum tepe yüksekliği (R_p)	63
2.4.9. Profil maksimum dip derinliği (R_m)	64
2.4.10. On nokta yüksekliği (R_z)	64
2.5. Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile Aşınma Modellenmesi.....	65
2.5.1. Sonlu elemanlar metodunun gelişimi	65
2.5.2. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY).....	66
2.5.3. SEY’de sınır şartları	67
2.5.4. Pre/post işlemleri.....	67
2.5.5. Eleman ve düğüm.....	67
2.5.6. Üç boyutlu kati cisim eşitlikleri.....	68
2.5.7. Yer değiştirme interpolasyonu	71
2.5.8. Sonlu elemanlar eşitliklerinin lokal koordinat sistemindeki formasyonu	73
2.5.9. Koordinat dönüşümü	76
2.5.10. Global sonlu elemanlar eşitliklerinin birleştirilmesi	77
2.5.11. Global sonlu elemanlar eşitliklerinin çözümü.....	78
2.5.12. ANSYS’de kontak problemlerinin çözümü	78
2.5.13. ANSYS sonlu elemanlar paket programı	79
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	81
3.1. Deneysel Materyal ve Yöntem	81
3.1.1. Yüzey pürüzlülüğü ölçme	87
3.1.2. Yüzey pürüzlülüğü parametreleri	87
3.1.3. En büyük pürüzlülük değeri (R_{max})	88
3.1.4. On nokta pürüzlülüğü ortalama değeri (R_z).....	89
3.1.5. Deney mesafesi.....	89
3.1.6. Deney şartları	89

3.1.7. Malzemelerde sertlik deneyi	90
3.1.8. Mikrosertlik ölçme yöntemleri	90
3.1.9. Vickers sertlik deneyi	90
3.2. Sayısal Material ve Yöntem	92
3.2.1. Archard aşınma modeli	97
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	103
4.1. Deneyisel Bulgular ve Tartışma	103
4.1.1. Aşınma izi.....	103
4.2. Sayısal Bulgular ve Tartışma	112
4.3. Sayısal Hesaplamalar	121
4.3.1. Model-1.1.2, alt malzeme indirek kompozit	123
4.3.2. Model-2.1.2, alt malzeme nanohibrit	127
4.3.3. Model-3.1.2, alt malzeme mikrohibrit.....	131
4.3.4. Model-4. 1. 2, alt malzeme feldspatik	134
4.3.5. Model-5.1.2, Alt malzeme Rezin nano seramik	137
4.4. 25 N Yük altında aşınma davranışı	143
4.4.1. Model-1.1.1, alt malzeme indirek kompozit	143
4.4.2. Model-2.1.1, alt malzeme nanohibrit	146
4.4.3. Model-3.1.1, Alt Malzeme Mikrohibrit.....	148
4.4.4. Model-4. 1. 1, alt malzeme feldspatik	151
4.4.5. Model-5.1.1, alt malzeme rezin nano seramik	154
4.5. 75 N Yük Altında Aşınma Davranışı	158
4.5.1. Model-1.1.3, alt malzeme indirek kompozit, üst malzeme zirkonya, 75 N yük.....	158
4.5.2. Model-2. 1. 3, alt malzeme nanohibrit	160
4.5.3. Model-3. 1. 3, alt malzeme mikrohibrit.....	163
4.5.4. Model-4.1.3, alt malzeme feldspatik	165
4.5.5. Model-5. 1. 3, alt malzeme rezin nano seramik	168
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	193
KAYNAKLAR	197
ÖZGEÇMİŞ	204

SİMGELER DİZİNİ

A	Pürüzlülük temas yarıçapı ve temas boyu, mm
A	Geometrik alan, mm ²
Aa	Aşınma alanı, mm ²
dh/dt	Pratikteki aşınma hızı, mm/s
E	Elastisite Modülü
E	Elastisite Modülü
FN	Normal kuvvet, N
FS	Sürtünme kuvveti, N
GPa	Gigapaskal
H	Malzemenin sertliği, N/mm ²
ha	Aşınan bu tabakanın kalınlığı, mm
haem	Aşınma sınırı, mm
HRC	Rockwell C sertlik değeri
Hz	Hertz
K	Aşınma katsayısı
k	Boyutlu aşınma katsayısı, mm ³ /N.m
ka	Malzeme çiftine ait deneyle tayin edilen faktör
Lt	İzleme boyu, mm
mm	Milimetre
MPa	Megapaskal
N	Newton
P	Basınç
P ₀	Maksimum kontak basıncı
Ra	Ortalama yüzey pürüzlülük değeri, µm
Rm	Profil maksimum dip derinliği
Rmax	Maksimum pürüzlülük derinliği, µm
Rz	Ortalaması alınan yüzey pürüzlülük değeri, µm
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
v	Kayma hızı, m/s

V_h	Aşınma hacmi, mm ³
λ_c	Katof değeri, mm
μ	Sürtünme katsayısı
σ	Normal Gerilme
ϑ	Poisson Oranı



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Bağlı hareket eden temas halindeki yüzeyler arasında oluşan kuru sürtünmenin şematik gösterilmesi.....	14
Şekil 2.2. Sınır sürtünmesi	16
Şekil 2.3. Sıvı sürtünme	17
Şekil 2.4. Aşınma–zaman bağıntısı.....	20
Şekil 2.5. Abrasiv aşınmanın mekanizması	23
Şekil 2.6. Adeziv aşınma gösterimi	25
Şekil 2.7. Birbiri üzerinde hareket eden iki pürüzlülüğün basit bir temasının değişimini gösteren şematik diyagram.....	29
Şekil 2.8. 1.Diş 2.Mine 3.Dentin 4.Pulpa 5.Kuronal Pulpa 6.Kök Pulpası 7.Sement 8.Kuron 9.Tüberkül/Kusp 10.Fissür 11.Boyun 12.Kök 13.Furkasyon 14.Apeks 15.Apikal Foramen 16.Gingival Sulkus 17.Periodontium 18.Dişeti 19.Papilla 20.Mine-Sement Sınırı 21.Alveol 22.Periodontal Ligament 23.Alveol Kemliği 24.Sinir ve Damar Ağı 25.Dişteki Ağ 26. Periodontiumdaki Ağ 27.Alveol Kanalındaki Ağ.....	32
Şekil 2.9. Amalgam dolgular	40
Şekil 2.10. Kompozit dolgular	41
Şekil 2.11. İnley dolgular.....	42
Şekil 2.12. Onley dolgular	43
Şekil 2.13. Kuron kaplamalar	44
Şekil 2.14. Porselen laminalar	44
Şekil 2.15. BIS-GMA	46
Şekil 2.16. SiO ₄ tetrahedra yapısı	51
Şekil 2.17. İşlenmiş bir yüzeyin yüzey karakteri	57
Şekil 2.18. Ortalama çizgi konumunun belirlenmesi.....	58
Şekil 2.19. Zarf eğrisinin elde edilişi	59
Şekil 2.20. Ortalama zarf eğrisi	59
Şekil 2.21. Yüzey kalitesi için sayısal değerler	60
Şekil 2.22. Ordinatlara Ra'nın gösterimi	61

Şekil 2.23. Alanlarla R_a 'nın gösterimi	62
Şekil 2.24. Tepe-dip yüksekliği aynı olan yüzey örnekleri	63
Şekil 2.25. On nokta yükseklik hesabı için ortalama ölçümler	64
Şekil 2.26. Sonsuz küçük bir küpte 6 bağımsız serbestlik gerilme bileşenleri.....	68
Şekil 2.27. Lokal ve global koordinat sistemi	71
Şekil 2.28. Penetrasyon ve kontak kuvveti	78
Şekil 3.1. Kayma aşınması testlerinde kullanılan geometriler.....	81
Şekil 3.2. Temas geometrileri	82
Şekil 3.3. Aşınma cihazı	85
Şekil 3.4. Aşınma deney düzeneği.....	85
Şekil 3.5. Aşınma mesafesi ve şematik yapısı	86
Şekil 3.6. Ortalama pürüzlülük değeri	88
Şekil 3.7. En büyük pürüzlülük değeri	88
Şekil 3.8. On nokta pürüzlülüğü ortalama değeri	89
Şekil 3.9. Vickers sertlik deneyinin şematik gösterimi.....	91
Şekil 3.10. Sertlik ölçme cihazı	91
Şekil 3.11. SEY İçin kullanılan elemanın şematik görüntüsü	93
Şekil 3.12. a) Tam model b) kullanılan yarım modele bakış yönleri.....	95
Şekil 3.13. Kullanılan modelin sınır şartları	95
Şekil 3.14. Kullanılan modelin soldan görünüşü	96
Şekil 3.15. Kullanılan modele üsten görünüşü	96
Şekil 3.16. Kullanılan modelin perspektif görünüşü	97
Şekil 3.17. Aşınma modeli.....	97
Şekil 3.18. Hertz kontak şematiği	100
Şekil 3.19. Temas bölgesinin geometrisi	101
Şekil 4.1. Aşınma izi – Nanohibrit x10.....	104
Şekil 4.2. Aşınma izi – Microhibrit x10	105
Şekil 4.3. Aşınma izi – İndirek kompozitx10	105
Şekil 4.4. Aşınma izi – Rezin nano seramik x10	106
Şekil 4.5. Aşınma izi - Feldspatik x10.....	106
Şekil 4.6. Aşınma kesit alanı - Nano Hibrit.....	107
Şekil 4.7. Aşınma kesit alanı - Mikro Hibrit.....	108

Şekil 4.8. Aşınma kesit alanı - Indirek Kompozit.....	108
Şekil 4.9. Aşınma kesit alanı - Rezin Nano Seramik.....	109
Şekil 4.10. Aşınma kesit alanı - Feldespatik.....	109
Şekil 4.11. Numunelerin deneysel aşınma oranları (mm).....	110
Şekil 4.12. Deney boyunca sürtünme katsayısının değişimi.....	111
Şekil 4.13. Sürtünme katsayısı.....	112
Şekil 4.14. Fine mesh uygulaması	113
Şekil 4.15. ANSYS programında tanımlanan elasto-plastik malzeme modeli	114
Şekil 4.16. Kullanılan modelin boyutları.....	121
Şekil 4.17. Modelin üç boyutlu aşınma analizi.....	122
Şekil 4.18. a) üç boyutlu aşınma analizi, b) Kontak bölgesindeki aşınma analizi.....	123
Şekil 4.19. Model-1.1.2'nin aşınma davranışı	124
Şekil 4.20. Model-1.1.2'nin eleman aşınma çözümü	126
Şekil 4.21. Model-1.1.2'deki kontakt basınç	126
Şekil 4.22. Model-1.1.2'deki Von Mises gerilmeleri	127
Şekil 4.23. Model-2.1.2'nin aşınma davranışı	128
Şekil 4.24. Model-2.1.2'nin eleman aşınma çözümü	129
Şekil 4.25. Model-2.1.2'deki kontakt basınç	130
Şekil 4.26. Model-2.1.2'deki Von Mises gerilmeleri	130
Şekil 4.27. Model-3. 1. 2'nin aşınma davranışı	131
Şekil 4.28. Model-3.1.2'nin eleman aşınma çözümü	132
Şekil 4.29. Model-3.1.2'deki kontakt basınç	133
Şekil 4.30. Model-3.1.2'deki Von Mises gerilmeleri	133
Şekil 4.31. Model-4.1.2'nin aşınma davranışı	134
Şekil 4.32. Model-4.1.2'nin eleman aşınma çözümü	135
Şekil 4.33. Model-4.1.2'deki kontakt basınç	136
Şekil 4.34. Model-4.1.2'deki Von Mises gerilmeleri	137
Şekil 4.35. Model-5.1.2'nin aşınma davranışı	138
Şekil 4.36. Model-5.1.2'nin eleman aşınma çözümü	139
Şekil 4.37. Model-5.1.2'deki kontakt basınç	140
Şekil 4.38. Model-5.1.2'deki Von Mises gerilmeleri	140
Şekil 4.39. Medellerin sayısal analizden elde edilen aşınma değerleri(mm).....	142

Şekil 4.40. Deney ve analizlerden elde edilen aşınma değerleri.....	142
Şekil 4.41. Model-1.1.1'in aşınma davranışı	144
Şekil 4.42. Model-1.1.1'in eleman aşınma çözümü	144
Şekil 4.43. Model-1.1.1'deki kontakt basınç	145
Şekil 4.44. Model-1.1.1'deki Von Mises gerilmeleri	145
Şekil 4.45. Model-2.1.1'in aşınma davranışı	146
Şekil 4.46. Model-2.1.1'in eleman aşınma çözümü	147
Şekil 4.47. Model-2.1.1'deki kontakt basınç	147
Şekil 4.48. Model-2. 1. 1'deki Von Mises gerilmeleri	148
Şekil 4.49. Model-3.1.1'in aşınma davranışı	149
Şekil 4.50. Model-3.1.1'in eleman aşınma çözümü	150
Şekil 4.51. Model-3.1.1'deki kontakt basınç	150
Şekil 4.52. Model-3.1.1'deki Von Mises gerilmeleri	151
Şekil 4.53. Model-4.1.1'in aşınma davranışı	152
Şekil 4.54. Model-4.1.1'in eleman aşınma çözümü	153
Şekil 4.55. Model-3.1.1'deki kontakt basınç	153
Şekil 4.56. Model-4.1.1'deki Von Mises gerilmeleri	154
Şekil 4.57. Model-5.1.1'in aşınma davranışı	155
Şekil 4.58. Model-5.1.1'in eleman aşınma çözümü	156
Şekil 4.59. Model-5. 1. 1'deki kontakt basınç	156
Şekil 4.60. Model-5.1.1'deki Von Mises gerilmeleri	157
Şekil 4.61. Model-1.1.3'ün aşınma davranışı	158
Şekil 4.62. Model-1.1.3'ün eleman aşınma çözümü.....	159
Şekil 4.63. Model-1.1.3'teki kontakt basınç	159
Şekil 4.64. Model-1. 1. 3'teki Von Mises gerilmeleri	160
Şekil 4.65. Model-2.1.3'ün aşınma davranışı	161
Şekil 4.66. Model-2.1.3'ün eleman aşınma çözümü.....	161
Şekil 4.67. Model-2.1.3'teki kontakt basınç	162
Şekil 4.68. Model-2.1.3'teki Von Mises gerilmeleri	162
Şekil 4.69. Model-3.1.3'ün aşınma davranışı	163
Şekil 4.70. Model-3.1.3'ün eleman aşınma çözümü.....	164
Şekil 4.71. Model-3.1.3'teki kontakt basınç	164

Şekil 4.72. Model-3.1.3'teki Von Mises gerilmeleri	165
Şekil 4.73. Model-4.1.3'ün aşınma davranışı	166
Şekil 4.74. Model-4.1.3'ün eleman aşınma çözümü.....	167
Şekil 4.75. Model-4.1.3'teki kontakt basınç	167
Şekil 4.76. Model-4. 1. 3'teki Von Mises gerilmeleri	168
Şekil 4.77. Model-5.1.3'ün aşınma davranışı	169
Şekil 4.78. Model-5.1.3'ün eleman aşınma çözümü.....	169
Şekil 4.79. Model-5.1.3'teki kontakt basınç	170
Şekil 4.80. Model-5.1.3'teki Von Mises gerilmeleri	170
Şekil 4.81. İndirek kompozitlerin; 25 N, 50 N, 75 N yük altındaki aşınma davranışları	172
Şekil 4.82. Nanohibritlerin; 25 N, 50 N, 75 N yük altındaki aşınma davranışları.....	172
Şekil 4.83. Mikrohibritlerin; 25 N, 50 N, 75 N yük altındaki aşınma davranışları	173
Şekil 4.84. Feldespatiklerin; 25 N, 50 N, 75 N yük altındaki aşınma davranışları.....	173
Şekil 4.85. Rezin nanoseramiklerin; 25 N, 50 N, 75 N yük altındaki aşınma davranışları	174
Şekil 4.86. Yükün aşınmaya olan etkisi.....	175
Şekil 4.87. Malzemelerin; 25 N, 50 N, 75 N yükteki aşınma davranışı	175
Şekil 4.88. Malzemelerin; 25 N- 50 N ve 50 N- 75 N yüklerin artırılmasından sonra aşınma oranlarının değişimi.....	176
Şekil 4.89. Elastisite modülü ile aşınma arasındaki ilişki.....	177
Şekil 4.90. Alt malzeme olarak İndirek kompozitleri kullanıldığı modellerin 25N yük altında aşınma değerleri	178
Şekil 4.91. Alt malzeme olarak İndirek kompozitlerin kullanıldığı modellerin 50N yük altında aşınma değerleri	178
Şekil 4.92. Alt malzeme olarak İndirek kompozitlerin kullanıldığı modellerin 75N yük altında aşınma değerleri	179
Şekil 4.93. Alt malzeme olarak Nano hibritleri kullandığı modellerin 25N yük altında aşınma değerleri	180
Şekil 4.94. Alt malzeme olarak Nano hibritleri kullandığı modellerin 50N yük altında aşınma değerleri	180

Şekil 4.95. Alt malzeme olarak Nano hibritleri kullandığı modellerin 75N yük altında aşınma değerleri	181
Şekil 4.96. Alt malzeme olarak Mikro hibritleri kullandığı modellerin 25N yük altında aşınma değerleri	181
Şekil 4.97. Alt malzeme olarak Mikro hibritleri kullandığı modellerin 50N yük altında aşınma değerleri	182
Şekil 4.98. Alt malzeme olarak Mikro hibritleri kullandığı modellerin 75N yük altında aşınma değerleri	182
Şekil 4.99. Alt malzeme olarak Feldespatikleri kullandığı modellerin 25N yük altında aşınma değerleri	183
Şekil 4.100. Alt malzeme olarak Feldespatikleri kullandığı modellerin 50N yük altında aşınma değerleri	183
Şekil 4.101. Alt malzeme olarak Feldespatikleri kullandığı modellerin 75N yük altında aşınma değerleri	184
Şekil 4.102. Alt malzeme olarak Rezin nanoseramikleri kullanıldığı modellerin 25N yük altında aşınma değerleri	185
Şekil 4.103. Alt malzeme olarak Rezin nanoseramikleri kullandığı modellerin 50N yük altında aşınma değerleri	185
Şekil 4.104. Alt malzeme olarak Rezin nanoseramikleri kullandığı modellerin 75N yük altında aşınma değerleri	186
Şekil 4.105. Modellerin 25 N yük altındaki aşınma değerleri	189
Şekil 4.106. Modellerin 50 N yük altındaki aşınma değerleri	189
Şekil 4.107. Modellerin 75 N yük altındaki aşınma değerleri	190
Şekil 4.108. 25N altında, üst malzemesi dış olan modellerin aşınma değerlerinin karşılaştırılması	190
Şekil 4.109. 50N altında, üst malzemesi dış olan modellerin aşınma değerlerinin karşılaştırılması	191
Şekil 4.110. 75N altında, üst malzemesi dış olan modellerin aşınma değerlerinin karşılaştırılması	191

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Malzeme özellikleri	86
Çizelge 4.1. Tez kapsamında kullanılan malzeme kodları	115
Çizelge 4.2. Tez kapsamında kullanılan modellerin kodlaması	115
Çizelge 4.3. Model-1.1.2'nin sayısal ve deneysel aşınma değerleri	125
Çizelge 4.4. Nanohibritlerin sayısal ve deneysel aşınma değerleri	128
Çizelge 4.5. Mikrohibritlerin sayısal ve deneysel aşınma değerleri	132
Çizelge 4.6. Feldespatiklerin sayısal ve deneysel aşınma değerleri	135
Çizelge 4.7. Model-5.1.2'nin sayısal ve deneysel aşınma değerleri	138
Çizelge 4.8. Modellerin aşınma değerleri	188
Çizelge 4.9. Farklı yüklerde en iyi uyum gösteren alt ve üst malzemeler	192

1. GİRİŞ

Sonuçları bakımından oldukça maliyetli olan malzemelerdeki aşınma sorunu, mühendislik açısından da üzerine çokça düşülen bir kavramdır. İnsan yaşamında aşınma sorununun sıkça görüldüğü alanlardan birisi ise diş restoratif malzemesinde ortaya çıkan aşınma türleridir. Dişte ortaya çıkan aşınma dişin sert dokusunun yıkımının yanı sıra diş restoratif malzemelerinde önemli hasara sebebiyet vermektedir. Bu da diş sağlığı ve estetiği açısından ortaya kötü sonuçlar çıkarmaktadır.

Diş aşınması; sebepleri dış ve iç kaynaklı asitler, çiğneme kuvvetleri, mekanik olarak aşındırma hareketleri olmak üzere dişin sert dokusunun patolojik olarak yıkımı ile tariff edilir. Tedavisi hastanın aşınmanın hasar derinliğine ve hasta şikayetlerine bağlı olarak değişebilir. Lezyonların (doku hasarı) tedavisinde beslenme şeklinin değiştirilmesi duyarlı diş macunları kullanılması, dişe florür uygulamasının yapılması, dentin bağlayıcılarının kullanılması, dişin kompozit rezinlerle restorasyonu, veneer uygulanması ve gece koruyucu plakların uygulanması gibi bir çok yöntem kullanılmaktadır (Çelik *et al.*).

Klinik uygulamalarında karşımıza aşınma olarak çıkan çürük dışındaki kronik yakıcı olarak ifade ettiğimiz olayların oluşumunda farklı etkenler bulunmaktadır. Bu etkenlere bağlı olarak diş aşınmaları; erozyon (dişlerin asit ataklarından etkilenecek kimyasal olarak çözünmesi), atrizyon (dişlerin birbirleriyle olan temasları sonucu oluşan aşınma), abfraksiyon (aşırı okluzal streslerin etkisiyle servikal bölgede oluşan aşınma) ve abrazyon (dişlerde fiziksel etkenlerle meydana gelen sert doku kayıpları) isimlerini alırlar.

Dental olarak aşınma dişlerin çiğneme, kesme ve interproksimal (birbirine komşu yüzeyler) yüzeylerde görülür. (Ortner and Putschar 1985; Hillson 1990; Langsjoen 1998). Aşınma esnasında çiğneme yüzeyinde sırasıyla tüberküller, oluklar ve fovealar silinmektedir. Oklüzyal yüzey aşınmasında ise dentin açıkta kalarak diş minesi harap

edilir. Aşınma devam ederse pulpa zarar görebilir. Dişlerin kemiğe benzer yapıdaki tabakası olan odontoplastlar pulpada tehdit altında bulunan kısımlarda sekonder bir dentin tabakası oluştururlar. Sekonder dentin oluşmadan aşınma gerçekleşirse pulpa boşluğu enfeksiyon oluşma riski yaratarak açıkta kalır. (Ortner and Putschar 1985). Alveolar kemiğin yıkımı; pulpa kanalı yolu ve dışarıdan etkiyen periyodontal yol olmak üzere iki şekilde gerçekleşir.

Son yıllarda insanlar gerek sağlık olsun gerekse estetik sebeplerle ağız ve diş sağlıklarına önem vermeye başlamışlardır. Bu anlamda değerlendirilen dolgular malzeme olarak; amalgamdan yapılan seramik simanlar ve kompozitler kullanılmaktadır.

Özellikle dişlerin çürüyen kısımlarına dolgu yapılması da bu kapsamda değerlendirilmelidir. Dolgu olarak amalgam dolgu porselen simanlar, kompozitler ve kullanılmaktalar. Bu çalışmada İnsan dişi yansıra güncel ve modern dolgu maddelerinin(Direkt, İndirek kompozitler ve Seramikler) aşınma dayanımları in Vitro (deneysel) ve sonlu elemanlar yönteminde değerlendirerek karşılaştırılmıştır.

Diş aşınması hem dişhekimliği hemde mühendislik alanlarının ortak konusu olarak farklı yönlerden incelenmiştir. Bu çerçevedeki literatür araştırmaları Bölüm 1.1’de verilmiştir.

Aşınma hem sayısal olarak hemde deneysel olarak birçok araştırmada incelenmiştir.

Li *et al.* (2006), güçsüzleşmiş, üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi titanyum alaşımı ile kombine edilmiş farklı yapıştırıcılarla restorasyonunu dişin kan dolaşımını sağlayan pulpasız kökleri analiz ettiklerinde; yapıştırıcıların özelliklerini değerlendirmek için elastiklik modülün, çok önemli bir parametre olduğu ve dentine benzer elastik modüllü yapıştırıcıların güçsüz kökü güçlendirebileceği ve dentindeki gerilimeyi azaltabileceği sonucuna varmışlardır.

Rafferty *et al.* (2010) , temel ve önemli mekanik faktörleri gerilme ve aşınma analizinde incelenmiş. Bu çalışma da kaplama (farklı malzemelerden oluşmuş)-diş sert dokusu ve yapıştırıcı malzemesi CAD program paketinde modellenmiş ve sonlu elemanlar yöntemi ve faktöriyel analizi ile incelenmiştir. Bu modelde en fazla gerilme ve gerinme kaplama üzerinde oluşmuştur.

Zhang *et al.* (2010)'nın yaptıkları çalışmaya göre, kuron üzerinde çalışmalarındaki gerilme dağılımının; modelleme geometrisinde yapılan tanımlamalara, malzeme özelliklerine, sınır şartlarına ve ara yüzeylere bağlı olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada yorulma faktörleri de incelenmiştir.

Dietenberger (2005)'nin çalışmasında ANSYS –LS DYNA yardımıyla sonlu elemanlar kodlama programı yapılmıştır. Darbe süreci altında kontakt oluşturulup, aşınma analizi incelenmiştir.

Paulin *et al.* (2007) Ti–6Al–4V'dan yapılan bir malzeme yüzeyinde aşınma analizi yapıldı. Enerji kavramına göre farklı basınç ve sürtünme etkisi altında aşınma olayı simülize edilmiştir. Aşınma izin takip ederek belli bir nümerik yöntem elde edilebilir. Bu yöntemde sonlu elemanlar yöntemi ve deneysel aşınma kinitüğün kombine ederek, malzeme gidişi ve azalması hesaplanmıştır.

Zou *et al.* (2008) bu çalışmada bir diş yüzeyi aşınma analizi için referans çerçevesi oldu. En uygun bölgeni ayarlamak için iki bölge arasında en küçük kareler yöntemi uygulandı. Üç boyutlu sonlu elemanlar modeli hazırlanarak, dişin pulpa kısmı hasara uğramadan hazırlanmış yüzey için aşınma deyerleri elde edildi.

Diş taçlarında farklı biçimlerde aşınma ortaya çıkmasının sebebi; çiğneme sırasında dişlerde meydana gelen oklüzyon kuvvetlerinin sırası ve büyüklüğündeki farklılıklardır. Ackermann'a göre alt-üst çenedeki büyük azılarda meydana gelen bu aşınma biçimine helokoidal aşınma veya helis tipi aşındır (Uzel vd 1988). Bundan

yola çıkararak alt çeneyi ele aldığımızda dıştan linguale bakan kısma doğru olan eğim, büyük azılarda ön kısımdan arka kısma doğru daha belirginleşir.

Mukras *et al.* (2010) uygulamalarında da nümerik yaklaşım yöntemi sonlu eleman yöntemine paralel olarak kullanıldı ve aşınma olayının nasıl ortaya çıkılması göz önüne alındı.

Zheng *et al.* (2007) un yaptıkları çalışmanın temeli insan dişinin asitik ortamda nasıl bir korozyon aşınmaya maruz kaldığının ortaya çıkmasıdır. Bir asitik ortamda farklı yüklemeler altında dişin anemal kısmında oluşan aşınma analiz oldu.

Thompson (2004). ANSYS program paketinde yüzey pürüzlülüğü oluşturuldu. MEMS gibi birçok çalışmada yüze pürüzlülüğü veya yüzey tipolojisinin lazım olması bu yöntemi ortaya çıkardı. Öncelikle rasgele sayılar aray parametrelerin oluşturularak ortaya çıktı sonra makro dosyası oluşturulup APDL komutları yardımıyla malzeme yüzeyinde pürüzlülük oluşturmak mümkün olur.

Garleanu *et al.* (2010)'nun yaptıkları çalışmaya göre aşınmanın modellenmesi için sürünmeden yola çıkmak mümkündür. Bu çalışmada ANSYS program paketinde önce sürünme modellenerek yola çıkılmış daha sonra aşınma ve sürünmenin ortak denklemleri yardımıyla aşınma hızını elde etmek mümkün olmuştur.

Dişlerde aşınma; atrisyon, abrazyon ve erozyon olmak üzere üç şekilde gerçekleşir. Atrisyon aşınma dişin dişe sürtünmesi sonucunda oluşan normal fizyolojik bir aşınmadır (Hillson 2000). Çiğneme esnasında ise dişlerin temasta olduğu yerde, çenenin hareketiyle ince paralel çizikler oluşur.

DIN 50320 aşınmayı, temasta olan yüzeylerde mekanik etkenler sonucu yüzeylerden küçük parçaların ayrılmasıyla yüzeylerin bozulması olarak tanımlamıştır. Sürtünme ve aşınma deneyleri SAE (Society of Automotive Engineers) ve ASTM (American Society for Testing and Materials) ve ISO ve DIN kuruluşları ile standart hale getirilmiştir

(Ludema 1996). Bu çalışmamızda abraziv aşınma ile ilgili deney testleri ASTM G65'e göre yapılmış olup aşınma teorileri ve mekanizmaları The Materials Information Society (ASM) Volume 8 (OECD, 1969) ve MODERN TRIBOLOGY HANDBOOK Volume 1 (Stachowiak *et al.* 1993) referans alınarak çalışılmıştır.

Zou (2003) göre "Aşınma analizleri, bilinen yüklerin uygulanması ile bir yapıda oluşabilecek aşınmanın önceden belirlenmesi ve dayanıklılık süresinin anlaşılmasında kullanılan yöntemlerdir.

Blau (1997), yaptığı araştırmada son yarım yüzyılda yapılan çalışmaları incelemiş ve yapılan çalışmalar ışığında triboloji alanında büyük ilerleme kaydedildiğini belirtmiştir. Gelişen ve yenilenen test metotları ile mikro ve nano yapı ve temas yüzeylerinde detaylı çalışmaların yapıldığını göstermiştir. İnceleminde aşınmanın doğru anlaşılması ve bununla ilgili var olan bütün sıkıntıların doğru tespiti durumuna konsantre olmuştur. Son yıllarda elektron mikroskobu ve atomik güç mikroskobu gibi teknolojik aletlerin gelişmesi ile yüzey yapısı ve detaylarının görüntülenmesi kavramların daha iyi anlaşılmasını beraberinde getirmiştir. Ayrıca aşınmanın sayısal olarak hesaplanıp modellenmesi durumunun da mümkün olacağı sonucuna varmıştır.

Davim (2000), yaptığı çalışmasında pirinç ve çelik malzemelerinin aşınma ve sürtünme durumlarını deneysel olarak incelemeye tabi tutmuştur. Pin-on-disk makinesinde yaptığı deneylerde yük, kayma hızı, temas sıcaklığı, aşınma ve sürtünme arasındaki ilişkiyi değerlendirmiştir. Çoklu doğrusal gerilme tekniğini kullanarak sonuçlar arasında karşılaştırmalı değerlendirme sonucunda sürtünme katsayısı üzerinde ; hız/yük, sıcaklık, yük/sıcaklık değişken değerlerinin büyük ölçüde etkili olduğu sonucunu elde etmiştir. Yük faktörü aşınmaya yüksek miktarda etki ederken sıcaklığın daha düşük derecede etkidiği sonucunu çıkarmıştır.

Scherge *et al.* (2003), yaptığı incelemede aşınma ve sürtünmenin temel aşınma mekanizması dikkate alındığında dinamik işlemlerde güçlü bir ikili olduğunu ifade etmişlerdir. Temas basıncının max. olduğu yerde nominal tribolojik temasın çok fazla

pürüzlülük oluşturduğunu göstermişlerdir. Bu anlamda mekanik enerji girişi ya da sürtünmeden dolayı enerji dağılımı sebebiyle malzemede pürüzlülük oluştuğunu ve bu şekilde yüzeylerin dalgalı bir yapıya sahip olduğunu belirtmişlerdir. Sonuçta topografik özelliklerin korunmasıyla beraber yüzeyin aşındığını pürüzlülüğün sabit bir değerde kaldığını söylemektedirler. Deneysel çalışmada takip edilen yola göre sürtünmenin değiştiğini göstermiştir.

Lin *et al.* (2002), yaptıkları çalışmada orta sertlikteki su verilmiş S45C karbon çeliğinin aşınmasını ve sürtünmesini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlara göre kullanılan malzemenin hareketli durumlar aşınmaya karşı olan direnç üzerine etkiye sahiptir.

Basıncın belli olduğu düşük hız durumlarında su verilmiş numunelerin aşınma direncinin yüksek olduğu görülmüştür. Yüksek hız ve büyük yükleme durumlarında sürtünen yüzeylerde temas sıcaklığının artmasıyla birlikte tavlamanın etkisi altında kalan numunelerin aşınma direncinin azaldığı görülmüştür. Bu sebeple su verilerek sertleştirilmiş numunelerin diğerlerine göre katı aşınmaya maruz kaldığı ifade edilmiştir.

Deney sonuçları ışığında sürtünen yüzeylerde artan yüzey sıcaklığı temas yüzeylerinde oksit film tabakasının oluşmasına ve oksidasyon aşınmasının bu şekilde ortaya çıktığı sonucuna varmışlardır ve buna bağlı olarak aşınma oranında büyük oranda zalma olduğu görülmüştür.

Ünlü *et al.* (2003), çalışmalarında tribolojik özelliklerini karşılaştırdıkları pirinç ve kakır esaslı bronz yatakları üzerine yaptıkları deneylerde kaymalı yataklar için önemli yeri olan bakır esaslı alaşımların iyi bir tribolojik performansa sahip olduğu ve kaymalı yataklarda iyi sonuçlar elde edildiğini gözlemlemişlerdir.

Straffelini ve Molinari (1999), çalışmalarında Ti-6Al-4V metal alaşımında, 0.3–0.8 m/s gibi farklı kayma hızlarında 50–200 N gibi farklı yüklerde meydana gelen kuru kayma aşınması davranışını deneysel olarak ele almışlardır. 0.3–0.5 m/s’de (en düşük hız) oksidasyon aşınması ve 0.6–0.8 m/s’de (en yüksek hız) tabaka tahribatına neden olan

delaminasyon aşınması oluşmuştur. Kayma hızı arttıkça en düşük hızdaki kayma hızı azalmış ve kayma hızı arttıkça aşınma azalarak min. bir noktada metal alaşım kaymasının zorlaştığı görülmüştür (Kim *et al.* 2005).

Aso *et al.* (2001), çalışmalarında grafit kristalli beyaz dökme demirin aşınmasını incelemişlerdir. Pin-on-disk aşınma testi ile kayma aşınmasında kayma hızı, grafit şeklinin etkisi ve ısı davranışı gibi etkenler araştırılmıştır. Mesafe ve kayma hızı ilişkisini Okoshi tipi test sonucu ile araştırmışlardır. Aşınma kaybı ve kayma hız bağıntısı elde edildiğinde aşınma eğrisinin max. ve min. noktası karakteristik olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak aşınma ve sürtünme arasında açık bir fark olmadığı zıt bir eğilim olduğu sonucunu çıkarmışlardır.

Kato (2002), yaptığı çalışmada abraziv aşınma direnci, biçimi ve oranı incelenmiştir. Abraziv aşınma teorisini kırılma ve plastik deformasyon için nasıl gerekli olabileceğini ortaya koymuşlardır.

Prasad (2004), yaptığı çalışmada bronz alaşımının aşınma davranışını değişken malzeme bileşimi, mikroyapısı ve test şartlarında uygulanan basınç ve hızın değişmesine paralel olarak incelemeye tabi tutmuşlardır. Aşınma oranı, yüzey pürüzlülüğü ve sürtünme ısısı incelenen numunelerde meydana gelen aşınmanın; aşınma yüzeyleri, altındaki kısımlar ve biriken parçalarla ilişkili olduğu sonucu vurgulanmıştır. Sonuçta kurşun ile kaplanmış kalay bronzlarının aşınma miktarı, alüminyum bronzların (karşı eğilim sergileyen) kayma hızının artmasıyla azalma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir.

Jiang *et al.* (2004), kuru kayma aşınması durumunda metallerin sıcaklık yükselmesini temsil eden genel bir model tasarlamışlardır. Bu modelde nikel alaşımının 20°C'den 600°C'ye kadar olan sıcaklıkta tribolojik davranışı pin-on-disk cihazında incelenmiştir. Yüksek elektrik direncine sahip temas yüzeylerinde koruyucu tabakalar gelişerek sert aşınmadan yumuşağa geçişteki aşınma miktarı incelenmiştir. Bunlar bir matematik model ile modellenmiştir. Sıcaklık, oksijenin kısmı basıncı gibi parametrelerde örnek

modele uygulanarak simülasyonu sağlanmıştır. Uygulanan sıcaklık ile deneysel modeller arasında paralel ve mantıklı sonuçlara ulaşılmıştır.

Lewis ve Olofsson (2004), çalışmalarında labaratuvar test çalışmalarında kullanılan malzemelerinin pin-on-disk ve çift disk cihazları vasıtasıyla aşınma katsayı haritalarını oluşturarak aşınma rejimi, geçişleri, temas basınç şartları ve kayma hızının belirlenmesini amaçlamışlardır. Bununla birlikte yüzey morfojilerini de eld etmişlerdir.

1.1. Amaç

Bu çalışmanın amacı dişlerde kullanılan restoratif ve dolgu malzemelerinde sürtünmeye bağlı aşınma olayını incelemektir. Aşınma oluşurken genellikle farklı etkenler rol almaktadır. Dişteki aşınmalar; oluşumunda rol alan etkenlere bağlı olarak atrizyon, erozyon, abrazyon ve abfraksiyon isimlerini alırlar.

Diş aşınmasında en önemli etken mekanik aşınmadır. Bu çalışmada mekanik aşınmayı deneysel yollarla ve sonlu elemanlar yolu ile bulmak amaçlanmıştır.

Temas halinde olan malzemelerin sürtünme esnasında mekanik etkenlerin de etkisiyle yüzeyden koparak ayrılmasına aşınma denmektedir ve bu kopma ile malzemede büyük hasara uğramış demektir. Malzemede aşınma ne kadar azalırsa veya en azından aşınmaya yol açan etkenler ne kadar azalırsa malzeme o kadar dayanıklı olup ömrü uzun olacaktır. İnsan sağlığı ve estetiğinde büyük bir rol oynayan dişlerde bu durum oldukça gereklidir. Hem dişin sert dokusunda ve hem de dişe uygulanan dolguda aşınmayı azaltarak diş yapısının ömrünü uzatmak bu çalışmanın amacı olarak planlanmıştır.

1.2. Kapsam

Bu çalışmada deneysel ve sayısal olarak (sonlu elemanlar yöntemi) diş restoratif malzemelerindeki aşınma analizi yapılmıştır. Diş restoratif malzemesinde aşınma olayını hesaplamak amacı ile üç ana grup restoratif malzemesi (Direk kompozitler, İndirek kompozitler ve Seramikler) incelenmiştir.

Atatürk üniversitesi Dişhekimliği fakültesinde yapılan numuneler aşağıda sıralanmıştır:

1) Direk kompozitler:

- Nano hibritler (Grandio- Vacopostfach 767Guxhaven, Germany)
- Mikrohibritler (filtek- Z2503MESPE,St-Paul, MN,EUA),

2) İndirek kompozitler:

- Belleglass- BelleGlass,KerrLab Corporation west Collins Orange, CA, USA

3) Seramikler:

- Feldespatikler - Vintage Opaque 3M USA
- Rezin nano seramikler- Lava Ultimate, 3M bulding USA

Numunelerin oda sıcaklığında açık havada linear (ASTM F 732 (reciprocating mode) ileri –geri) aşınma deneyi yapan reciprocating aşınma cihazı ile aşınma davranışı incelenmiştir. Compend 2000 yazılım programı ile farklı çalışma modlarında programlanan testlerde süre, frekans ve sıcaklık etkenleri dikkate alınarak sürtünme katsayısı değerleri ve aşınma kaybının zamanla değişimi ve yüzeydeki faktörler incelenmiştir. Çalışmada ağız ortamını elde etmek için yapay tükürük (silviya) kullanılmıştır. Aşınma ölçümleri; İzmir Dokuz Eylul üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nün Araştırma Laboratuvarlarında yapılmıştır. Numunelerin sertlikleri, Atatürk Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nün Araştırma Labratuvarlarında ve mikro sertlik ölçme cihazı ile ölçülmüştür.

Ayrıca bu tez kapsamında dişteki aşınma olayı, sonlu elemanlar yöntemi ile tüm etken faktörleri ile birlikte modellenmiştir. Aşınmanın kendisi çok yönlü bir olay olduğu için aşınma teori ve mekanizması; malzeme özelliklerini, çalışma şartlarını (yük, hız, v.s.), değme geometrisini, pürüzlüğü ve çevre faktörlerini kapsayan karmaşık bir durumdur. Bu çalışmada ANSYS program paketi ile aşınma modellenerek, deneysel şartlar uygulanmış ve numunelerin aşınma dayanımları sayısal olarak sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiştir.

Sayısal ve deneysel yöntemler ile elde ettiğimiz sonuçlar karşılaştırarak yeni nesil restoratif malzemelerinin aşınma dayanımları tesbit edilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

Bu tez kapsamında insan dişi restoratif malzemesinde olan aşınma olayı incelenmiştir. Aşınma kendisi çok yönlü ve karmaşık bir olay olduğu için bu olayı tam anlamak için; aşınmaya etki eden faktörler, aşınma mekanizması, malzeme yapısı ve içyapısı, malzeme uygulama metodu ve yüzey faktörlerin çok detaylı bir şekilde incelemek gerekiyor.

Bu bölümde aşınma, aşınmaya etki eden faktörler ve aşınma modellemesi için kullanılan kurumsal temeller hakkında bilgi verilmiştir.

Kurumsal temel olarak; Sürtünme ve mekanizmaları, aşınma ve mekanizmaları, insan dişi ve yapısı ve dişte olan aşınma olayı, diş restoratif malzemeleri, onların içyapıları ve dişte uygulama metodları, yüzey pürüzlülüğü ve onun aşınmada etkisi ve sonlu elemanlar yöntemi ve aşınma modellemesi konularında olan bilgiler verilmiştir.

2.1. Sürtünme

Aşınma sürtünme etkisiyle oluşan malzeme ve kütle kaybıdır, dolayısıyla aşınma konusun anlamak için sürtünme, sürtünme mekanizmaları ve ona sebep olan faktörleri anlamak gerekmektedir.

Bu mekanizmaları (aşınma ve sürtünme) anlayabilmemiz için , yüzey temas teorilerini iyi bilmemiz gereklidir. Aşınma teorilerini analiz etmede yüzeylerde oluşan temaslar (mikro ve nano boyutta) ve yüzey pürüzlülüğü çok önem teşkil etmektedir.

Sürtünmeyi tarif edecek olursak; birbirine bağıl hareket yapan sürtünme halindeki elemanların harekete karşı gösterdikleri direnç olarak tanımlayabiliriz. Sayısal anlamada çoğu zaman küçük bir değere sahip olan sürtünme bile pratikte her zaman vardır.

(Kobrick 2010). Temas halinde olan hareketli parçalarda kinematic açıdan ele alındığında sürtünme, kayma, yuvarlanma ve kayma yuvarlanma şeklinde gerçekleşir.

1452-1519 tarihleri arasında sürtünme kuvveti ile bilinen ilk çalışmayı gerçekleştiren Leonardo da Vinci; sürtünme kuvvetinin normal kuvvete oranını sürtünme katsayısı olarak tanımlamaktadır (Stachowiak *et al.* 1993).

Bağlı hareket halinde olan yüzeylerin temas halinde etkileşmesiyle ortaya çıkan sürtünme ve aşınma tribolojinin ana konusunu oluşturur. Sürtünme ile birlikte makine parçalarının faydalı kullanımı azalır ve aynı zamanda parçaların boyutlarını değiştirerek hassasiyeti düşer. Sürtünen yüzeylerin olduğu malzemelerde (Örneğin dişliler, rulmanlar, kamlar, miller, pistonlar, teker lastikleri, fren balataları ve temas halinde olan bütün makine parçaları) deformasyon, çatlaklar ve iç gerilmeler görülmektedir ve bu şekilde makine çalışamaz hale gelmektedir (Oğuz 1993; Babalık 2000; Stachowiak *et al.* 2001).

Sürtünme kuvvetini, cinsini, dağılma tarzını ve çeşitlerini bilmek sürtünme olayında büyük önem oluşturur (Bhushan 2000). Bu bakımdan sürtünmeyi açıklamaya çalışan teoriler arasında gerçeğe en yakın olan Bowden ve Tabor'un sürtünme kaynakları teorisine göre sürtünme kuvveti üç kısımda ele alınır (Bhushan 2000).

Temas halindeki yüzelerin belirli pürüzlülük noktalarında yükün uygulamadığı durumda tabakalar arasında bağlar meydana gelir. Büyük basınçlar küçük temas yüzeylerinde yük uygulandıktan sonra oluşur. Bu basınçların etkideği temas noktalarında tabakalar koparak metalik temsilleri oluşturur ve yüksek basınçla birlikte bu kısımlarda oluşan mikroskobik kaynak bağları doğal tabaka bağlantısından çok daha kuvvetlidir ve moleküler bağ şeklinde oluşmuştur. Birbirine temasta bulunan elemanların hareketi ancak bu bağların kopması ile gerçekleşebilir. Sürtünmeyi bu anlamda tanımlayacak olursak; metalik ve doğal tabaka bağlarının oluşturduğu direnç olarak tanımlamak mümkündür. Sürtünme kuvveti ise bu bağları koparmak için gereken kuvvet olarak tanımlanabilir.

2.1.1. Sürtünmenin sınıflandırılması

Yüzeysel şartlar ve bağıl harekete göre sürtünmeyi iki, şekilde sınıflamak mümkündür:

Yüzeysel şartlar altındaki sınıflandırma:

- Katı cisim
- Katı yağlı
- Sıvı cisim
- Gaz sürtünmesi
- Sınır sürtünmesi
- Tüm şartların beraber görülebildiği sürtünme

Bağıl Hareketlere Göre:

- Yuvarlanmalı
- Kaymalı
- Kaymalı-yuvarlanmalı sürtünme

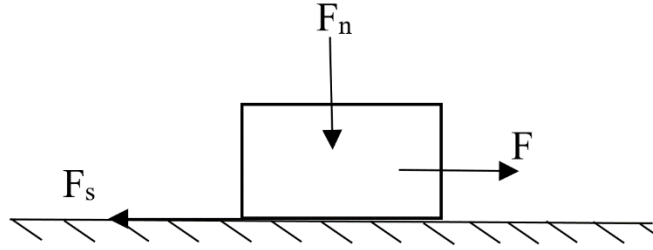
Hareket halindeki temasta olan yüzeylerde Araya yağlayıcı madde konulup konulmaması açısından sürtünme kuru, sınır ve sıvı olarak üç şekilde incelenir. Kuru sürtünme birbirine temasta olan ve izafi hareket yapan yüzeylerde oluşur. Sıvı sürtünmesi; yüzeyler arasında yağlayıcı madde konulması ile yağlayıcı maddenin tabakaları arasında oluşan sürtünmedir. Sınır sürtünmesi ise yüzeylerin tamamen ayrılmadığı durumda ortaya çıkar.

2.1.1.a. Kuru sürtünme

Sürtünme denince akla ilk gelen sürtünme kuru sürtünmedir. Sürtünme sonucu oluşan aşınma, sıcaklık yükselmesi ve enerji kaybı gibi olaylar kuru sürtünme sonucu oluşmaktadır. Kuru sürtünmenin fiziksel anlamda sadece vakum şartlarında meydana

geldiği, temas yüzeylerinin pürüzlü olduğu ve tam anlamıyla temiz olmadığı dikkate alınır.

Birbirine bağlı hareket yapan iki elaman arasında temas yüzeylerinde meydana gelen kuru sürtünmeyi Şekil 2.1 ile ifade edebiliriz.



Şekil 2.1. Bağıl hareket eden temas halindeki yüzeyler arasında oluşan kuru sürtünmenin şematik gösterilmesi

Şekil 2.1’de temas halinde olan cisimlerden herhangi birine teğetsel kuvvet uygulandığında iki durum meydana gelir:

1. Temas halindeki cisimlerden birine uyguladığımız teğetsel kuvvet temas yüzeyleri arasındaki sürtünme kuvvetine eşit veya zıt yönlü hareket olmağı olmadığından yüzeyler arasında static sürtünme denilen direnç oluşur ve cisimler birbirleri üzerinde kaymazlar.
2. Cisimlerin birbiri üzerinde kayması için teğetsel kuvvet sürtünme kuvvetinden büyük veya zıt yönlü olmalıdır. Bu sürtünme durumunda aşınma ve enerji kaybı söz konusudur.

Çevresel şartların etkisiyle temasta olan yüzeyler arasında oluşan su buharı oksit, yağ, pislik vs. gibi tabakalar absorbsiyon yolu ile yüzeylere kuvvetli bir şekilde bağlanırlar. Böylece sürtünme mekanizması yüksüz durumda temas halindeki tabakalar arasında bağ oluşturur. Yırılmadan kaynaklanan metal-metal teması bu tabakaların izafi hareketi sonucu oluşmaktadır ve temas bölgelerinde soğuk kaynama olayını meydana getirmektedir. Kaynama noktaları sürtünme esnasında ya hareketi engelleyerek ya da

koparak yırtılmaya neden olarak makine parçalarının aşınma sonucunda kullanılmaz hale gelmesine sebep olmaktadır. Bu açıklamalardan yola çıkılarak sürtünme; metal kaynak bağları ile çeşitli kimyasal bileşikler içeren tabakaların oluşturduğu direnç olarak tanımlanabilir (Burhan 1994).

2.1.1.b. Sınır sürtünmesi

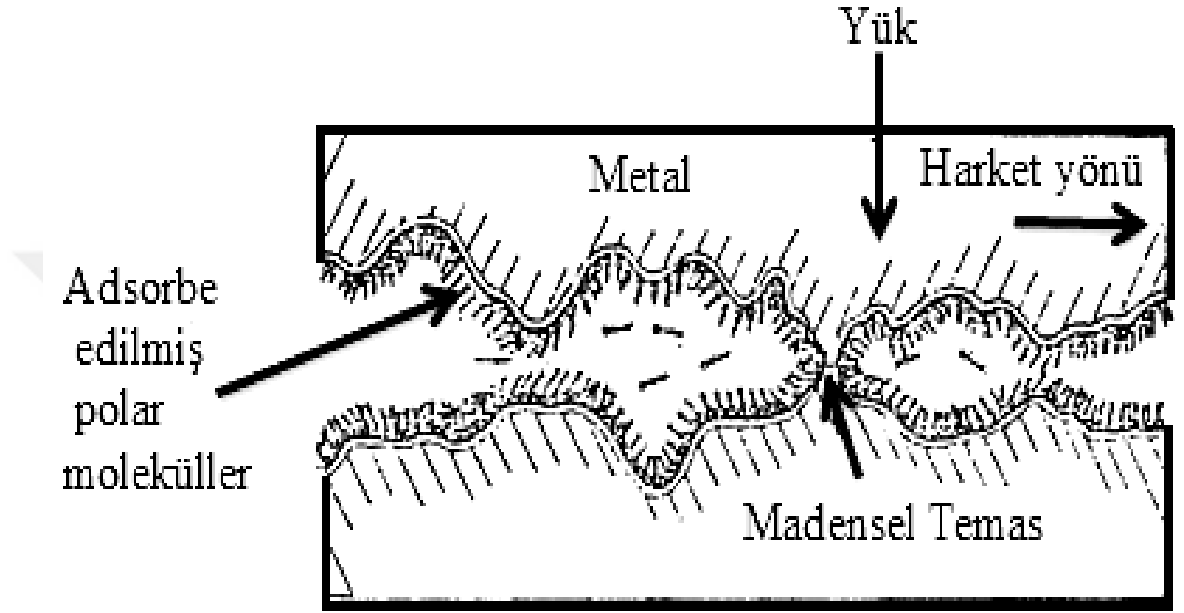
Pratikte en çok ratlanan sınır sürtünmesi temas yüzeyleri arasında yağlayıcı madde bulunmasına rağmen sınır sürtünmesi durumunun ortaya çıkmasıdır. Burada sürtünme katsayısı 0,02 ile 0,1 arasında değerler alır.

Temas yüzeyleri arasında yağlayıcı madde bulunmasına rağmen absorpsiyon olayı sonucu yağlayıcı madde molekülleri homojen olarak metal yüzeyine yapışırlar. Burada polar karbonlu hidrojenlerin molekülleri aktif karboksil grubu ile metallerin temas yüzeylerine bağlanırlar (Şekil 2.2). Bu şekilde metal yüzeylerde molekul tabakası kalınlığı kadar absorpsiyon tabakası oluşmuş olur.

Yağın bu yapışma özelliği yağ ve metal yüzeylerinin karşılıklı etkileşimleri ile mümkündür. Doğal tabakalarda olduğu gibi metalik yüzeylerde de temas yüzeylerin doğrudan temasını önler. Yağ tabakası ile doğal tabaka arasındaki fark; doğal tabakanın havanın etkisi ile içerisinde tesadüfen çok az miktarda yağ molekülleri bulunan oksit bakasından oluşmasıdır. Buna karşın yağ tabakası temas halinde sürtünen yüzeyleri yağlamak amacıyla kullanılan yağ moleküllerinden oluşur. Burada önem arz eden yağ tabakasının akma ve kopma mukavemetidir. Yağ tabakasının kopma mukavemeti doğal tabakaya göre çok fazla olduğundan doğrudan temasta olan metal-metal yüzeyler çok azdır. Bazı adi yağlara katık (aditif) denilen bir takım ek maddeler konularak akma ve kopma mukavemetleri artırılmaya çalışılmaktadır.

Yağ içerisine organik yağlardan oluşan ve metal yüzeylerle kimyasal rekasiyona girerek temas yüzeyleri arasında kopma mukavemeti yüksek yarı sıvı metalik sabunlar meydana getiren katık maddeler çok az oranda ilave edilir. Sınır sürtünmesi sadece absorpsiyon

tabakalarından oluşan kimyasal reaksiyon esasına dayanan tabalardan oluşmaktadır. Kuru sürtünmede olduğu gibi bu sürtünme şartlarında çalışan sistemlerin sürtünme katsayısı deney ile belirlenir.

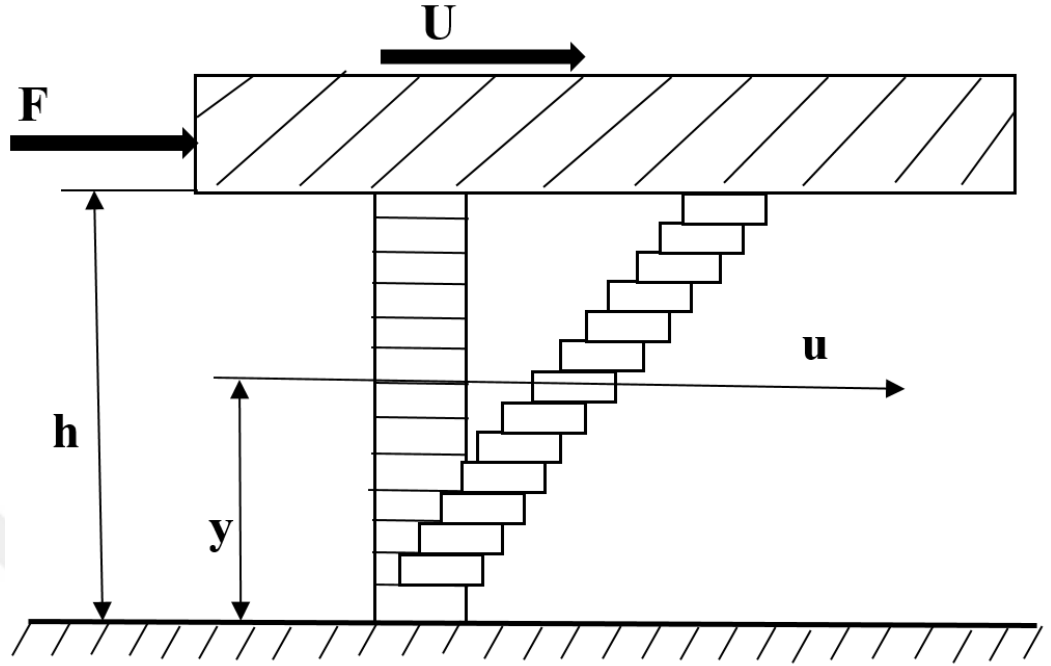


Şekil 2.2. Sınır sürtünmesi

2.1.1.c. Sıvı sürtünme

Temas halinde olan metal yüzeylerin bir yağ tabakası ile tamamen ayrıldığı sürtünme şekline sıvı sürtünmesi adı verilmektedir.

Adezyon yolu ile yüzeye yapışan yağ tabakaları metal yüzeyleri ile doğrudan temas halindedir. Temas yüzeyi U hızıyla hareket ederken yüzeye yapışmış olan yağ tabakasının hızı da U olur. Sabit yüzey arasındaki tabakanın hızı ise sıfır değerine eşittir. y mesafesine bağlı olarak ara tabakanın hızı ise 0 ile U arasında değişim gösterir. Sıvı sürtünmesinde sürtünme olayı birbiri üzerinde kayan yağ tabakaları arasında meydana gelir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Sıvı sürtünme (Kobrick 2010)

Yağ tabakasında meydana gelen hidrodinamik ve hidrostatik basınç, sıvı sürtünmenin oluşmasında rol oynayan esas etkili faktördür.

Hidrostatik sürtünme durumunda; Dış kuvvetin dengelenerek ve temas yüzeylerinin birbirinden ayrılması için bir pompa kullanılarak basınçlı yağ yüzeyler arasına gönderilir. Statik sıvı sürtünmesi izafi hareket yapan bütün sistemlerde yüzeyin geometric ve kinematic şekline bağlı kalmadan sağlanabilir.

Hidrodinamik sürtünme durumunda; yağ tabakasında temas yüzeylerinin geometric ve kinematik şartlarına bağlı olarak kendiliğinden bir basınç oluşur. Hareketin başlangıcı esnasında ve durması esnasında kuru ve sınır sürtünmesi gerçekleşir. Bu sürtünme durumu ile temasta olan sistemlerde aşınma olayı gerçekleşir.

2.1.1.d. Kayma sürtünmesi

En basit şekilde iki yüzeyde sürtünme kuvveti oluştuğunu varsayan Bowden ve Tabor modelinde temas alanlarında oluşan kayma sürtünmesi durumunda bir adezyon ve deformasyon kuvveti olduğu farz edilir. Sürtünme kuvveti F değerini adezyon kuvveti F_{adh} ve deformasyon kuvveti F_{def} 'in birleşimi olarak düşünmek gerekir (Hutchings 1996).

Temas alanlarındaki pürüzlü yüzeylerin çekim kuvveti adezyon terimi olarak tanımlanır. Bu şekilde bir tanım ilk başta imkansız gibi görünür. Çünkü iki metal yüzeyden biri diğerine bastırıldığı zaman genellikle yapışmadığı düşünülür. Ama eğer yüzey temizse film tabakaları gazlar ve oksitten temislenmişse metallerin temas yüzeyleri arasında adezyon gözlemlenir. Vakum altında da benzer şartlar gerçekleşebilir. Altın ve bakır gibi metallerde basıncın yüksek olduğu şartlarda kuvvetli yapışma görülür.

Bowden ve Tabor modeli adeziv kuvvetlerin mevcut olması nedeni ile uygulaması Kabul edilebilir. Temas halindeki iki metal arasında normal şartlar altında adezyon görülmesinin iki nedeni vardır. Birincisi oksitle kaplanacak yüzeyler, ikincisi ise yükün uygulanmadığı durumlarda yeterli gerilmeyi oluşturan elastik gerilmelerin pürüzlülük birleşimini bozmak için onların etrafına dağılmasıdır.

2.1.1.e. Yuvarlanma sürtünmesi

Yuvarlanma sürtünmesi, düz bir kütle yüzeyi üstünde yüklü bir küre veya silindirin yuvarlanması sırasında oluşan sürtünmeye denilir. Yuvarlanma sürtünme katsayısı, sürtünme katsayısından çok düşük, statik ve kinetik sürtünme katsayılarıyla nerdeyse aynıdır (Özsaraç 1999).

2.2. Aşınma

Mekanik etkenlerin etkisiyle temas halindeki yüzeylerden malzemenin koparak ayrılmasını aşınma olarak tarif edebiliriz. (Ludema,1996). DIN 50320’de “mekanik nedenlerle malzeme yüzeylerinden, küçük parçacıkların ayrılması sonucu, arzu edilmeyen şekilde meydana gelen değişiklik aşınmadır” şeklinde tanımlanmıştır. Aşınmadan ötürü deformasyona uğrayan yüzeyler ilk şekillerini kaybetmişlerdir ve parçalar arasında boşluklar meydana gelmiştir. Bundan dolayı da malzeme istenilen fonksiyonları yerine getiremez. Talaş kaldırma işlemi, parlatma ve taşlama işlemleri kontrollü ve istenilerek yapıldığı için ve ayrıca kimyasal, termali eskime, kopma gibi olaylar da aşınma olarak değerlendirilmez.

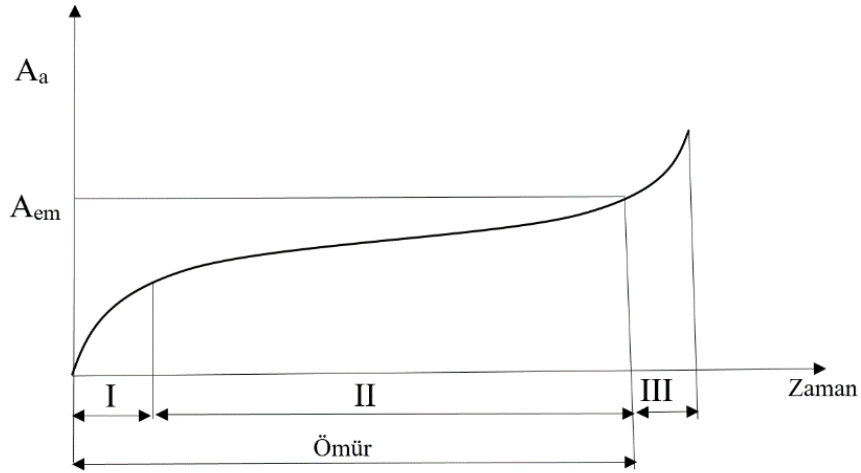
Mühendislik malzemelerinde meydana gelen yıpranmanın aşınma olarak değerlendirilmesi için aşağıdaki maddelerin gerçekleşmesi gerekir (Akkurt 1986):

1. Mekanik etkinin varlığı,
2. Bağlı harekete bağlı sürtünmenin oluşumu,
3. Malzeme temas yüzeyinde değişiklik oluşması
4. Devamlı bir hareketin olması

Temas halinde olan yüzeylerde oluşan aşınma; yağlama durumuna, yüzeylerin yapısına, normal yük, kayma hızı ve kimyasal şartlara bağlıdır. Bağlı olmayan yüzeylerde ise titreşimle aşınma gerçekleşebilir.

2.2.1. Zamanla gelişen aşınma

Zamanla gelişen aşınma üç kademedeki gerçekleşir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Aşınma–zaman bağıntısı

I. Aşama (Rodaj Safhası): Eş olarak çalışacak parçaların birbirlerine alışma safhası olarak adlandırılır. Temastaki parçaların çalışmaları esnasında ilk çalışma olduğundan dolayı büyük bir aşınma gerçekleşir ve kendinden sonra meydana gelecek aşınmaları büyük ölçüde etkiler. Bu bakımdan parka rodajlarının (rodaj cihazların normal hızlardan daha düşük hızda yüksüz olarak çalıştırılması) iyi yapılması ve kısa sürede gerçekleştirilmesi çok etkilidir. Bu safhada özel yağlar kullanılarak daha iyi ve kısa süreli rodaj elde edilebilir.

II. Aşama: Temas noktalarında çalışma sırasında meydana gelen aşınmadır.

III. Aşama: artan aşınma hızıyla birkilte meydana gelen şiddetli aşınma safhasıdır.

2.2.2. Aniden meydana gelen aşınma

Eş çalışan parçalarda hatalı parka seçimi ve yetersiz yağlamadan dolayı parçaların yüzeyinde ani bozulma, bazı hallerde kilitlenme ve buna bağlı çalışmaya durumundan kaynaklanan aşınma durumudur.

2.2.3. Aşınma sorunlarına giriş

Sertlik ve çekme mukavemeti gibi malzeme özelliği olmayan aşınma incelenirken, malzeme özelliğinin yanı sıra buna yol açan etkenlerin tamamını dikkate alarak

incelenmesi gereken bir sistem bütünlüğü gerekir (Bayer 1994). Tribolojik sistem bütünlüğü de denilen bu sistemde aşınmanın oluşması için esas sürtünme elemanı olan aşınma çiftine, karşı elemana, yüke, ara maddeye ve harekete gerek duyulur. Aşınma için incelenen eleman esas sürtünme elemanı, aşındıran eleman karşı eleman, katı sıvı ve gaz hallerinde bulunan maddeye ara madde denilmektedir. Vakumsuz şartlarda çevre devrye girerse üç elemanlı, yağlama da olursa dört elemanlı bir sistem oluşmuş olacaktır (TMMOB 2003).

2.2.4. Aşınmaya etki eden faktörler

- 1- Aşınan veya ana malzeme,
- 2-Aşındıran veya karşı malzeme
- 3-Ara malzeme,
- 4-Yük
- 5-Hareket
- 6-Parametrik olarak sıcaklık'da eklenebilir. Bu parametreler 'Şekil ve malzeme' ve 'Gerekli enerji' başlıkları altında iki grupta toplanabilir.

Aşınan ve aşındıran malmelere birlikte aşınma çifti denmektedir. Aşınma çifti ile ara malzemeye aşınma kombinasyonu denilmektedir. Ara malzeme sert taneli, sıvı, gaz ve buhar hallerinde olabilir. Oluşan aşınma parçacıkları da aşınmaya etkili bir şekilde katılırlar. Aşınmanın cinsini temas halindeki aşınma çiftinin relative hareketi belirler. Statik, dinamik veya darbe şeklinde yük olabilir. Triboloji sistemlerinde dinamik parametreler, malzeme parametreleri, çevresel koşullarda meydana gelen çok küçük bir değişiklik aşınmayı çok şiddetli olarak etkiler (Bhushan 2000).

2.2.5. Genel aşınma türleri

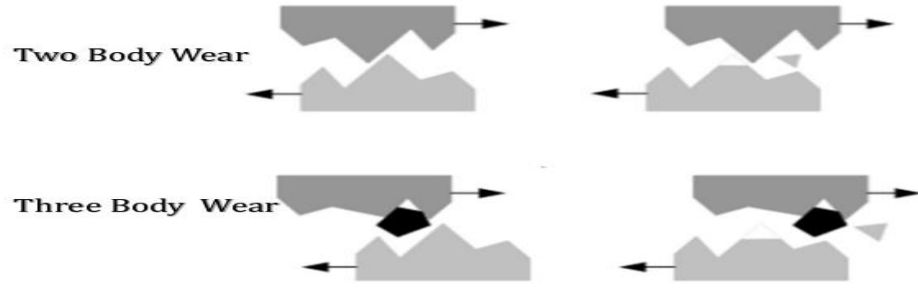
Aşınma genellikle 4 türde tanımlanmaktadır (Burwell 1975).

1. Adeziv aşınma
2. Abrasiv aşınma
3. Korozyon aşınması
4. Yorulma aşınması

Adeziv ve abraziv aşınma kayma mekanizmalarında olduğu gibi plastik deformasyonla oluşur. Burada parçacıkların kopması deformasyon sonucudur. Hem elastic hem de plastik deformasyonla meydana gelen korozyon ve yorulma aşınmasıdır. Yorulma aşınmasından parça kopmasına esneklik ve gevreklik neden olur. Korozyon aşınmasında ise etkili parametreler; sürtünme katsayısı ve kimyasal reaksiyonlardır (Bhushan 2000).

2.2.6. Abrasiv aşınma

Sert parçacıkların katı temas yüzeyine çarpmasıyla veya yüzey üstünde sürtünmesi sonucu abrasive aşınma dediğimiz aşınma olayı gerçekleşir. Genelde malzeme ağırlığında ve hacminde azalma şeklinde gözlemlenen bu aşınma şekli endüstriyel alanda yaygın olan bir aşınma şeklidir. Bu anlamda katı maddelerin yüklenip-boşaltılması, taşınması ve stoklanması esnasında sıkça görülen bir aşınmadır. Aşınan metalin ve parçacıkların sertliği abrasive aşınmada direnci önemli ölçüde etkilemektedir. Metal sertliği aşındırıcı sertliğinden ne kadar büyük olursa abrasive aşınma hızı da o derece düşmektedir (TMMOB 2003). Metal parçacıkları, metal oksitler ve toz gibi yabancı parçacıkların temas halinde sürtünen iki yüzey arasında mikroskobik talaş kaldırması ve malzemede oldukça derinlerde değişiklik meydana getirmesiyle abrasif aşınma gerçekleşir.



Şekil 2.5. Abrasiv aşınmanın mekanizması

2.2.7. Abrasiv aşınma mekanizmaları

2.2.7.a. Oymalı abrasiv aşınma

Oymalı abrasiv aşınma mekanizmasına baktığımızda malzemenin genellikle yüksek gerilme ile çarpılması sonucunda oluştuğunu görmekteyiz. Aşındırıcı sabit ve iyice desteklenmiş olduğundan güçlü bir etki göstererek metal malzeme üzerinde ağır aşındırıcı malzeme basınçla metal malzemeyi oyarak kesme aletleri gibi parçayı aşındırırlar. Belirli bir tokluğa sahip matriste dağılmış karbür içeren manganlı östenitik çelikler gibi alaşımlar aşındırıcı olarak kullanılırlar.

2.2.7.b. Yüksek gerilimli abrasiv aşınma

Temas halinde olan iki yüzey arasında mineral parçacıklar ile yüzey arasında ya da yeterlikuvveti olan kumlu ortamlarda meydana gelen aşınma şeklidir. Yüzeylerde normal yük dağılımı düşük olmakla birlikte taneciklerde yük uygulama alanı düşük olduğundan her bir parçacıkta gerilmenin oldukça yüksek olduğu görüldüğü için bu aşınma şekline yüksek gerilimli aşınma adı verilmektedir. Bu aşınmada yüzeyler arasında tutulan abrasive parçacıklar çok küçük bölgede aşınma yaparlar. Temas basıncının yüksekliği çentik ve aşınma yüzeyi olusturarak çatlak meydana getirir ve bunun sonucunda abrasive parçacıkları yüzeyden koparır.

Bu aşınma mikroskobik ölçekte mikroskobik ölçekte kesme, deformasyon ve yüzey çatlağının ve makroskobik ölçekte yırtılma ve aynı zamanda yorulma ve parçalamanın ortak bileşimidir (Bailey 2000).

2.2.7.c. Düşük gerilimli abrasiv aşınma (erozyon abrasiv aşınması)

Düşük gerilimli abrasive aşınma; hafif yüklü abrasive parçacıkların aşınma temas yüzeyine çarparak yüzey boyunca hareket ettiği ve bunun sonucunda mikroskobik olarak kesme ve pulluklama olayının olduğu aşınmadır. Sulu veya nemli ortamlarda korozyon aşınmaya büyük ölçüde katkıda bulunmakla birlikte her iki ortamda da düşük gerilimli aşınma birincil türdür. Düşük gerilim altında metal kalınlığının aşınma miktarı zamanla azaldığı için toplam aşınma devamlı yenilenen oksit tabakalarının kalınlığından dolayı oluşur (Bailey 2000). Bu aşınma mikro ölçekte kesme, pulluklama, yorulma ve çatlak olmak üzere dört mekanizmayla oluşur.

2.2.7.d. Kesme

Bu mekanizmasında iğne şeklinde aşındırıcı uç aşınan malzeme üzerinde parçacık koparmak için hareket ederek kesme mekanizmasını gerçekleştirir SEM analizinde aşınma izleri incelendiği zaman mikro kesme hatları daha çok iki cisimli abrasiv aşınmaya benzer bir mekanizma göstermektedir. Bu mekanizmayı açıklamak için iğne şeklinde aşındırıcı uç aşınan malzeme üzerinde hareket ederek aşınan malzeme üzerinden parçacık kopar (Stachowiak *et al.* 1993).

2.2.7.e. Pulluklama

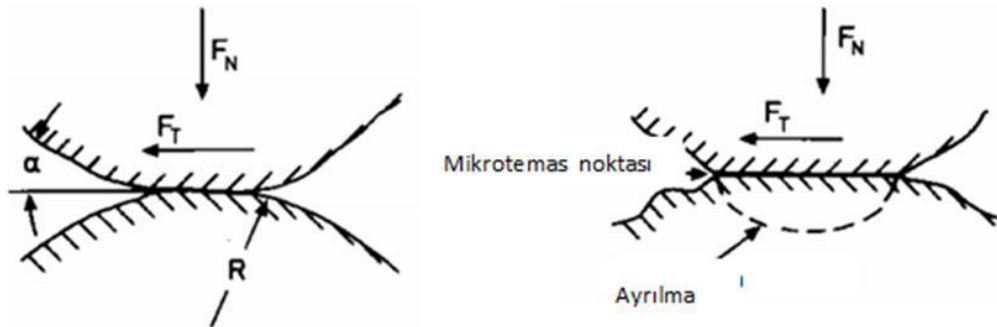
Metalin aşındıran parçacıklar üzerinde yer değiştirmesiyle pulluklama mekanizması ortaya çıkar. Pulluklama sonucu malzeme yüzeyinde az miktarda hacim kaybıyla zayıf yüzeyde abrasiv oyuklar oluşur. Burada temas noktası tek olan keskin aşındırıcının yüzeye teması ile yüzeyde pulluklama ile oyuk oluşmaktadır (Stachowiak *et al.* 1993)

2.2.7.f. Yorulma

Malzeme yüzeyinde aşındırıcıların etkisiyle oluşan gerilme sürekli plastik hasara neden olan yorulmaya neden olmaktadır. Abraziv aşınma mekanizması daha yavaş ve yumuşak olduğu için tekrarlı deformasyonla malzemede aşınma parçacığı üretir (Vingsbo *et al.* 1981).

2.2.8. Adeziv aşınma

Yağlamalı ya da yağlamasız birbirine temas eden iki düzgün yüzeyin kayması veya yapışması şeklinde gerçekleşen aşınma türüdür. Mühendislikte bazı farklılıklarına rağmen adeziv aşınma; kaynaklaşma, yanma ve yapışma aşınması olarak da adlandırılır. Bu mekanizma eş çalışan yüzeyler arasında yük taşıyan pürüzlü yüzeylerdeki mikro kaynakların keme olayı sonucu ortaya çıkar (Lipson 1967). Ayrıca yüzeyden kopan mikro parçaların diğer yüzeye yapışması ve sonrasında kayma devam ettiği için yapıştığı yüzeyden tekrar kopup koptuğu yüzeye de geri yapışabilirler veya her iki yüzeyden bağımsız bir parça olarak da aşınmaya devam edebilirler. Bu aşınma şekli kafes yapıları birbirine benzeyen metallerin korozyon ile aşınması ile tarif edilebilir. Birbirinden farklı Kristal yapısı olan aşınma çiftlerinde iki yüzeyi ayıran film kalınlığının başarılı olmaması sonucu aşınma olduğundan kaynaklaşma olayı düşünülmemelidir. Film kalınlığının başarısızlığı yüksek oranda basınç, sıcaklık ve kayma hızına neden olur. Örnek olarak motor yataklarının sarması verilebilir.



Şekil 2.6. Adeziv aşınma gösterimi

(FN: Normal Kuvvet, FT: Temas Kuvveti, α : Hareket Açısı)

Adeziv aşınma için yapılmış deney sonuçlarını aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür:

1. Adeziv aşınma genellikle birbirine benzer ve kolay alışım oluşturabilen malzemele arasında oluşur.
2. Aşınma; yüzeylerin normal kuvvetine ve izafi hızına bağlıdır. Pratikte görülen uygulamalarda nispi olarak daha yüksek yük ve hızda görülmektedir.
3. Bu aşınma sürtünmenin görüldüğü tüm kaynak birleşimlerinde görülmektedir (Bhushan 2000).

Aşınan malzeme hacmini aşağıdaki gibi hesaplamak mümkündür.

$$V_a = k_a \cdot A_h \cdot L \quad (2.1)$$

V_a =Aşınan malzemenin hacmi

k_a =Kaynak birleşim noktalarının aşınmaya katılan kısmı

A_h =Yükü taşıyan alan

L =Kayma mesafesi

Metallerin adeziv aşınmasında $10^{-7} < k_a < 10^{-2}$ arasındadır.

4. Temas yüzeylerinin biri daha sert ise kaynak bağları kopması yumuşak malzemede görülür ve malzeme transferi yumuşak malzeme yüzeyinden sert malzeme yüzeyine doğru olur.
5. Adeziv aşınmada yüksek basın ve hız altındaki yüzeyler arasına katkılı bir yağ konursa sınır sürtünme bölgesi de dahil yüzeylere yapışmış yağ tabkası büyük ölçüde adezyon aşınmasını çok etkili bir şekilde önlemektedir.

Adeziv aşınmada yağlamanın etkisi çok büyüktür. Sınır sürtünme bölgesinde dahi yüzeylere yapışmış yağ tabakası büyük ölçüde adezyon aşınmasını önler. Yüksek hız ve basınç altındaki yüzeyler arasına katkılı bir yağ konursa aşınma önlenabilir.

6. Doğal nem ve oksit tabakası aşınmanın oluşması üzerinde büyük etkiye sahiptir.

2.2.9. Yorulma aşınması

Değişken tekrarlı yüklerin temas eden yüzeylere etkimesiyle oluşan plastik hasar sonucu meydana gelen aşınmadır. Temastaki iki yüzey yük altında periyodik temas ettirildiğinde adeziv aşınmanın yanında yorulma aşınması da oluşur (Bhushan 2000). Tribolojik incelemelerde malzemelere zaman veya konuma göre değişen yüklemeler yapıldığı için diğer aşınma mekanizmalarının yanında genellikle yorulma aşınmasının olduğunu gösteren yorulma izleri de görülmektedir. Burada da temas halindeki aşınan yüzeyde çatlak oluşumunu takiben çukur ve oyuklar ile yorulma hasarı meydana gelir (TMMOB 2003). Bu aşınma yuvarlanma hareketi yapan malzeme parçalarının yüzeyindeki malzeme yorulmasıdır.

Basit yorulma ve tahrip edici yorulma olmak üzere iki tip yorulmadan bahsetmek mümkündür. Basit yorulma da oluşan çukurcuklar küçük ve az sayıda olup büyümedikleri için makine parçasının çalışmasına engel olmazlar. Tahrip edici yorulmada ise çukurcuklar zamanla yayılarak büyür ve makine parçalarını çalışamaz hale getirirler (Akkurt 1986).

2.2.10. Korozyon aşınması

Korozyona uygun şartlar olduğunda metal parçaları çevreleri ile elektrokimyasal ve kimyasal reaksiyona girerek çeşitli bileşikler oluştururlar ve metalin iç yapısında buna bağlı zayıflama meydana gelir. Metale zayıf bağlantılı bu bileşikler ana metalden koparak korozyon aşınmasına neden olurlar (Karadeniz 2005). Korozyon aşınmasını hem korozyonun hem de aşınmanın bir arada meydana geldiği korozyon şekli olarak

tanımlamak daha doğrudur. Korozyon aşınmasında malzeme kaybı iki mekanizma ayrı ayrı meydana geldiğinde oluşan malzeme kaybından daha fazladır.

Burada aşınma mekanizması iki kademede gerçekleşir:

1. Ortamla reaksiyona giren temas yüzeyi çiftleri yüzeyde reaksiyon sonucu bir tabaka oluştururlar,
2. Oluşan reaksiyon tabakası temastan dolayı çatlak oluşumu ya da abrasive etkilerden dolayı hasara uğrar.

Korozyon aşınmasında çevre koşulları etkili parametredir. Aşınma sonucu meydana gelen ürünler aynı zamanda aşınma hızını da artırır. Genelde korozyon mekanik aşınmaya neden olmasına karşın, mekanik aşınma korozyon aşınmasını her zaman etkilemez (Burhan 1994).

Korozif aşınma ortam şartları ve sıcaklık faktörüne bağlı olarak sekiz şekilde meydana gelir (Kobrick 2010).

1. Nitrülenme
2. Karbürlenme ve metal tozlaşması
3. Oksitlenme
4. Sülfürlenme
5. Halojen korozyonu
6. Kül (tuz) çökeleği korozyonu
7. Erimiş tuz korozyonu
8. Sıvı metal korozyonu

malzeme parçacıklarının ayrılmasıyla gerçekleşir. Aşınma ile taşınan malzeme hacmi δV , temas boyu a 'nın küpü ile orantılıdır.

$$\delta V = (2 \cdot \pi \cdot a^3) / 3 \quad (2.3)$$

Her pürüzlülük temasıyla parçacık ayrılması gerçekleşmez. Bu orantıyı κ olarak kabul edelim ve buna orantı sabiti diyelim. Böylece bir çift yüzeyin ($2 \cdot a$) mesafesi boyunca kaymasından dolayı birim kayma mesafesine düşen ortalama aşınmış malzeme hacmi;

$$\delta Q = (\kappa \cdot \delta V) / (2 \cdot a) = (\kappa \cdot \pi \cdot a^2) / 3 \quad (2.4)$$

ve toplam aşınma oranı;

$$Q = \sum \delta Q = (\kappa / 3) \cdot (\sum \pi \cdot a^2) \quad (2.5)$$

Toplam normal yük ise;

$$\delta W = P \cdot (\sum \pi \cdot a^2) \quad (2.6)$$

bulunur. Buradan;

$$Q = (\kappa \cdot W) / (3 \cdot P) \quad (2.7)$$

$1/3$ faktörünü orantı sabiti içine alarak ($\kappa / 3 = K$) şeklinde kullanabiliriz ve iz bırakma sertliği H içinde ($P = H$) diyebiliriz. Bu değişikliklerden sonra denklem yeniden yazılırsa;

$$Q = (K \cdot W) / H \quad (2.8)$$

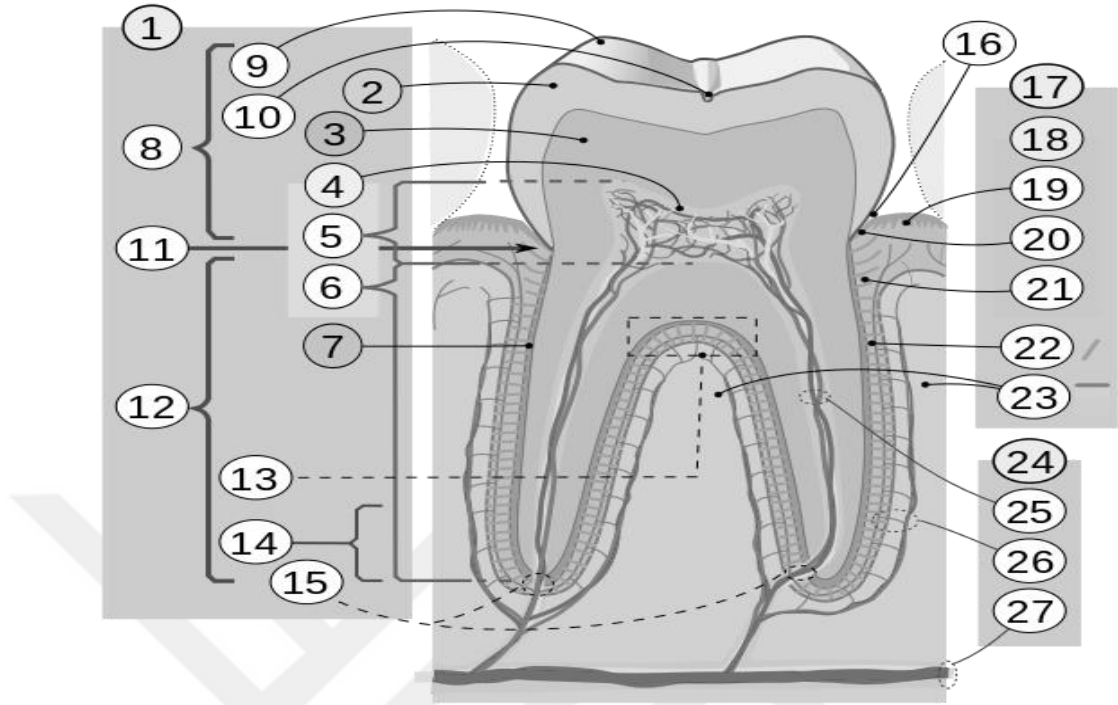
elde edilir.

Bu denklem Archard aşınma denklemi olarak da adlandırılmaktadır. Burada Q ; birim kaymadaki aşınma mesafesini, W ; makroskobik özellikteki normal yükü, H ; yumuşak yüzeyin sertliğini ifade eder. Aşınma sabiti olan K , her zaman birden küçük değer alan boyutsuz bir sayıdır. Bu sayı farklı sistemlerde aşınma miktarlarını karşılaştırmada önemli bir parametredir. Ama mühendislik uygulamalarında K/H oranının kullanılması daha doğru olacaktır. Burada k sembolü boyutlu aşınma katsayısı ismini alarak birimi $\text{mm}^3/\text{N.m}$ 'dir. N birim kayma yükü, mm^3 birim kayma mesafesi için aşınmadan ötürü taşınan malzeme miktarını tanımlar. k ile elde edilen aşınma miktarı farklı malzeme gruplarında aşınma oranlarının karşılaştırılmasına yardımcı olur. (Hutchings 1996).

(2.8) eşitliğini dikkate aldığımızda K değeri verilmiş bir kayma sisteminde aşınma sebebiyle oluşan malzeme kaybı ve kayma mesafesi orantılı olur ve eğer normal yük değiştirilirse orantılı bir şekilde aşınma oranı da değişir. Bazı durumlarda kayma başlangıcında yüzeyler arasında dengeli hal kuruluncaya kadar kısa bir dönem aşınma oranı anlık olarak normal aşınmadan daha küçük veya daha büyük değer alabilir.

2.3. İnsan Dişi ve Dişte olan Aşınma

İnsan dişindeki aşınmayı çözebilmek için diş yapısı ve anatomisini ve kullanılan restorasyon malzemelerinin uygulama metotlarını iyi bilmek gerekir.



Şekil 2.8. 1.Diş 2.Mine 3.Dentin 4.Pulpa 5.Koronel Pulpa 6.Kök Pulpası 7.Sement 8.Koron 9.Tüberkül/Kusp 10.Fissür 11.Boyun 12.Kök 13.Furkasyon 14.Apeks 15.Apikal Foramen 16.Gingival Sulkus 17.Periodontium 18.Dişeti 19.Papilla 20.Mine-Sement Sınırı 21.Alveol 22.Periodontal Ligament 23.Alveol Kemiği 24.Sinir ve Damar Ağı 25.Dişteki Ağ 26.Periodontiumdaki Ağ 27.Alveol Kanalındaki Ağ

2.3.1. Diş anatomisi

Dişin anatomisine baktığımızda; mine, dentin, sement ve pulpadan oluştuğunu görmekteyiz. Dişin en sert tabakası olan ve hidroksiapatitten oluşan ve dişe şeffaflığını veren mine doğada elmadandan sonraki en sert madde olarak bilinmektedir. Sement ise kök yüzeyini mine gibi örten ince tabakaya verilen addır. İki tabakanın altında bulunan tabaka ise pulpanın içinde bulunduğu yarı sert dentin tabakasıdır. Bu tabaka dişe sarı-koyu rengi verir. Dişlerin yaşlandıkça daha sarı görünmesinin nedeni diş yaşlandıkça dentin miktarının artıp mine miktarının azalmasıdır (Berti 1993).

Dişin iç kısmında diş özü de denilen pulpa; damar ve sinirlerden oluşmuş zengin bir bağ dokusudur. Diş özü pulpa; diş basınçları, kanlanma, termal etkilerin algısı gibi durumların gerçekleştiği kısımdır. Temelde bağ dokusu olan pulpa yaşla ters orantılı

olarak içerisinde azalan Odontoblast, Fibroblast, kılcal damarlar, sinirler ve doğru olarak artan bağ dokusundan oluşur.

2.3.2. Dişte ortaya çıkan aşınma

Dişteki aşınmayı dişin sert dokusunun patolojik olarak deformasyonu olarak tanımlamak mümkündür. Bu aşınmanın sebepleri arasında; asitler, mekanik aşındırma hareketleri, çiğneme yükleriyle dişlerin esnemesi sayılabilir. Çürüksüz lezyon tedavisinde; lezyonun yapısı, hasta şikayetleri ve aşınma derinliği dikkate alınarak tedavi planı yapılır.

Klinikte aşınmalar olarak adlandırılan çürük dışındaki kronik olaylar dişleri farklı şekilde etkilemektedir. Diş aşınmalarında rol alan farklı etkenlere göre atrizyon, erozyon, abrazyon ve abfraksiyon olmak üzere dört gruptan oluşur. Atrizyon dişlerin birbirleriyle teması sonucu meydana gelir. Erozyon dişlerin asit atıkları sonucu kimyasal anlamda çözünmesi, abrazyon ise fiziksel etkenler sonucu meydana gelen sert doku kayıplarıdır. Abfraksiyon ise okluzal streslerin altında servikal bölgede meydana gelen aşınma olarak tanımlanmaktadır.

2.3.2.a. Atrizyon

Atrizyon kelimesinin kökenine bakacak olursak; Latince ‘herhangi bir şey karşısında sürtünme hareketi’ anlamında olan attrivi, attere, attritum kelimelerinden türetilmiştir. Bu terim arada herhangi bir yabancı cisim olmadan diş dişle temasın sonucunda meydana gelen sert dokuların fizyolojik aşınması olarak tanımlanmaktadır.

Büyük oranda yaşlanma ile ilgili olan atrizyon normal çiğneme yükü altında düzenli ve yavaş olarak oluştuğunda fizyolojik atrizyon adını alır. Yaşlanmaya bağlı olarak dişlerin okluzal, insizal ve proksimal yüzeylerinde gelişen atrizyonun erken safhalarında meydana gelen aşınma, anterior dişlerin insizal kenarları ve posterior dişlerin okluzal yüzeylerinde parlak yüzeyler olarak görülmektedir. Kapanışta olan karşıt dişlerde de bu

bu düzgün ve parlak lezyonlar görülmektedir. Şiddetli vakalarda dentin açığa çıkması aşınma hızında artışa neden olur (Bishop 1997).

2.3.2.b. Erozyon

Latince de çürümek ya da yenmek anlamında olan erodere, erosum ve erosi kelimelerinden türetilmiş olan erozyon kelimesi genel anlamda elektrolitik ve kimyasal yollarla bir maddenin yüzeyinin kademeli bir şekilde yıkılması şeklinde tanımlanmaktadır. Dental erozyonu ise bakterisiz meydana gelen kimyasal bir olay sonucu diş dokusunun kaybedilmesi olarak tanımlayabiliriz. Diş minesinin pH kritik değeri 5.5 değerindedir. Eğer ağız ortamının pH'sı bu değerin altına düşerse asit ataklarındaki süre ve sıklık parametrelerine bağlı olarak dişte erozyon gerçekleşir.

Mine yüzeyini etkileyip apatit kristallerinin çözünmesine neden olan erozyon minedeki pitler ve porlar vasıtasıyla mine alt tabakalarındaki prizmaların da yıkımına neden olur.

Erozyon olayında dentin kısmında ilk etkilenen bölge peritübüler dentin bölgesidir. Sonrasında intertübüler bölgenin etkilenmesiyle dentin tübüllerinde genişleme olur. Dentinde meydana gelen bu olaylar erozyona uğramış dişlerin hassaslığını da açıklamaktadır. Ancak çok hızlı gelişen olaylarda bu hassasiyet görülmekte ve yavaş gelişen eroziv lezyonlarda bu hassasiyete rastlanmamaktadır.

Erozyonun meydana gelmesi; içsel faktörler, dışsal faktörler ve predispozan faktörler olmak üzere üç grupta incelemek mümkündür (Meurman 1996).

2.3.2.c. İçsel faktörler

İç faktörlere bağlı olarak oluşan erozyon kusma, ruminasyon, reflü, regürjitasyon, blumia, anoreksia ve nervosa gibi bozukluklar nedeniyle oluşan gastrik asittir ve ağız boşluğuna gelmesi ve dişleri etkilemesi sonucu erozyon meydana gelir.

Gastrik asidin sert diş dokularını etkileyebilmesi için bir iki yıl süre ile haftada bir çok defa görülmesi gerekmektedir. Aynı zamanda bu durum hastanın ağız diş sağığı, hijyen ve diş sert dokularının morfolojik yapısına da bağıdır.

Aneroksia ve blumia nervosa gibi psikosomatik bozukluklarda erozyon görülme sıklığı oldukça fazladır.

2.3.2.d. Dışsal faktörler

Erozyon olayında dışsal faktörleri 4 ana guruba ayrılmaktadır.

1. Çevresel veya mesleki faktörler
2. Diyetten kaynaklanan faktörler
3. İlaçlar
4. Yaşam tarzı

2.3.2.e. Predispozan faktörler

Erozyonu önleyebilmesi bakımından tükürüğün 5 önemli fonksiyonu bulunmaktadır:

1. Ağız ortamından potansiyel erosiv ajanların dilüsyonu ve temizlenmesi,
2. Reminerilizasyon için gerekli fosfat, kalsiyum ve fluorid ihtiva etmek.
3. Tükürükteki kalsiyum ve fosfata bağılı olarak diş yüzeyinde süper sature bir durum oluşturmak.
4. Tükürük proteinleri ve glikoproteinleri ile kazanılmış pelikül oluşturarak mine yüzeyinde diet asitleri yoluyla başlatılan deminerilizasyonu önlemek.
5. Diet asitlerinin nötralizasyonu ve tamponlanması.

2.3.2.f. Abrazyon

Abrazyon kelimesinin Latince kökenine baktığımızda ‘kazımak’ anlamına gelen abrasi, abradere ve abrasum kelimelerinden türemiş olduğunu görmekteyiz. Silme, öğütme ve kazıma gibi mekanik olaylar sonucu yapının veya dokunun aşınmasını belirtir (Litonjua LA, 2004).

Ağızda birbirine temas eden dişlerde yabancı cisimlerden dolayı oluşan aşırı mekanik yüklerle diş sert dokularının patolojik olarak kaybı da dental erozyon olarak tanımlanmaktadır. Abrazyon kavramını diş temasının dışında diğer dış faktörlerden dolayı oluşan aşınma olarak da tanımlamak mümkündür.

Dental abrazyon pipo içmek, dişleriyle kuru yemiş kırmak, tırnak yemek gibi alışkanlığı olmak ve bazı mesleki özelliklerden dolayı da meydana gelebilir. Marangozlar, müzisyenler, terziler de mesleki alışkanlıklardan dolayı dişlerinde en fazla abrazyon görülen kişilerdir.

Dental abrazyonun en fazla servikal bölgede görülmesi çeşitli değişkenler sebebiyle olduğu ve bu değişkenlerin abrazyonunun yayılmasına etkisi yapılan çalışmalarla kanıtlanmıştır. Servikal abrazyon lezyonlarının diş dokusundaki aşınmayı artırdığı bilinmektedir. Bu değişkenleri aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür.

I) Hastaya ilişkin faktörler:

- a) Diş fırçalama
- b) Diş fırçalamasında uygulanan yük
- c) Diş fırçalama süresi
- d) Diş fırçalama aralıkları
- e) Diş fırçalamanın başlatıldığı bölge ve dişlerin dental arktaki pozisyonları

II) Kullanılan materyallere göre faktörler:

- a) Diş fırçasının şekli ve kıl sertliği

b) Kullanılan diş macununun aşındırıcı özelliği ve miktarı

2.3.2.g. Abfraksiyon

Latince’de kırmak anlamında olan abfraksiyon; fregi, frangere ve fractum kelimelerinden türemiş bir terimdir.

Abfraksiyon dişlerdeki tüberküller arası esneme hareketinden kaynaklı biyomekanik kuvvetlerden dişlerde servikal lezyonların gelişmesiyle meydana gelmiştir.

Mine sement arası sert doku kaybı servikal lezyon olarak tanımlanır. Bu lezyonların abrazyon ve/veya erozyon sonucu olduğu uzun süredir bilinen bir durumdur. Son yıllarda ise araştırmacılar tüberküller arasındaki esneme hareketinin de buna neden olduğunu gösteren bir teori öne sürmüşlerdir (Eisenburger 2003).

Diş esnekliğini ise okluzal yüklerle lateral ve aksiyal yönde bükülme olarak tanımlamak mümkündür. Bu esneme hareketleri diş minesi ve onu destekleyen dentinde çatlak oluşumuna ve çekme ve sıkıştırma kuvvetleriyle hidroksiapatit kristalleri bağlarının yıkılmasıyla doku kaybına sebep olmaktadır

Tooth flexure theory’sine göre bir veya birkaç diş parafonksiyonel yükler altında çekme, kesme ve sıkıştırma tipinde yüklere maruz kalırlar. Bu teoriden yola çıkarak; dişlerde görülen lezyonların dişlere yüklene okluzal kuvvetlerin ekzantrik yayılımı sonucu meydana geldiği düşüncesini kuvvetlendirir.

Bazen tek bir dişte bazen de birkaç dişte görülebilen abfraksiyon lezyonlarının oluşuktan sonraki şekillerine baktığımızda pürüzsüz, kama şeklinde ve keskin kenarlı yüzeyler olduğu görülmektedir.

2.3.3. Diş dolgusu

Kök kanal tedavisinde diş hekimlerince karşılaşılan problemler herhangi dental bir kaviteyi doldurken karşılaşılan problemlerle çoğu yönden benzetilmektedir. Koronal kaviteleredeki boşluk kolay görülürken, kök kanal sisteminde apikal foramenin ve majör aksesuar forameninin boşluksuz doldurulması gerekmektedir. Operatif diş hekimliğine bakıldığında kavitedeki bütün çürük dentinin temizlenmesi, uygun dolgu malzemesinin yerleştirilmesi ve sekonder çirğin oluşmasının engellenmesi gerekir.

2.3.4. Diş restorasyonu

Diş restorasyonu (dolgu, kuron) kırığı veya çürüğü olan dişlerin restore edilip normal görünümüne ve işlevlerine kavuşmasına denmektedir. Restorasyon esnasında kullanılan maddeler dolguya verilen adında belirlenmesine yardımcı olur. Restorasyonla diş normal yeme ve ısırma işlevini yerine getirir. Aynı zamanda estetiği sağlayarak yüzün eski görünümüne ya da daha güzel bir görünüme kavuşmasını sağlar (Holbrook 2003).

2.3.5. Çeşitli diş restorasyonları:

2.3.5.a. Amalgam

Amalgam, bir alaşımdır yani iki veya daha fazla metalin bileşimi olabilir.

Amalgam dolgular (gümüş dolgular) civa, toz gümüş ve kalay bileşiminden oluşur. Dolgu yaparken ana kural olarak iyi bir kavite (oyuk) hazırlanır ve yapılan dolguyla dişe çürümeden önceki doğal biçimi tekrar verilmeye çalışılır.

Gümüş dolgular 24 saat içinde sertleşerek işlev göreceğe hale gelirler. (amalgam dolgu yapılan dişin üzerinde ilk 24 saat boyunca çiğneme işlemi yapılmamalıdır.)

Amalgam dolgular zaman içinde üzerlerine gelen kuvvetler ve metal yorgunluğu nedeniyle kırılabilirler. Bu durumda koruma özelliklerini kaybederek altlarındaki dişte çürüğün gelişmesine engel olamazlar.

Amalgam dolgular metal alaşımı olmaları nedeniyle, sıcakta ve soğukta genişler ya da daralır. Bu durum sonunda dişin çatlamasına neden olabilir ve bunu düzeltmek için bir kuron gerekebilir.

Amalgam dolgularda kullanılan ve toksik bir ağır metal olan civa nedeniyle, amalgam dolguların “civa zehirlenmesi” yapabilirliği ile ilgili tartışmalar devam etmektedir ve kullanımları artık neredeyse sona ermiştir. Buna rağmen amalgam dolgular, bazı ülkelerde ve bazı bölgelerde hala olarak kullanılmaktadır. Amalgam dolguların yerini Amalgam, bir alaşımdır yani iki veya daha fazla metalin bileşimi olabilir.

Amalgam (gümüş dolgu) iki ya da daha fazla metalin birleşimi ile oluşan birer dogu çeşididir. Bu alaşım civa, kalay ve toz gümüşten oluşmaktadır. Dolgu yapmada ana kural iyi bir oyuk yani kavite oluşturularak dişe dolgu malzemesiyle eski şeklini geri vermeye çalışmaktır.

Amalgam dolgular zaman içerisinde okluzal kuvvetler ve metal yorgunluğundan dolayı kırılabilirler. Böyle bir durumda dişi koruma özelliklerini kaybederek altlarındaki dişin çürümesini engelleyemezler.

Metal alaşımı oldukları için sıcak ve soğukta genişleyip daralarak dişin çatlamasına neden olabilirler. Bunu da düzeltmek için kuron gerekebilir.

Bu alaşımda kullanılan civanın toksik özelliği nedeniyle amalgam dolguların civa zehirlenmesi olmasına sebebiyet verebileceği tartışma konusudur ve bu dolguların kullanımları neredeyse sona ermiştir. Bazı ülke ve bölgelerde bu dolgular hala kullanılıyor olmasına rağmen bu dolguların yerini gelişen modern kompozit dolgular almaktadır.



Şekil 2.9. Amalgam dolgular

2.3.5.b. Kompozit dolgular

Dolgu malzemesi olarak kullanılan kompozit reçineler dişin rengine beyaz veya polimer dolgu olarak da adlandırılan polimer bir maddedir.

İçerisinde silikon dioksit prçacıkları da bulundıran kompozit reçine dolgu maddeleri diş ile aynı renkte olduğu için beyaz dolgu maddesi adını almaktadır.

Bonding; dişin şeklini ya da rengini değiştirmek, bir kusurunu kapatmak veya büyütme amacıyla dişe yapılan ilavelerdir ve güümüzde en çok uygulanan dişhekimliği koruyucu uygulamalarından birisidir. Burada malzemeler doğal dişin dış kısmına tutturulmak vasıtasıyla diş ve renk bozuklukları kolayca giderilmiş olmaktadır. Burada ilk önce diş çürüğü temizlenir ve kompozit dolgu tabakalar halinde diş kovuğuna doldurulur ve sabit dalga boyu ve yüksek yoğunluklu ışıkla sertleştirilme işlemi yapılır. Bu işlemin bitiminde dişin işlevlerini hemen yerine getirebilmesinden dolayı amalgam dolgulara göre avantajlı olmasını sağlar (Özgünaltay 2002).

Amalgam dolguda olduğu gibi bonding maddesi ile dişe yapıştırılan kompozit dolgu sayesinde dişte fazla madde kaybı olmadan dolgunun yerleşmesi sağlanmış olmaktadır. Dişte estetik işteyen n ve arka dişler için uygun olan bonding malzemesinin kullanımı ideal bir uygulama olacaktır.



şekil 2.10. Kompozit dolgular

2.3.5.c. nley dolgular

Ağız dışında hazırlanarak daha sonra ağıza yapıştırılan indirekt dolgular nley diş dolgusu adını alır. Dolgu yapmak için şekillendirilen oyuğun ölçüsü silikon ölçü maddesi ile alındıktan sonra altın veya porselenden hazırlanarak dişe yapıştırılmaktadır.



Şekil 2.11. İnley dolgular

2.3.5.d. Onley dolgular

Bu dolgularda inley dolgular gibi hazırlanır aradaki fark onley dolgularda diş yüzeyini de korumak için çiğneme yüzeyleri kaplanmaktadır.



Şekil 2.12. Onley dolgular

2.3.5.e. Kuron kaplamalar

Kuron kaplama adından da anlaşılacağı gibi dişin doğal kuron kısmının yerini alır. Dolgudan farklı olarak dişi tümüyle kaplar ve korur.

Kuron işlemine baktığımızda; herhangi bir etken den dolayı aşırı madde kaybı olan dişlerde dişlerin eski haline dönüştürülmesinde kalan dişin küçültülüp kaplanması durumudur. Çürükleri tedavi edilen diş tedavi edilip küçültülen dişler kuron hazırlanması için labaratuvara gönderilip hazırlanan kuronlar dişe yapıştırılır. Esas kuronlar hazırlanıncaya kadar akrilik kuronlar hazırlanıp dişin üzerine yapıştırılır. Kuronlar bazen sağlıklı dişlerin estetiği veya ağızdaki bir köprünün parçası olarak da kullanılabilir (Bartlett 2000).



Şekil 2.13. Kuron kaplamalar

2.3.5.f. Porselen laminalar

Veneer yani diğer adıyla porselen laminalar, dişlerin sadece ön yüzeyinden minimum miktarda medde kaldırılarak dişe yapıştırılan porselen yapraklara verilen addır. Estetik açıdan kalıcı onarım ve beyazlık sağlamaktadır. Bu yöntemin klasik kuronlardan farkı diştten çok az miktarda mine kaldırılmasıdır.



Şekil 2.14. Porselen laminalar

Seramik ve kompozit malzemeler, anterior dişlerin estetik ve fonksiyonunu dikkate alarak restorasyonun en üst seviyede olması için çeşitli alternatifler sunmaktadır. Anterior dişlerde estetik görünüm en önemli parametre olduğu için restorasyonu direk kompozit ile yapılmaktadır. Kompozit dolguda tahmin edilebilir, tekrar edilebilir ve doğal estetik bir görünüm elde edebilmek için kompozitin tabakalama tekniğinin iyi bilinmesi ve teknik ve estetik bilgiye sahip olunması gerekir (Akgül 2003).

2.3.6. Kompozit dolgu maddeleri

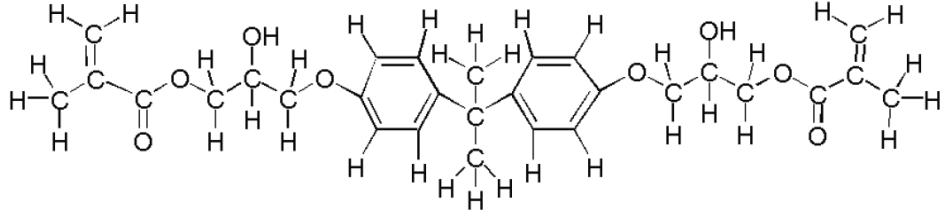
Kompozit; birbiri içerisinde erimeyen iki farklı kimyasal materyalin makro seviyede birbiri içerisinde dağılması, birlikte bulunması veya karışmasıdır. Dişin sert dokularına adezyon ile tutundukları için adeziv dolgu maddesi olarak da tanımlanabilmektedir.

Kompozitlerin Yapısı

Kompozit dolgular taşıyıcı faz olarak da adlandırılan organik yapı içinde belirli miktarlarda dağılan faz dediğimiz inorganik partiküllerin ilavesi ve bu karışım maddesinin katkı materyalleriyle polimerizasyonu sonucu oluşan materyaldir.

Buradaki dağılım kaba mekanik bir dağılımdır. Kompozitler özelliklerini oluşan iki fazın özelliklerinden ve bileşime katılma oranlarından almaktadırlar. Üçüncü faz olarak ise coupling veya birleştirici ajan olarak adlandırılan interfasiyal fazda kompozit dolgu maddelerine silan adı verilen organik bir silisyum bileşiğini söylemek mümkündür. Silanın vazifesi organik matriksle inorganik partiküller arasında bağ kurmaktır. Bu iki faz çeşitli faz yapılarıyla kompozitin özelliğini belirlemektedir.

Epoksi iskelet ile metakrilatın reaktif köklerinden oluşan bu faz bisfenol-A ile glisidil metakrilatın arasında oluşan reaksiyonun ürünüdür. (BİS-GMA) Şekil 2.15.



Şekil 2.15. BİS-GMA

Bisfenol-A'daki hidroksil grupları kompozitlerin su emmesine neden olduğu için hidroksi grubunun çıkarılması ile modifiye edilen, üretan diakrilat, BİS-GMA ve TED-GMA gibi resinlerle kullanılmaktadır. Bu fazın polimerizasyonu birseri başlatıcı ve aktivatör ile fotokimyasal, termokimyasal ve kemokimyasal yollardan biri ile gerçekleşerek materyalin sertleşmesini sağlamaktadır.

Kompozitlerin Polimerizasyonu

Kompozit polimerize edilirken resinlerin sertleşerek, uzun süre saklanması ve rengini korumak için gerekli materyaller organik matrikse ilave edilir. Bu maddeler peroksitlerin serbest köklere ayıran aminakseleratörler, polimerizasyonu başlatarak serbest kökleri oluşturan peroksit katalizörleri ve kompozitin durduğu yerde sertleşmesini önleyen inhibitörlerden oluşmaktadır. Bunun yanı sıra dolgunun U.V. ışığı ile renk değiştirmesini engellemek amacıyla U.V. ışığı absorbe ediciler de kullanılmaktadır.

Taşıyıcı Faz (İnorganik Faz)

Kompozit resinlerin doldurucusu; inorganik partiküller, filler veya dağılan faz olarak isimlendirilir. Kompozitlere dayanıklılık ve sertlik vermektedir. Dağılan fazın şekline göre kompozitler; tanecikli, laminar, iskeletli ve pulcuklu olarak sınıflandırılırlar. .Diş hekimliğinde en fazla tanecikli olanlar kullanılır.

Filler olarak lityum aliminyum silikat, kalsiyum silikat, lityum cam seramikleri, quartz kristalleri, silisyumdioksit gibi maddeler kullanılır. Sınıflandırılması büyüklüğe göre yapılır ve kompozit dolguların sınıflandırılmasında esas alınır.

- a. Makroseramikler (makropartiküller-makrofiller)
- b. Mikroseramikler (mikropartiküller-mikrofiller)
- c. Mikroseramik esaslı kompleksler

İnterfasiyal Faz

Organik matriks filler (inorganik partikül) arasındaki bağlantının daha dayanıklı olması için filler önce coupling ajan olarak adlandırılan ara bağlayıcı ile çevrilir ve daha sonra organik matriks ile karıştırılır. İnterfasial faz olarak kullanılan madde “epoxy silan”dır. Fillerin böyle bir madde ile muamele edilmesine prepolimerizasyon veya silanlama adı verilir. Bu üç faz arasında iyi bir kimyasal bağlantının olması kompozitlerin üstün özellikler kazanmasında en önemli faktörlerden biridir. Bu bağlantının zayıf olması halinde kompozit daha fazla su emebilir; polisaj sırasında partiküller koparak olumsuz sonuçlar ortaya çıkabilir.

Kompozit dolgu maddelerinin en önemli özelliği epoxy silan kullanımudur.

Epoxy silanın kullanılması kompozit dolgu maddelerinin en önemli özelliğidir. Dimetildiklorosilan ve inorganik partiküllerin yüzeyleri arasında gerçekleşen kimyasal reaksiyon adezyonu için iyi bir baz olarak görev yapan yeni bir reaksiyon yüzeyi oluşturur.

Kompozitin Fiziksel Özellikleri

Lineer Isı Genleşmesi

Isıl genleşme oranlarına baktığımız zaman kompozitlerin ısısal genleşmesi akrilik resinlerle kıyaslandığında mine ve dentine daha yakındır ve 3 kat daha zayıftır. Makrofil ve modifil kompozitlerin lineer ısı genleşme oranlarının en düşük olduğu ileri sürülmektedir. Diş dokularına en yakın ısı genleşme katsayısı değeri olan kondense olabilen kompozitlerdir.

Lineer ısı genleşmesindeki farklılıktan dolayı kompozit resinin mine dentin diş dokuları ile yapmış olduğu bağlanma olumsuz yönde etkilenir. Kompozit resin ile diş dokusu arasındaki ısı genleşme katsayısı ne kadar yakın olursa temas yüzeylerinde o kadar az sorun oluşur

2.3.7. Aşınmaya dayanıklılık

Adeziv, abrazyon, korozyon, eskime ve minör aşınma mekanizmalarının etkimesi ile temas yüzeylerinden mekanik nedenlerle arzu edilmeyen şekilde madde ayrılması aşınma olarak tanımlanmaktadır. Bu beş mekanizma teorik olarak aşınmayı anlamaya yardımcı olmakla birlikte invivo ve invitro ortamlarda gözlenen aşınma olayı bu belli başlı sınıflar içinde incelenememektedir. Ayrıca invitro olarak gözlenen aşınma olayının invivo koşullarda aynı olmadığı gözlenmiştir. Son zamanlarda araştırmacılar, okluzal kontakt noktalarındaki (OCA-occlusal contact areas) aşınmayla kontakt olmayan bölgelerdeki (CFOA-contact free occlusal areas) aşınmanın belirgin ayrıcalıkları olduğunu göstermişlerdir. Kontakt alanındaki aşınmanın kontakt olmayan bölgelerdeki aşınmaya oranının; mikrofil kompozitlerde 3.5, hibrit kompozitlerde 3.2 olduğunu saptamışlardır.

Araştırmacılar in vitro olarak aşınmayı taklit etmeye çalıştıkları için test maddeleri değişik şekillerde sınıflandırılmaktadır. Bu yüzden test sonuçlarını karşılaştırmak mümkün olamamaktadır.

Bu problemin en önemli nedeni aşınmanın kompleks bir olay olup her maddeyi değişik mekanizmalarla etkilemesidir. Bugün hala standartlaştırılmış ve güvenilir işlemlerin sağlanabilmesi için bir çok araştırma yapılması gereklidir. İn vitro ve in vivo aşınma arasında bir ilişki kurulmasında başarısız olunmasında en önemli neden klinik olarak tayin edilmiş aşınmadır. Diğer bir problem ise değişik kompozit resinlerin, farkı maddelerle değişik şekillerde reaksiyona girmesidir. Bu mekanizmalar her bir kompozit resin için spesifik bir aşınma meydana getirir. Buna ek olarak kontakt bölgesindeki aşınma mekanizması kontakt olmayan bölgedeki aşınmadan farklıdır. Kontakt olmayan bölgede temel faktör abrazyon olmakla birlikte, kontakt bölgesinde adezyon, abrazyon, eskime aşınma olayına yardımcı faktörlerdir (Macentee 2005).

Klinik olarak tüm aşınma mekanizmalarına korozyon aşınması eklenmiştir. Silanlar ağız ortamında hidrolize edilebilir maddelerdir. Bu nedenle silan tabakasındaki ayrışma hibrid ve konvansiyonel kompozitlerde aşınmaya neden olabilir. Matriksin kimyasal aşınması da kompozit resinlerin ayrışmasında rol oynar. İnsan diş minesi de, kompozit restorasyonlar ile kıyaslamalarda fizyolojik standart olarak kullanılmalıdır. Molar dişlerde kontakt bölgelerindeki kompozit resinin aşınma hızı minenin aşınma hızı ile (yaklaşık 39 μ /yıl) kıyaslanabilir olmalıdır. Aynı dişteki mine ve kompozit arasındaki aşınma farkı, kompozitin aşınma direncini biyolojik bir yolla görmek ve ölçmek için yeni bir kriterdir (Saunders 2005).

Kompozit materyallerin mine benzeri aşınma hızına sahip olması önemlidir. Çünkü restoratif malzemeler elastiklik modülü, sertlik, yüzey pürüzlülüğü, sıkışma mukavemeti, termal genleşme katsayısı, radyoopaklık, renk eşleşmesi ve yıpranma gibi mine ve dentinin özelliklerine sahip gibi görünmelidirler. Bu özellikler arasındaki bir fark, restorasyonun ömrünü tehlikeye sokacaktır.

2.3.8. Kopmozitlerin aşınmasını etkileyen faktörler

Kompozitlerin aşınmasına uygulanan yük, yüzey pürüzlülüğü, kayma mesafesi ve hızı gibi parametreler etkimektedir.

Epoksi matrisli elyaf takviyeli kompozit materyallerde aşınma ve sürtünme parametrelerinin elyafa bağlı olduğu görülmektedir.

Aşınmada yapılan analizler sonucunda hız parametresine göre uygulana yükün kompozit aşınma direncine göre daha yüksek sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

Birbirine temas halinde olan numunelerde adeziv ve abraziv aşınma sonucu aşınan toz şeklindeki kalıntılar sürtünme sonucu açığa çıkan sürtünme ısısı ile beraber matris malzemesinin yumuşamasına neden olurlar. Matris içerisine bazı toz aşınma kalıntılarının gömülmesiyle kompozit malzemede korucuyu bir tabaka meydana gemektedir. Bu da malzemelerin aşınma davranışını büyük ölçüde etkiler.

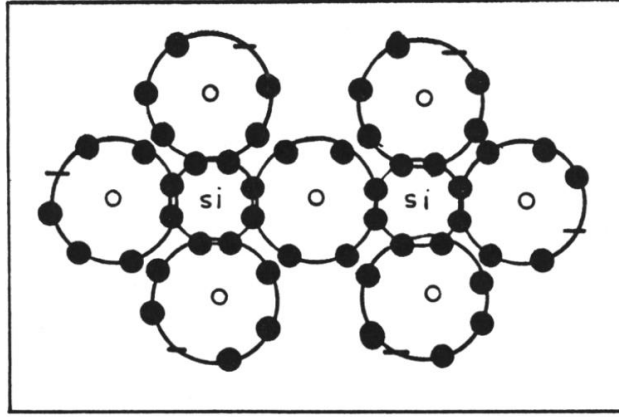
Aşınma olayı malzemelerin aşınmasının yanında elyas kırılması ve koparak yapıdan ayrılması sonucu meydana gelir. Burada abraziv etki söz konusudur ve etkinin artmasıyla aşınmanın arttığı da düşünülmektedir.

2.3.9. Dental seramikler

Dental Seramiğin Yapısı

Seramik terimi Yunanca'da yanık madde anlamına gelen "keramikos" kelimesinden türetilmiştir. Topraksı bir metal olan seramik bir veya daha fazla metalin metal dışı bir materyalle çoğunlukla oksijenle yaptığı bileşimdir. Bir matris görevi yapan büyük oksijen atomları iyonik veya kovalent bağla yarı metal silikon ya da küçük meytal atomlarıyla SiO_4 tetrahedra yapısını meydana getirirler (Şekil 16). Bu kuvvetli bağlar

seramiklerinin stabilitesini, sertliğini, ısıya ve kimyasal maddelere direncini sağlamaktadırlar. Yapı, kırılma, düşük elektrik ve ısı geçirgenliği gibi olumsuz özellikler ortaya çıkmasına neden olmaktadır.



Şekil 2.16. SiO_4 tetrahedra yapısı

Dental seramiklerin yapısal bileşenleri refraktör kristalin yapı ve camdır. İskeletsel yapı silika (silisyum oksit) ve alüminadan (alüminyum oksit) oluşmaktadır. Refraktör partiküller fırınlama ısılarına dayanıklıdır ve erimezler. Bu partiküllerin kaynaşana (füzyon) kadar ısıtılması işlemine sinterleme adı verilmektedir. Cam matris de silika ve alüminadan oluşmaktadır ancak matris fırınlığında eriyerek sinterlenmiş partiküllerin arasına infiltre olur.

Bileşimi kuartz, feldspar ve kaolinden oluşan dental seramikte feldspar ana yapıyı oluşturup deola rengi vermektedir. Potasyum alüminyum silikat ($\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$) ve albit karışımından oluşmaktadır. Fırınlama esnasında eriyip kuartz ve kaolini sararak bütün yapıyı meydana getirmektedir.

Kaolin çin kili olarak da bilinmektedir ve $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ formülüyle gösterilen bir alüminyum hidrat silikattır. Isıya oldukça dayanıklı olmalarına karşın opak renkte olmaları az oranda kullanılmasına neden olmaktadır. Feldspar ve kuartz için adeziv

bağlayıcı olarak görev yapmaktadır. Seramik hamuruna elastiklik vererek kolay işlenmesini sağlamaktadır.

Seramiğin bileşiminde ayrıca çeşitli renk pigmentleri, akışkanlar veya cam modifiye ediciler (fluks), ara oksitler, opaklaştırıcı veya flouresans özelliğini geliştiren çeşitli ajanlar da bulunmaktadır. Fluks oksitler sodyum, potasyum ve kalsiyum oksittir. Cam yapıcı elementlerle oksijen arasındaki çapraz bağlantı miktarını azaltarak camın yumuşama ısını düşürmektedirler (Slaughter 2005).

Dental Seramiklerin Sınıflandırılması

Kullanım yerlerine, mikroyapılarına, pişirme ısılarına, ve üretim tekniklerine göre dental seramikler farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır:

Pişirme ısılarına göre

- * (660°C-1066°C) Düşük ısı seramikleri
- * (1093°C-1260°C) Orta ısı seramikleri
- * (1288°C-1371°C) Yüksek ısı seramikleri

Kullanım yerlerine yönelik sınıflandırmada

- *Hareketli protez dişlerinin yapımında kullanılan seramikler
- * Jaket kronlar ve inley-onleylerde kullanılan seramikler
- * Veneer seramikleri

Üretim tekniklerine göre

- * Metal destekli seramik kronlar:

- Döküm metal üzerine hazırlanan seramikler
- Platin veya altın folyo üzerine bitirilen seramikler
- Elektroliz metal alt yapı üzerine hazırlanan seramikler

*Metal desteksiz seramik kronlar

Sinterlenen seramikler

- Dökülebilir seramikler
- Basınç altında ve enjeksiyonla şekillendirilen seramikler
- Cam infiltre seramikler
- Bilgisayar desteği ile üretilen seramikler
- Kopya freze yöntemi ile üretilen seramikler

Mikroyapılarına göre

* Camsı seramikler

* Partikül doldurucu ile güçlendirilmiş cam seramikler

- Lössit ile güçlendirilmiş cam seramikler
- Lityum disilikat ile güçlendirilmiş cam seramikler
- Flormika içeren cam seramikler
- Alümina ile güçlendirilmiş cam seramikler
- Alümina ve magnezyum spinel ile güçlendirilmiş cam seramikler
- Alümina ve zirkonyum oksit ile güçlendirilmiş cam seramikler

* Polikristalin seramikler

- Alüminyum oksit polikristalin seramikler
- Zirkonyum oksit polikristalin seramikler

2.3.10. Seramiklerin aşınmasını etkileyen faktörler

a) Sertlik: Aşınma malzemelerinde kritik bir öneme sahip olan sertlik değerine bakıldığında seramiklerin iyi bir sertliğe sahip olduğu görülmektedir. Aşınma hızı çok sert materyallerde çok düşüktür. Yüksek elastisite modülüne sahip olmayan seramikler buna bağlı olarak plastik deformasyon göstermezler. Bundan dolayı yük uygulandığında veya keskin parçaların yüzeye etkimesiyle bölgesel bir gerilme yoğunlaşması görülmektedir. Çekme gerilmesi biçiminde gerilme olması halinde çatlak veya mikro çatlak oluşumu gözlenir. Burada oluşan mikro çatlaklar seramik malzemesinin aşınma direncini düşürdüğünden aşınma hızını artırmaktadır.

b) Termal iletkenlik: Çoğu seramik malzemenin termal iletkenliği metal malzemelerden daha düşüktür. Kaymanın, sürtünmenin olduğu durumlarda bölgesel olarak local ısı birikimleri olduğu için malzemelerin temas yüzeyleri arasında sıcaklık farkı meydana gelmektedir. Oluşan bu sıcaklık farklarının sürtünmeden dolayı artması termal şok, bölgesel gerilme ve mikro boyutta çatlakların oluşmasına neden olmaktadır. Bilindiği üzere oluşan mikro çatlaklar aşınma hızını yani aşınmayı artırmaktadır.

c) Kırılma Tokluğu: Mühendislik plastikleri ve metallerle karşılaştırdığımızda seramiklerin kırılma tokluğunun oldukça düşük olduğu görülmektedir. İleri teknoloji seramiklerin kırılma tokluğuna bakıldığında 112 MPa iken kompozit seramiklerin kırılma tokluğunun 20 MPa olduğu görülmektedir. Seramiklerin kırılma tokluğunu kısmi olarak iyileştirmek için yapılan uygulamalarda aşınma direnci bir miktar düşerken mikro çatlak oluşması bariz biçimde engellenebilmiştir. Termal şok, bölgesel yüklenmeler ve gerilmeler karşısında çatlak oluşumuna karşı direnç sertlikte azalma sonucu dengelenebilmiştir.

d) Korozyon direnci: Seramik malzemelerde korozyon direnci sertlik kadar öneme sahiptir. Çünkü çevre koşullarında her zaman korozif bir ortam söz konusudur. Seramik temas yüzeylerinde korozyon yavaş bir şekilde çatlak büyümesi ve oluşumuna sebep olmaktadır. Bu durum da aşınma hızının artmasını tetiklemektedir.

e) Birleştirme / Birleşme Yöntemleri: Seramiklerde oluşturulmaları esnasında meydana gelen çekme ve basma gerilmeleri önem taşır. Basma gerilmesinde çok önemli bir aşınma gerçekleşmezken birleşme noktalarında oluşabilecek çekme gerilmeleri yavaşça çatlak büyümesinin ardından erozyon aşınmasının oluşmasına neden olur. Bunun yanı sıra birleşme bölgelerinde meydana gelen küçük mekanik hareketler aşınmada etkili olabilmektedir.

f) Porozite: Seramiklerdeki poroziteler aşınmayı negative yönde etkilerler. Çekme yükü esnasında porozite çatlak oluşumunu hızlandırırken basma yükünde uzun sürede hasar meydana gelmektedir. Ayrıca porlu bölgelerde aşınmayı negative etkiler. Por boyutu da aşınma için kritik bir etkidir ve çatlama önemli bir etkiye sahiptirler. Yüzeye yakın porlar da yüzeyin delinmesine neden olmaktadır.

2.4. Yüzey Pürüzlülüğü

Talaşlı imalat esnasında iş parçasında görmek istemediğimiz izler oluşmaktadır. İşleme yöntemi, kesici takımın cinsi, işlenen madde ve kesme faktörleri, fiziksel, kimyasal ve ısı faktörleri ve kesici - işlenen arasındaki mekanik ilişkilere bağlı olarak, nominal yüzey hattının altında ve üstünde düzenli olmayan sapmaların ortaya çıkması durumuna yüzey pürüzlülüğü denir (Güllü 1995).

İşleme yöntemi her ne şekilde olursa olsun (lepleme, taşlama, tornalama vb.) talaş kaldırılan yüzeyler yüzey pürüzlülüğüne maruz kalmaktadır.

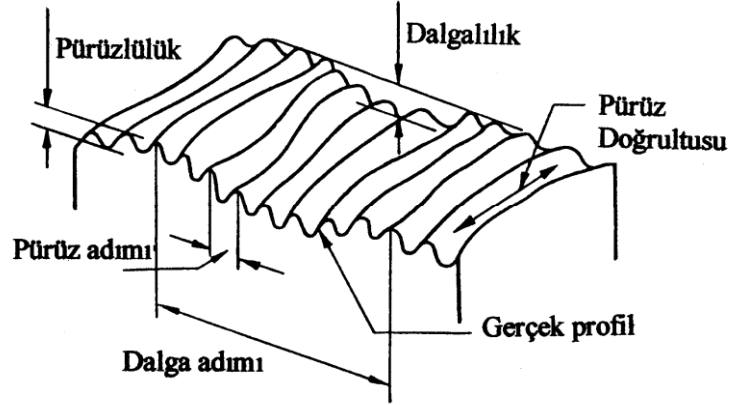
Farklı yöntemlerle işlenen malzemelerin yüzey pürüzlülükleri sayısal değer olarak benzer olmasına karşın nadiren bu malzemelerin aşınma, korozyon, sürtünme ve yorulma dirençlerinin birbirlerinden tamamen farklı olduğu görülmektedir. Çünkü yüzeydeki işleme belirtilerinin dağılımı ve yönleri de performansı etkilemektedir. Bu sebeple işlenecek malzemelerin bazılarında yüzey pürüzlülük miktarının yanında işleme yönteminin de belirtilmesi gerekmektedir.

Yüzeyi iyi işlenmiş malzeme, yorulma mukavemetini, korozyon direncini ve aşınma ve sürtünme süresini önemli ölçüde artırmaktadır. Bununla birlikte pürüzlülük, yüzey sürtünmesine neden olan aşınma, temas, ışık yansıtma, yağ filminin tutulması, ısıнын iletilmesi ve dağıtılması yeteneği, direnç veya kaplama ömrü gibi malzemelerin birçok fonksiyonel özelliklerini de etkilemektedir. Bu nedenden dolayı ihtiyacımız olan kaliteli yüzeye ulaşmak için istenilenler elde edilerek uygun yöntem seçilmelidir.

Takım tezgâhı veya tırlama vibrasyonları, iş parçasının yapısındaki bir takım hasarlar, talaş oluşumunun düzensizlikleri veya kesici takım aşınması, işleme esnasında yüzeyin bozulmasına neden olurlar (Boothroyd 1989). Yüzey pürüzlülüğü hakkında tahmin yürütmek, kesme hızı veya ilerleme gibi işleme parametrelerinin birbirleriyle uyumunu yorumlamak ürün kalitesini artırmakta ve istediğimiz yüzey kalitesinin elde edilmesine yardımcı olmaktadır.

2.4.1. Yüzey yapısının özellikleri ve aşınmaya etkisi

Bir yüzey yapısında malzemenin sahip olduğu yorulma ömrü, aşınma ve yataklık etme özelliği önemli olan faktörlerdendir. İşleme yapılan yüzeylerde iki tip yüzey sapması meydana gelmektedir. Bunlar dalgalılık ve pürüzlülüktür. Dalgalılık, yüzeyin geometrik şekline tanıklık ediyorken, pürüzlülük yüzey kalitesini belirlemektedir. Genellikle geometrik profil referans profil olarak alınır. Profil ortalama çizgisinin yeri şu şekilde belirlenmektedir, çizginin üstünde ve altında kalan toplam alanların birbirine eşit olması gerekmektedir. Düz yüzey dalgasız, pürüzsüz yüzey dalgalı, fakat çıplak gözle baktığımızda veya elimizle kontrol ettiğimizde, pürüzlülükleri belli olmayan yüzeyler anlatılmak istenmektedir. Yüzey pürüzlerinin baz alınan bir yüzeyine göre durumuna doğrultu denilmektedir. İşleme yöntemine bağlı olarak değişen, yüzey geometrileridir. Şekil 2.17 işlenmiş bir yüzeyin geometrisini göstermektedir (Galyer 1989).



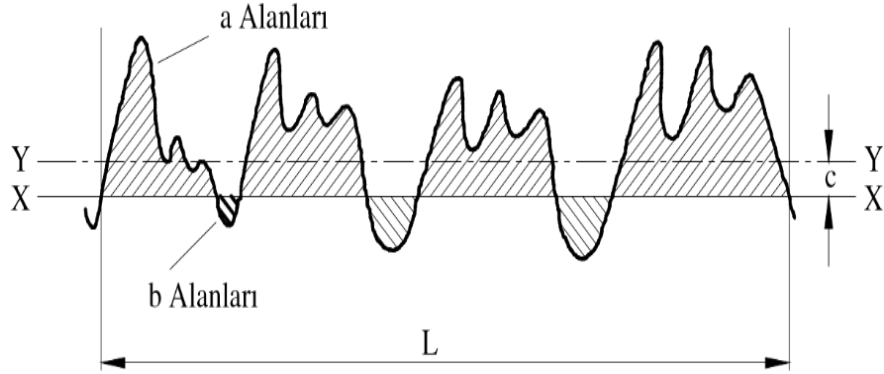
Şekil 2.17. İşlenmiş bir yüzeyin yüzey karakteri

2.4.2. Yüzey kalitesinin sayısal olarak değerlendirilmesi

Yüzey kalitesi sorununu çözebilmek için, üç boyuttan iki boyuta dönüştürmek ve sonuçları grafik yardımıyla göstermek mümkün olmasına karşın, tasarımcı için gerekli olan yüzey kalitesini bu şekilde net belirleyebilmesi kolay bir yöntem değildir. Grafik yöntemini, ne kalite kontrol elemanı ne de üretim mühendisinin kolay kolay yorumlaması mümkün değildir. Bu nedenle gerekli olan şey, yüzeyin sahip olduğu fonksiyonel özelliklere ait bazı ilişkilerin bulunduğu ve sayısal olarak açıklanabilir olmasıdır. Sayısal değerlerinin bulunabileceği iki yöntem otoritelerce kabul görmüştür. Bu yöntemler; çoğunlukla ortalama çizgi ve zarf sistemi olarak bilinmektedir (Güllü 1995).

2.4.3. Ortalama çizgi (M) sistemi

Ortalama çizgi, elde ettiğimiz geometrik profili kabul eden bir metod olarak tanımlanmaktadır. Yerleştirilen bu ortalama çizgi ile profil arasında kalan mesafelerin karelerinin toplamının minimum olması gerekmektedir. Dolayısıyla ortalama veya merkez çizgisi uygulamada profilin genel doğrultusuna paralel bir çizgi olarak saptanabilir ve profili oluşturan çizginin üstündeki ve altındaki alanlar (a ve b) birbirlerine eşittir.



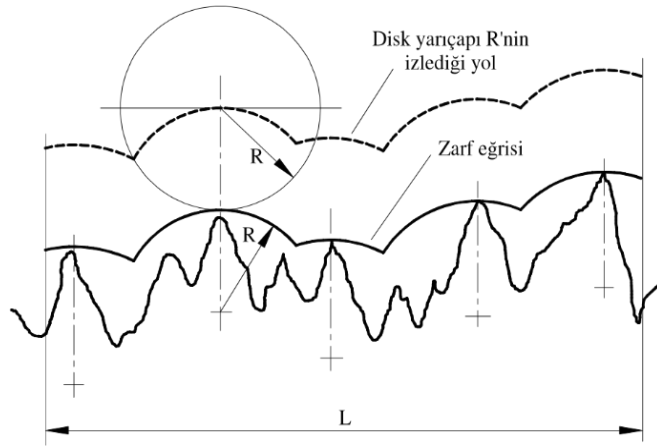
Şekil 2.18. Ortalama çizgi konumunun belirlenmesi (Scarr 1991)

Verilen bir profil için ortalama çizginin yeri, aşağıda anlatılan yöntemle belirlenebilir. Bu çizgi uygun örnekleme uzunluğu (L)'nin üzerindeki profilin genel doğrultusuna paraleldir. Bir ordinat metodu veya planimetre kullanılarak a ve b alanları belirlenir. Sonra XX ve istenen ortalama çizgi YY arasındaki c mesafesi şu şekilde verilir.

2.4.4. Zarf sistemi (E)

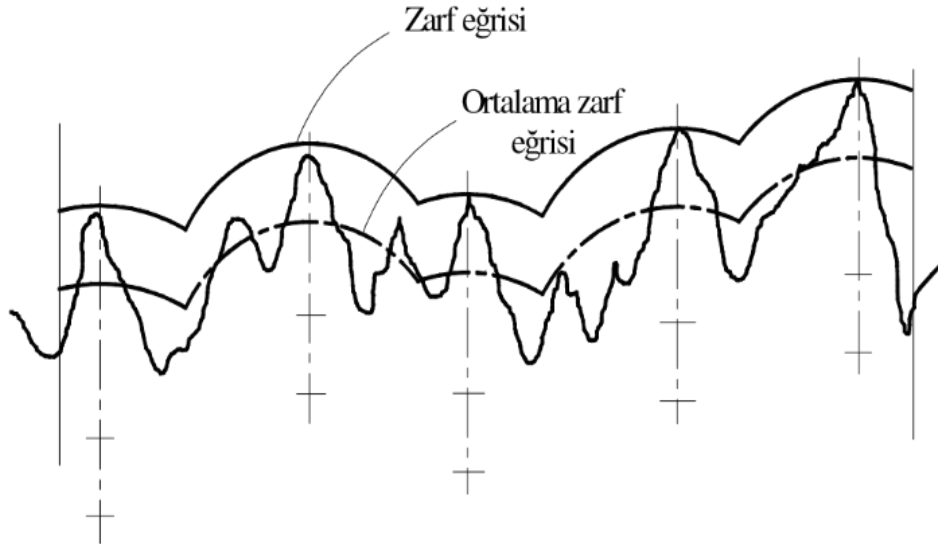
Zarf sistemi, izlere karşı yuvarlanan bir dairenin yarıçapı tarafından üretilen bir çizgi esasına dayanır. Daire merkezinin ilerlemesinden meydana gelen bu eğri R mesafesi baz alınarak yerleştirilmiştir. Bu çizgi yüzey üzerinde yer almaktadır. Şekil 2.19'da gösterildiği gibi zarf eğrisi, ideal geometrik profile dik açılarda en yüksek profil yönüne doğru çizilen ordinatlar yardımıyla oluşturulur.

R 'nin dairesel yayları çizilen ordinatlar üzerinde merkezleriyle birlikte en üstlere doğru çizilerek zarf eğrisi oluşturulmaktadır. Yüzey kalitesinin grafik sonuçlarının düşey ve yatay eksenlerde aynı miktarda büyütülmesi bu eğrinin oluşumunu ifade etmektedir.



Şekil 2.19. Zarf eğrisinin elde edilişi (Scarr 1991)

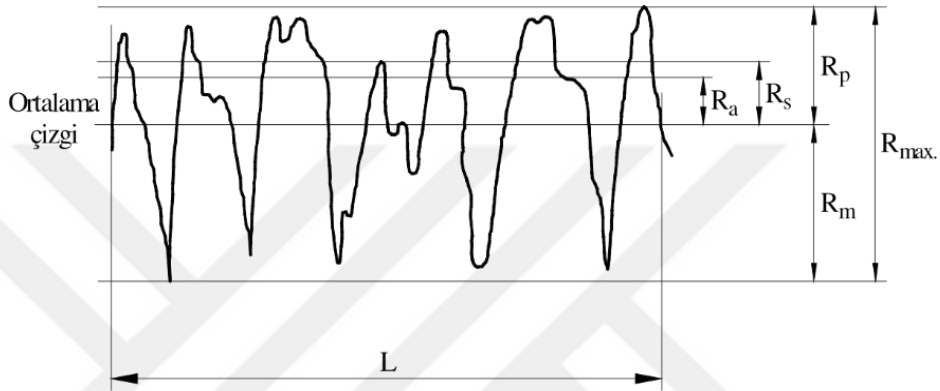
Düşey artışların, yataydaki artışlardan fazla olması dairesel yayların bozularak eliptik şekil almasından kaynaklanmaktadır. Eğer V düşey büyüme ve H da grafiğin yatay büyümesi ise zarf profili dairesel yayların yarı çaplarının R yerine $(R \times H^2)/V$ olarak yeniden düzenlenmesiyle elde edilir. Bu durum Şekil 2.20’de görülmektedir ki zarf eğrisi M sistemindeki ortalama çizgiyi karşılamaktadır (Scarr 1991).



Şekil 2.20. Ortalama zarf eğrisi (Scarr 1991)

2.4.5. Yüzey kalitesini belirlemede esas alınan sayısal değerler

Farklı birçok yöntemden birisi ile, sayısal bir yüzey kalite profilinin verilmesi, başlangıç şartlarının sağlanması ortalama çizgi ve zarf sistemlerinden birinin kullanılması ile mümkündür.



Şekil 2.21. Yüzey kalitesi için sayısal değerler (Scarr 1991)

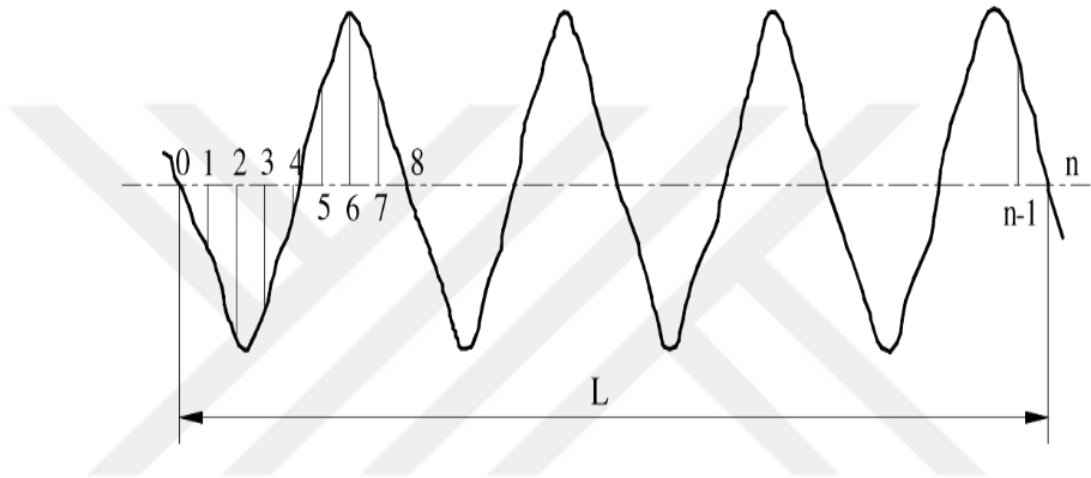
2.4.6. Ortalama eksen çizgi değeri- Ortalama yüzey pürüzlülük değeri (cla, Ra)

Bu parametre aritmetik ortalama pürüzlülük sayısı AA (arithmetic average) veya CLA (center line average) olarak bilinmektedir ve pürüzlülükte çok sık kullanılan parametre olup R_a simgesiyle gösterilmektedir. R_a , düzenli olmayan profillerin ortalamasını vermesi nedeniyle, yüzey yapısı hakkında önemli bir etkidir. R_a tahmin yönteminin güvenilir, hassas, düşük maliyetli ve tahribatsız yapılması gerekmektedir.

Diger bir ifadeyle R_a belirlenen örnekleme uzunluk sınırlarında, eksen çizgisinin altında ve üstünde meydana gelen profil kaymalarının aritmetik ortalama değeridir. (ISO 4287/1-1984) Şekil 2.22’de gösterilen durum matematiksel olarak şöyle ifade edilebilir; pürüzlülük profili ve simetri eksenini arasında kalan alan veya örnekleme mesafesi üzerindeki pürüzlülük profil uzunluğunun mutlak değerinin integrali olarak yorumlanabilir.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l y(x) dx \quad (2.9)$$

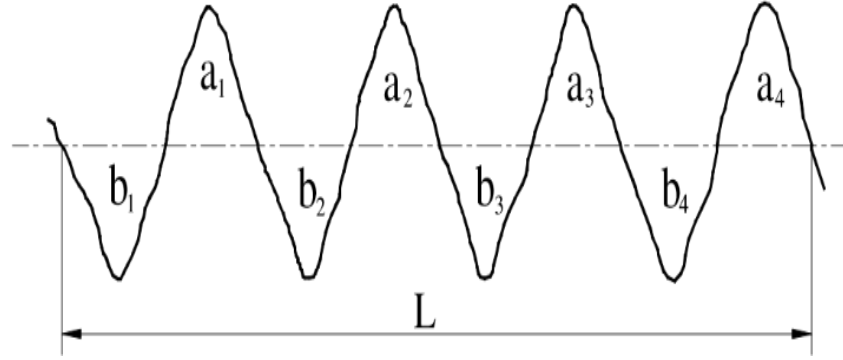
Burada l : örnekleme uzunluğunu, y : ortalama eksen çizgisinden bağımsız düşeydeki yer değiştirmeleri ifade etmektedir.



Şekil 2.22. Ordinatlarla R_a 'nın gösterimi (Galyer 1993)

Bununla birlikte R_a yüzeyin tüm ordinatlarının orta çizgiden ortalama yüksekliği olarak ta açıklanabilir. Şekil 2.23'de gösterilen ordinatlara $1, 2, 3, \dots, n$ ve ordinatların yüksekliklerine $h_1, h_2, h_3, \dots, h_n$ dersek aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$R_a = \frac{h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_n}{n} = \frac{\sum h}{n} \quad (2.10)$$



Şekil 2.23. Alanlarla Ra'nın gösterimi (Galyer 1993)

R_a 'nın değeri Şekil 2.32'de görüldüğü gibi, düzenli olmayan alan eşit mesafelerde bölünerek bu mesafelere karşılık gelen eksen çizgisinin üst (a) ve alt (b) arasındaki alanları, planimetre ile belirleyip bu alanların toplamının örnek uzunluğa (L) bölünmesi ile de elde edilebilir(Galyer 1993).

$$R_a = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + b_1 + b_2 + b_3 + b_4}{L} = \frac{\sum \text{Alan } (a) + \sum \text{Alan } (b)}{L} \quad (2.11)$$

R_a sayısı, toplam alanın örnekleme uzunluğuna bölünmesiyle düşey artışa bölünür ve μm çevrimi için 10^3 ile çarpılır;

$$R_a = \frac{\sum \text{alan } (a) + \sum \text{alan } (b)}{L} \times \frac{10^3 \mu\text{m}}{\text{Düşey Büyütme}} \quad (2.12)$$

Burada $\sum A = \text{Toplam alan (mm}^2\text{)}$, $L = \text{Pürüzlülük izinin boyu (mm)}$ 'dur.

Ne yazık ki, geometrisi düzgün profillerden başka, alt-üst noktaları ve eksen çizgisi arasında belirgin bir bağlantı bulunmamıştır. Örneğin; sinüzoidal profiller için $R_t/R_a = \pi$ ve kare profiller için $R_t/R_a = 4$ bağlantısı bulunmuştur. Uygulamada R_t/R_a , torna ve

freze ile üretilmiş kaba yüzeyler için 3~5 arası alınırken, hon ve lepleme ile ortaya çıkarılmış daha ince yüzeyler için bu değer 14'e kadar alınmaktadır.

2.4.7. Maksimum tepe-dip yüksekliği (R_{max} , R_t)

Şekil 2.32'de görüldüğü gibi, örnekleme uzunluğunda dikkate alınan en yüksek üst ve en düşük alt nokta arasındaki mesafe alt-üst mesafesi olarak isimlendirilir. Bu R_t değeri, örnekleme uzunluğundaki yüzey düzensizliklerinin frekansı göz önüne alınmazsa yüzey pürüzlülüğünün tam bir tanımıdır.

Şekil 2.32'de yüzey profilinin (R_t)'si gösterilmektedir. Fakat yüzey kalite faktörlerinde önemlibir farkın olduğu nettir.



Şekil 2.24. Tepe-dip yüksekliği aynı olan yüzey örnekleri (Scarr 1991)

Alt-üst mesafesinin ortalama değerini daha da iyileştirmek gerektiğinde, en üst ve en alt nokta hesaba alınmaz. Böylece örnekleme uzunluğunda çok yüksek üst ve alt noktanın yer alması beklenmez.

2.4.8. Profil maksimum tepe yüksekliği (R_p)

Belirlenen örnekleme uzunluk sınırlarındaki en üst nokta (çıkıntı) ile temas eden ve eksen çizgisine paralel olan çizgi ile, eksen çizgisi arasındaki uzunluktur. Böylece R_p sayısı geniş çıkıntı ve dar girintilerden meydana gelen yüzeylerde küçük, dar çıkıntı ve geniş girintilerden meydana gelen yüzeylerde büyük olmaktadır.

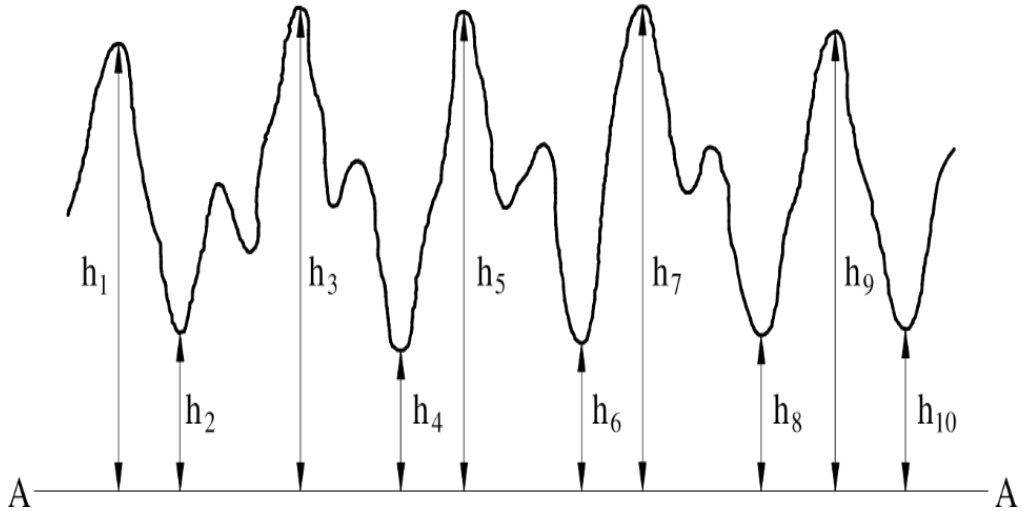
2.4.9. Profil maksimum dip derinliği (Rm)

Seçilen örnekleme uzunluk sınırlarındaki en dip girintiye temas halinde olacak şekilde ve eksen çizgisine paralel olarak çizilen doğru ile, eksen çizgisi arasındaki uzunluktur.

2.4.10. On nokta yüksekliği (Rz)

Profilin belirlenen örnekleme uzunluk sınırlarındaki en uzun beş tepe noktasının yükseklikleri ile en derin beş dip noktasının derinliklerinin farkının mutlak değerinin ortalaması şeklinde bulunmaktadır (Şekil 2.25).

$$R_z = \frac{[(h_1 + h_3 + h_5 + h_7 + h_9) - (h_2 + h_4 + h_6 + h_8 + h_{10})]}{5} \quad (2.13)$$



Şekil 2.25. On nokta yükseklik hesabı için ortalama ölçümler (Yim and Kim 1991)

2.5. Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile Aşınma Modellenmesi

Sonlu elemanlar yöntemi matematikçilerden daha çok mühendisler tarafından geliştirilmiştir. Yöntem ilk olarak gerilme analizi problemleri üzerinde uygulanmıştır. Tüm bu uygulamalarda belirlenen bir alanın hesaplanması istenmektedir. Gerilme analizinde bu değer deplasman alanı veya gerilme alanı; ısı analizinde sıcaklık alanı veya ısı akısı; akışkan sorularında ise akım fonksiyonu veya hız potansiyel fonksiyonu olarak isimlendirilmektedir. Hesaplanan alanın almış olduğu en büyük değer veya en büyük gradyen uygulamada özel bir öneme sahiptir (Engin vd 2000).

Sonlu elemanlar yönteminde yapı davranışı daha önce belirlenmiş olan birden fazla elemana ayrılır. Elemanlar "nod" ile isimlendirilen noktalarda tekrar biraraya getirilirler. Bu şekilde cebrik bir denklem takımı ortaya çıkar. Gerilme analizinde bu denklemler nodlardaki denge denklemleridir. Üzerinde durulan probleme bağlı olarak bu şekilde yüzlerce hatta binlerce denklem elde etmek mümkündür. Bu denklem takımının çözümü için ise bilgisayar kullanımı zorunlu hale gelmektedir.

Sonlu elemanlar yönteminde ana tema sürekli fonksiyonları bölgesel sürekli fonksiyonlar (genellikle polinomlar) ile nitelendirmektir. Bunun anlamı bir eleman içerisinde hesaplanması istenen büyüklüğün (örneğin deplasmanın) değeri o elemanın nodlarındaki değerler kullanılarak interpolasyon ile bulunur.

2.5.1. Sonlu elemanlar metodunun gelişimi

İlk olarak yapı analizinde kullanılan sonlu elemanlar yönteminde ilk çalışmaları Hrennikoff (1941) ve Mc Henry (1943) tarafından yapılmış yarı analitik analiz yöntemidir. Virtüel iş yöntemini kullanan Argyis ve Kelsey (1960) direk bir yaklaşım yöntemi geliştirmişlerdir. Turner *etal* (1956) yaptığı çalışmada üçgen bir elemanın rijitlik matrisini oluşturmuştur. "Sonlu Elemanlar" kavramı ilk defa 1960 yılında Clough tarafından kullanılmıştır. İlk önce iki boyutlu problemlere uygulanan metod üç boyutlu problemlere kolaylıkla uygulanabilmiştir (örneğin, Argyis (1964)).

Eksenel simetrik elemanlar ilk gerçek kabuk elemanları oluşturmakta olup (Grafton and Strome 1963), silindirik ve diğer kabuk elemanlar bunları takip etmiştir. (Gallagher 1969). Araştırmacılar 1960'ların başlarında doğrusal olmayan problemlerle ilgilenmişlerdir. Turner ve diğerleri (1960) doğrusal olmayan geometrik problemler için bir çözüm metodu geliştirmiştir. Martin (1965) tarafından ilk olarak sonlu elemanlar yöntemiyle denge/kararlılık analizi tartışılmıştır. Hem statik hem de dinamik problemler sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmeye başlanmıştır (Zienkiewicz *et al.* 1966; Koenig and Davids 1969). Courant 1943 yılında bir burulma problemine bölgesel sürekli lineer yaklaşımı kullanarak çözüm üretmiştir.

1960'larda sonlu elemanlar yöntemiyle yapı alanı dışındaki problemlerin çözümüne başlanmıştır. 1965 yılında Zienkiewicz and Cheung sonlu elemanlar yöntemi ile Poisson denklemini çözmüşlerdir. Doctors ise 1970'te yöntemi potansiyel akış uygulamasında kullanmıştır. Günümüzde bu metod geliştirilerek ısı transferi, manyetik alan, yeraltı sularının akışı ve diğer bir çok alandaki problemlerin çözümünde uygulanmaktadır.

1970'li yıllardan itibaren sonlu elemanlar paket programları ortaya çıkmaya başlamıştır. 1980'lerin sonlarına doğru paket programlar mikro bilgisayarlarda kullanılmaya başlanmıştır. 1990 yıllarının ortaları itibarıyla yaklaşık olarak 40.000 makale ve kitap yayınlanmıştır

2.5.2. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY)

Arabacı 2003 yılında sonlu elemanlar metodu (SEY) ile alakalı görüşlerini şu şekilde ifade etmiştir: 'Sonlu elemanlar yöntemi; bir sayısal yöntem olup, özellikle katı cisimlerin mekaniği, akışkanlar mekaniği, ısı transferi ve titreşim gibi karmaşık mühendislik problemlerinin çözümünde bilgisayar ortamında kullanılan gelişmiş bir yöntemdir.'

Bu metod; otomotiv, beyaz eşya uçak, biyomekanik, inşaat ve tıp sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Gerilme, şekil değiştirme analizleri, ısı akımı, manyetik,

hidrolik akı gibi bir çok alandaki problemlere uygulanabilmektedir. Sonlu elemanlar yönteminin kullanılması günümüze kadar ancak pahalı deneysel yöntemlerle incelenebilen birçok ürünün kolayca incelenebilmesi bilgisayar teknolojisi ve bilgisayar destekli tasarım (BDT) sistemlerinin gelişmesiyle kolaylıkla incelenebilmiştir. Herhangi bir ürünün prototipi yapılmadan önce bilgisayarda değişik modeller denenerek malzeme kaybı ve zaman israfı olmadan en uygun malzeme seçimi yapılarak, modeli daha kolay biçimde ve daha az sürede meydana getirmek mümkün olmaktadır.

2.5.3. SEY’de sınır şartları

Sonlu elemanlar yöntemlerinde, sınır şartları, gerilmelerin ve yer değiştirmelerin sınır ifadelerini kapsar. Yani cismin nereden sabitlendiğini ve kuvvetin neresinden uygulandığını vurgular. Buda malzemedeki duruma göre belirlenmektedir. Analizi yapılan modele in kuvvet neresine uygulanacaksa sınır şartları da ona göre belirlenir.

2.5.4. Pre/post işlemleri

Yapısal (structural) modellerde daha çok detaylandırma imkânı veren modelin çizilmesi çizilen modelin SEY için bölümlendirilmesi bu bölümlerin düzenlenmesini pre işlemler ve analiz işlemlerinden sonra elde edilen sayısal değerlerin görsel kondisyon (gerilme, yer değiştirme gibi özelliklerin grafiklerle ve eş değerli eğrilerle gösterilmesi) getirilmesi de post işlemler olarak atanımlanabilir.

2.5.5. Eleman ve düğüm

Sonlu eleman sisteminde; malzeme eleman olarak isimlendirilen küçük geometrik şekillere bölünür. Bu basit elemanlar düğüm olarak isimlendirilen diğerler cinsinden ifade edilir. Sınır şartlarını da içine alacak şekilde elemanların birleştirilmesi neticesinde doğrusal veya doğrusal olmayan matematiksel denklem grupları oluşturulur. Bu denklemlerin çözümü, çok sayıda bilinmeyen olan çok düğümlü denklem sisteminin çözümünü kolaylaştırır.

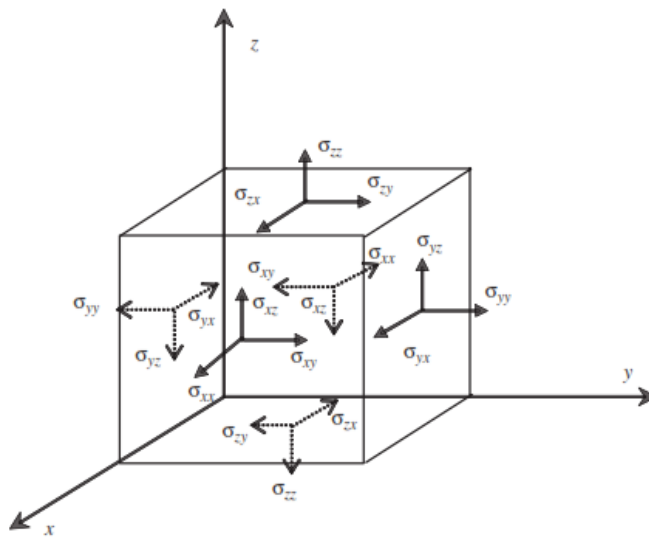
Bu yöntemde elemanlar geometrisine göre üçgen, paralel kenar, dörtgen olarak üç kısma ayrılır. Başka bir kaynağa göre de elemanlar boyutlarına göre tek boyutlu, iki boyutlu, dönel elemanlar, üç boyutlu elemanlar, izoparametrik elemanlar olmak üzere beş kısma ayrılırlar. Düğüm sayısına göre, sürekli ortam probleminin özelliklerine göre ve düğüm sayısındaki bilinmeyenlere göre kabuk, plak, levha problemleri olarak sınıflara ayrılır.

2.5.6. Üç boyutlu kati cisim eşitlikleri

Katı cismin herhangi bir noktasındaki son derece küçük bir kübik hacim alındığında, yüzeydeki gerilme bileşenleri Şekil 2.26'de gösterildiği gibi olmaktadır. Her yüzeyde, normal gerilme bileşenleri ve iki tane de kayma gerilmesi bileşenleri mevcuttur. Merkez eksene göre kuvvetlerin oluşturduğu momentler denge durumunda olduğundan:

$$\sigma_{xy} = \sigma_{yx} ; \sigma_{xz} = \sigma_{zx} ; \sigma_{yz} = \sigma_{zy} \quad (2.14)$$

şeklinde yazılabilmektedir.



Şekil 2.26. Sonsuz küçük bir küpte 6 bağımsız serbestlik gerilme bileşenleri

Gerinim, her birim uzunluktaki yer değiştirme olarak tanımlanır ve yer değiştirmelerin türevi ile elde edilir.

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\delta_u}{\delta_x}; \varepsilon_{yy} = \frac{\delta_v}{\delta_y}; \varepsilon_{zz} = \frac{\delta_w}{\delta_z} \quad (2.15)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\delta_u}{\delta_y} + \frac{\delta_v}{\delta_x}; \varepsilon_{xz} = \frac{\delta_u}{\delta_z} + \frac{\delta_w}{\delta_x}; \varepsilon_{yz} = \frac{\delta_v}{\delta_z} + \frac{\delta_w}{\delta_y}; \quad (2.16)$$

$$\varepsilon = LU \quad (2.17)$$

Eşitliklerdeki u, v ve w, x, y ve z eksenlerindeki yer değiştirmelerdir. Denklem 2.16'daki altı gerinim-yer değiştirme ilişkisi matris şeklinde de yazılabilir.

U yer değiştirme vektörüdür.

$$U = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} \quad (2.18)$$

L Denklem 2.18'den elde edilen parçalı diferansiyel operatörü matrisidir.

$$L = \begin{bmatrix} \frac{\delta}{\delta_x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\delta}{\delta_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\delta}{\delta_z} \\ 0 & \frac{\delta}{\delta_z} & \frac{\delta}{\delta_y} \\ \frac{\delta}{\delta_z} & 0 & \frac{\delta}{\delta_x} \\ \frac{\delta}{\delta_y} & \frac{\delta}{\delta_x} & 0 \end{bmatrix}$$

Bünye Denklemleri (Constitutive Equations)

Hooke kanunu olarak da tanınan bünye denklemleri, katı cismin malzeme özelliklerindeki gerilme ve gerinim arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

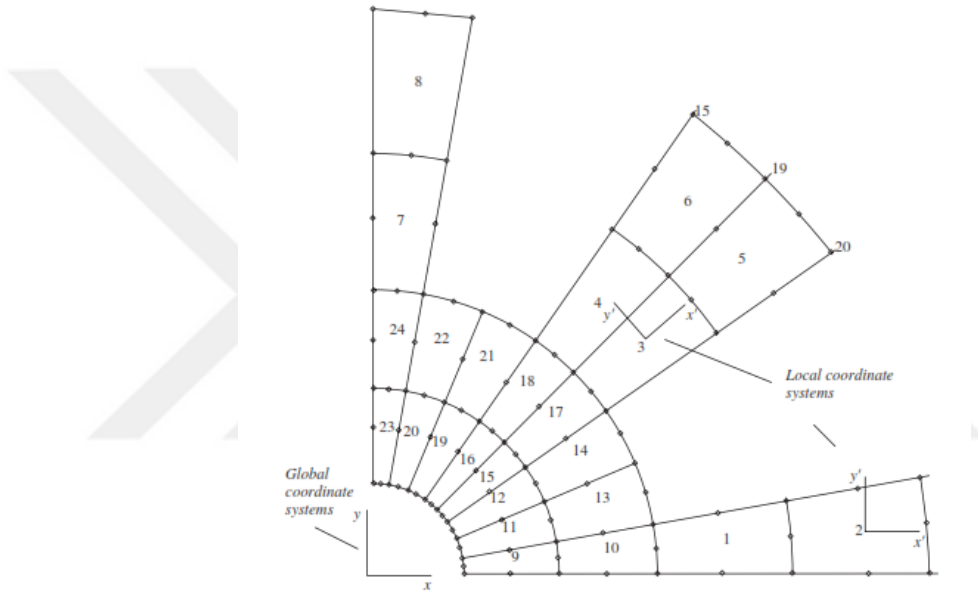
$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ & & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ & & & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ & & & & c_{55} & c_{56} \\ & & & & & c_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{xy} \end{Bmatrix}$$

$$\sigma = c\epsilon$$

c, deneysel yöntemlerle elde edilen, malzeme özelliğine bağlı sabitlerin bir matrisidir.

2.5.7. Yer değiştirme interpolasyonu

Sonlu elemanlar formülasyonu bir koordinat sistem tabanlıdır. Elemanların sonlu elemanlar eşitlikleri oluşturulurken, uygun bir lokal koordinat sistemi kullanılır. Bu koordinat sistemi eleman için tüm yapı için tanımlanan “global” koordinat sistemi referans alınarak oluşturulur.



Şekil 2.27. Lokal ve global koordinat sistemi

Bir eleman üzerinde tanımlanan lokal koordinat sistemi esas alınarak, elemanın içindeki yer değiştirme, elemanın düğüm noktalarındaki yer değiştirmelerin kullanıldığı basit polinom interpolasyonları ile tahmin edilir.

$$U^h(x, y, z) = \sum_{i=1}^{n_d} N_i(x, y, z) d_i = N(x, y, z) d_i \quad (2.19)$$

Denklemden h üst simgesi yaklaşımı temsil eder, n_d elemanı şekillendiren düğüm noktalarının sayısı ve d_i ise i 'inci düğüm noktasındaki hesaplanması istenen yer değiştirme miktarıdır.

$$d_i = \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_{nf} \end{Bmatrix} \begin{array}{l} \longrightarrow \text{yer de\u0131\u0131rtme bile\u015feni 1} \\ \longrightarrow \text{yer de\u0131\u0131rtme bile\u015feni 2} \\ \longrightarrow \text{yer de\u0131\u0131rtme bile\u015feni } n_f \end{array}$$

n_f d\u00f6\u0131\u00fcm noktasındaki serbestlik derecesi sayısıdır. \u00dc\u00e7 boyutlu katılar i\u00e7in, $n_f=3$ d\u00fcr.

$$d_i = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{Bmatrix} \begin{array}{l} \longrightarrow \text{x y\u00f6n\u00fcndeki yer de\u0131\u0131rtme} \\ \longrightarrow \text{y y\u00f6n\u00fcndeki yer de\u0131\u0131rtme} \\ \longrightarrow \text{z y\u00f6n\u00fcndeki yer de\u0131\u0131rtme} \end{array}$$

Yer de\u0131\u0131rtme bile\u015feni aynı zamanda yapının d\u00f6nme y\u00f6n\u00fcndeki yer de\u0131\u0131rtmelerini de i\u00e7ermektedir. T\u00fcm eleman i\u00e7in toplam yer de\u0131\u0131rtme de vekt\u00f6r\u00fcd\u00fcr.

$$d_e = \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_{nd} \end{Bmatrix} \begin{array}{l} \longrightarrow \text{d\u00f6\u0131\u00fcm noktası 1' deki yer de\u0131\u0131rtmeler} \\ \longrightarrow \text{d\u00f6\u0131\u00fcm noktası 2' deki yer de\u0131\u0131rtmeler} \\ \longrightarrow \text{d\u00f6\u0131\u00fcm noktası } n_f \text{ 'deki yer de\u0131\u0131rtmeler} \end{array}$$

$$N(x, y, z) = [N_1(x, y, z) \ N_2(x, y, z) \ ... \ N_{nd}(x, y, z)]$$

		↓
1. d\u00f6\u0131\u00fcm	2. d\u00f6\u0131\u00fcm	n. d\u00f6\u0131\u00fcm
noktası i\u00e7in	noktası i\u00e7in	noktası i\u00e7in

Bu nedenle, t\u00fcm elemanın toplam serbestlik derecesi ($nd \times n_f$) olmaktadır. Denklem 2.19'daki N , elemandaki d\u00f6\u0131\u00fcm noktalarının koordinatlara g\u00f6re yer de\u0131\u0131rtme bi\u00e7imlerini belirleyebilmek i\u00e7in \u00f6nceden tanımlanmış olan \u015fekil fonksiyonlarının bir matrisidir.

Ni düzenlenirse:

$$N_i = \begin{bmatrix} N_{i1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N_{i2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_{inf} \end{bmatrix}$$

Üç boyutlu katılar için, $nf = 3$ ve $N_{i1} = N_{i2} = N_{i3}$ dür. Bir düğüm noktasındaki tüm yer değiştirme bileşenleri için aynı şekil fonksiyonunu kullanmak şart değildir. Öteleme ve dönme hareketleri için ayrı ayrı şekil fonksiyonları kullanılabilmektedir.

Yukarda tanımlanan yöntem “yer değiştirme metodu” olarak bilinmektedir. Sonlu elemanlar yaklaşımlarında gerilmeleri tanımlayabilmek için kullanılan farklı yaklaşımlar da mevcuttur.

2.5.8. Sonlu elemanlar eşitliklerinin lokal koordinat sistemindeki formasyonu

Şekil fonksiyonları tanımlanan bir eleman için düğüm noktalarının interpolasyon denklemi ve gerinim-yer değiştirme denklemi, gerinim enerjisi eşitliğinde yerine konulursa:

$$\pi = \frac{1}{2} \int_{V_e} \varepsilon^T c \varepsilon dV = \frac{1}{2} \int_{V_e} d_s^T B^T c B d_s dV = \frac{1}{2} d_s^T \left(\int_{V_e} B^T c B dV \right) d_s \quad (2.20)$$

elde edilir.

B, gerinim matrisi olarak tanımlanmaktadır.

$$B = LN \quad (2.21)$$

L, farklı problemler için tanımlanan diferansiyel operatörüdür.

Direngenlik matrisi:

$$K_e = \int_{V_e} B^T c B dV \quad (2.22)$$

Olarak formülüle edilir.

Denklem 2.20 tekrar yazılırsa:

$$\pi = \frac{1}{2} d_e^T k_e d_e \quad (2.23)$$

Elde edilmiş olur. Direngenlik matrisi, k_e , simetriktir.

Sistemin toplam kinetik enerjisi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$T = \frac{1}{2} \int_{V_e} \rho U^T U dV = \frac{1}{2} \int_{V_e} \rho d_e^T N^T N d_e dV = \frac{1}{2} d_e^T \left(\int_{V_e} \rho N^T N dV \right) d_e \quad (2.24)$$

Kütle matrisi:

$$m_e = \int_{V_e} \rho N^T N dV \quad (2.25)$$

Kinetik enerji denkleminde yerine yazılırsa:

$$T = \frac{1}{2} d_e^T m_e d_e \quad (2.26)$$

Elde edilmiş olur.

Dış kuvvetlerin yaptığı iş aşağıdaki denklemle ifade edilir.

$$W_f = \int_{V_e} d_e^T N^T f_b dV + \int_{s_e} d_e^T N^T f_s dV + d_e^T \left(\int_{V_e} N^T f_b dV \right) + d_e^T \left(\int_{s_e} N^T f_s dV \right) \quad (2.27)$$

$$F_b = \int_{V_e} N^T f_b dV \quad (2.28)$$

Ve

$$F_s = \int_{s_e} N^T f_s dV \quad (2.29)$$

F_b ve F_s kuvvetleri, elemanın düğüm noktalarında bir elemana etki eden tüm dış kuvvetlerin toplamına eşit olan reaksiyon kuvvetleridir.

İş denklemi tekrar yazılırsa:

$$W_f = d_e^T F_b + d_e^T F_s \quad (2.30)$$

elde edilir.

Eşitlikler Lagrangian fonksiyonunda yazıldığında ve Hamilton prensibi kullanıldığında aşağıdaki forma ulaşılmaktadır

$$k_s d_s + m_s \ddot{d}_s = f_s \quad (2.31)$$

Burda direngenlik matrisi (k_s), kütle matrisi (m_s) ve elemanın düğüm noktalarına etki eden toplam dış kuvvetlerin vektörel toplamı (f_s) olan bir elemanın, sonlu elemanlar eşitliğini göstermektedir.

2.5.9. Koordinat dönüşümü

Denklem 2.31, bir elemanda lokal koordinat sistemi baz alınarak oluşturulmuştur. Genelde, yapı farklı konumlardaki birçok elemana bölünerek oluşturulmaktadır. Tüm eleman eşitliklerini global sistem eşitlikleri formunda birleştirmek için, tüm yapı için tanımlanmış olan global koordinat sistemi referans alınarak bir koordinat dönüşümü yapılmalıdır.

Koordinat dönüşümü, lokal koordinat sistemi tabanlı yer değiştirme vektörü (d_s) ve aynı eleman için global koordinat sistemi tabanlı yer değiştirme vektörü (D_s) arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir.

$$d_s = T D_s \quad (2.32)$$

Dönüşüm matrisi (T), kuvvetin lokal ve global koordinat sistemi dönüşümü için de uygulanabilmektedir.

$$f_e = TF_e \quad (2.33)$$

F_e , global koordinat sisteminde i düğüm noktasındaki kuvvet vektörünü simgeler. Denklem 2.32 ve 2.33, global koordinat sistemi tabanlı eleman denkleminde yerine

Yazılırsa:

$$K_e D_e + M_e D_e = F_e \quad (2.34)$$

Elde edilir.

2.5.10. Global sonlu elemanlar eşitliklerinin birleştirilmesi

Her eleman için sonlu elemanlar eşitlikleri global sonlu elemanlar sistemi eşitlikleri formunda birleştirilebilir.

$$KD + MD = F \quad (2.35)$$

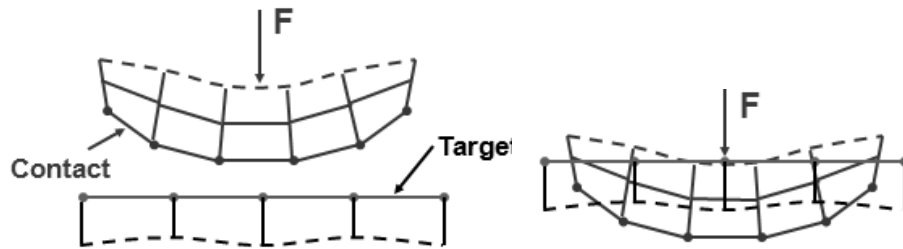
K , global direngenlik matrisi, M , global kütle matrisi, D , tüm düğüm noktalarındaki yer değiştirmelerin bir vektörü ve F ise tüm düğüm noktalarındaki eşdeğer kuvvet vektörlerinin bir bileşke vektörüdür. Bu tez kapsamında $KD=F$ olarak kullanılmıştır.

2.5.11. Global sonlu elemanlar eşitliklerinin çözümü

Global sonlu elemanlar eşitliklerini çözerek, düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler hesaplanabilmektedir. Bundan sonra herhangi bir elemandaki gerinim ve gerilmeler yukardaki eşitlikler kullanarak elde edilebilmektedir.

2.5.12. ANSYS'de kontak problemlerinin çözümü

İki ayrı yüzey birbirine dokunduğu zaman, karşılıklı teğet olurlar. Fiziksel olarak, kontakta olan yüzeyler şu karakteristiklere sahiptirler. Birbirleri içine geçmezler. Basma normal kuvvetlerini ve teğetsel sürtünme kuvvetlerini iletebilirler. Çekme normal kuvvetini ise genelde iletmezler. Bu nedenle birbirlerinden ayrılmakta serbesttirler. Kontak, bir değişen durum doğrusalsızlığıdır. Parçalar dokunuyor veya ayrılmış iken, sistemin direngenliği kontak durumuna bağlıdır. Fiziksel temas eden parçalar birbirlerinin içine geçmezler. Bir kontak bölgesinde uyumluluğun sağlanması için program yüzeylerin penetrasyonunu önlemek için iki kontak yüzeyi arasında bir ilişki kurar. ANSYS, kontak ara yüzünde uyumluluğu sağlamak için farklı kontak formülasyonlarını sunmaktadır



Şekil 2.28. Penetrasyon ve kontak kuvveti

Kontak uyumluluğu sağlanmadığında, iç içe geçmeler meydana gelir.

Yüzeylerin lineer olmayan katı cisim kontakları için, Pure Penalty veya Artırılmış Lagrange formülizasyonları kullanılabilir.

-Her ikisi de penalty- tabanlı kontak formülüdür.

-Sonlu bir kontak kuvveti F_{normal} ve kontak direngenliği k_{normal} olaraktanımlanır. Daha yüksek kontak direngenliği, daha düşük penetrasyon $x_{penetrasyon}$, anlamına gelir.

-Sonsuz bir k_{normal} için, sıfır penetrasyon elde edilir. Bu nümerik olarak penalty metodu ile mümkün olmamakla beraber, $x_{penetrasyon}$ ihmal edilebilir derecede küçük olduğu durumda, çözüm sonuçları doğrudur.

Pure Penalty ve Artırılmış Lagrange metodu arasındaki ana fark, ikinci metodun kontak kuvvetini (kontak basıncı) artırmasıdır. Ekstra λ terimi nedeni ile, artırılmış Lagrange metodu, kontak direngenliğinin (k_{normal}) büyüklüğü için daha az hassastır.

Diğer bir seçenek ise “Lagrange Çarpanı Formülüzasyonu” dur. Normal Lagrange Formülüzasyonu kontak uyumluluğunu tatmin edebilmek için bir ekstra serbestlik derecesi ekler (kontak basıncı). Sonuç olarak, kontak kuvvetini, kontak direngenliği ve penetrasyon gibi yeniden çözmek yerine, bir ekstra serbestlik derecesi için çözer.

$$F_{normal} = DOF \quad (2.36)$$

İki yüzey arasındaki bağlı ve ayrılma olmayan özel kontak tiplerinde, “Çoklu Nokta Sınırlaması (MPC) Formülüzasyonu” uygun olmaktadır.

2.5.13. ANSYS sonlu elemanlar paket programı

Hem zamandan tasarruf etmek hem de daha doğru çözüm elde edebilmek için çözümü uzun zaman alan karmaşık geometrilerin bilgisayarda çözülmesi dah doğru sonuçlar elde etmek açısından çok büyük önem taşır. Sonlu elemanlar metodunda, birtakım katı model paket programlarıyla modelleme yapılarak oluşturulan model küçük sonlu elamanlara bölündükten sonra analiz yapılmaktadır.

ANSYS fiziksel problemlerin çözümünde kullanılan sonlu eleman paket programıdır. ANSYS program paketinde archard aşınma modeli, TBDATA komutunda hazırlanarak modellenmektedir.

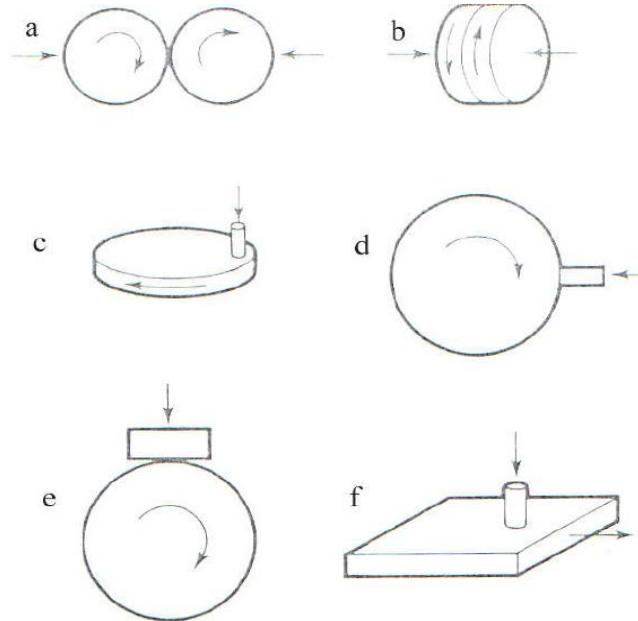


3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Deneysel Materyal ve Yöntem

Aşınmayı tespit etmek amacıyla kullanılan farklı deney düzenekleri mevcuttur. Aşınmayı oluşturan mekanizmayı incelemek ve pratikte uygulanana benzeyecek şekilde aşınma oranları ile sürtünme katsayıları üzerinde en elverişli tasarım verilerini elde etmek için aşınma hakkında laboratuvar çalışmaları yapılır ve bu çalışmalar sürtünmenin bağlı bulunduğu kayma ve aşınma oranını anlatmak bakımından önem arz eder.

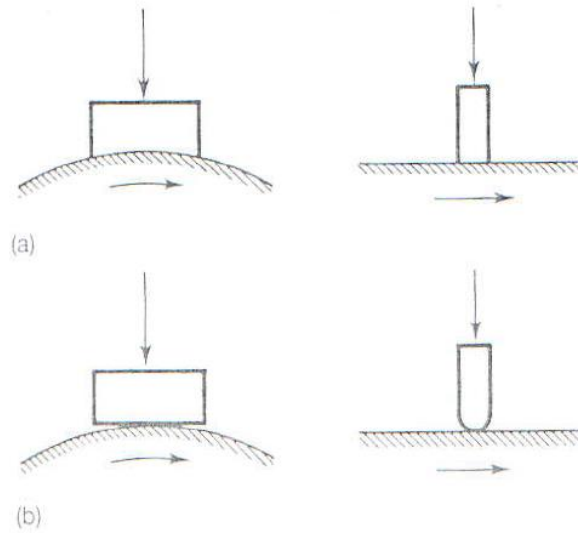
Şekil 3.1’de yer alan geometrik düzenlemeler bilinen aşınma test aparatlarına uygulanmış olup bunlar iki yönetime dayanmaktadır. İlk yöntem yüzeyde birbirleriyle aynı olan aşınma oranları ile ve birbiriyle simetrik şekilde oluşturulmuş kayma yüzeyleri biçimi, diğer yöntemse birbirinden hiç bir farkı olmayan iki malzemenin, bu aynılığa rağmen aşınma oranlarının birbirinden farklı olarak düzenlendiği ve diğer yönetime göre daha bilinen, asimetrik sistem şeklindedir.



Şekil 3.1. Kayma aşınması testlerinde kullanılan geometriler

Şekil 3.1 a ve b’de yer aldığı üzere aşınmayla ilgili çalışmalarda kullanımı pek fazla tercih edilmeyen simetrik düzenlemeler, birbirleriyle bir çizgi boyunca veya yüz yüze gelecek şekilde temas etmiş olan iki diskten meydana gelir. Bu düzen içinde gerçek anlamda simetri için iki eksenle döndürülmesi gerekmektedir.

Sürekli kullanılan asimetric testlerde bir pim bir diskin kenarına veya düz olan yüzey kısmına baskı yapar (c ve d), bir blok tarafından halkaya yük uygulanır (e) ya da düzlemsel şekildeki bir yüzeye bir pim tarafından yükleme yapılır (f). Bu gibi durumlarda oluşan temas, sadece bir noktada meydana gelebileceği gibi çizgisel olarak ay şeklinde yüzey boyunca da meydana gelebilir. Şekil 3.2’de karşı yüzeye uygunluk durumuna göre oluşan temas tipleri ayrıntılı şekilde gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Temas geometrileri

(a) karşı yüzeyin şekline uygun (b) karşı yüzey şekline uygun olmayan

Numune olarak nitelendirilen ve asimetric temas çiftlerinden olan pim ya da blok üstünden ne ölçüde aşınma meydana geldiği ölçümü yapılır. Karşı yüzey düzlem ve halka olarak isimlendirilebilir. Uygulanan bu yükler N’den kN değerlerine kadar değişebilir. Kayma hızları birkaç mm/dak ve daha büyük değerlere kadar uygulanmaktadır. Kayma aşınmalarında uluslararası standart test yöntemleri uygulanır.

Basit aşınma yönteminde kayan yüzeyin aşınmış kısmındaki mevcut aşınmış miktar temas bölgesindeki nominal basınca ve kayma uzaklığı yani mesafeye bağlıdır. Meydana gelen aşınmanın miktarı numunenin belli aralıklarla tartılma, ardından ölçülmesiyle elde edilir. Bir başka aşınma miktarını belirleme şekli ise elektriksel yada mekanik transdüserlerle aralıksız olarak pozisyonunu belirlemek ve ölçü miktarlarına bakarak onlardaki değişimlerle yapılandıklarıdır. Temas yüzeylerinin birinde eğer karşı yüzeyin biçimine uygun şekilde oluşmamış bir aşınma varsa bu görünmekte olan temas alanının olduğundan daha büyük hale gelmesine neden olur. Böyle bir durum gerçekleştiğinde aşınmanın izinin ölçümü yapılır ve ne miktarda aşınma gerçekleştiği hesaplanır.

Aşınma testi yapılırken mümkün olan işlemler sürtünme kuvvetini kayıt altına alabilmek ve bunun ölçümünü yapabilmektir. Bu işlem için örneğin teğet kuvveti ya da karşısındaki yüzeyin bağlı olduğu milin burulma momenti hesaplanarak ortaya çıkarılabilir. Sürtünme katsayısı olan “ μ ” nin değerleri devamlı olarak alınan sürtünmenin kaybı ile belirlenir ve kayma durumundaki değişimler belirlenir. Yüzeyin yapısında ve yüzeyin topoğrafyasında oluşan farklılıklar bu değişikliklerle ortaya çıkarılabildiği gibi aynı zamanda aşınma mekanizmasında hangi değişikliklerin oluştuğunu da gösterir. Bu yöntemle hem yağ filminde oluşmuş bozulmalar hem de koruyucu oksit incelemesi yapılabilir. Burdan elde edilen bilgiler zaman zaman aşınma oranı hakkındaki tam ölçülerden daha fazla değer arz edebilir.

Bir aşınma testi ile bunun yarı süresine ve iki kat kayma hızına sahip olan diğer bir aşınma testi aynı sonuçları sağlamaz. Çünkü kayma hızının değişmesiyle aşınma mekanizması ve aşınma oranında ani geçişler meydana gelir. Ani geçiş, aşınma oranının aniden artması ile sert aşınma mekanizmasından yumuşak aşınma mekanizmasına hızlı geçiş veya düşmesinde ise tam tersi bir olayın gerçekleşmesi olarak açıklayabiliriz.

Aşınmanın kayma yüzeyleri arasında yaşanan temas basıncına bağlı olmasıyla beraber mekanizmalar arası geçişlerin de aynı şekilde temas basıncında yaşanan değişimlere bağlı olduğu belirtilebilir. Aşınma testinde temas alanı ya da kayma hızı veya test

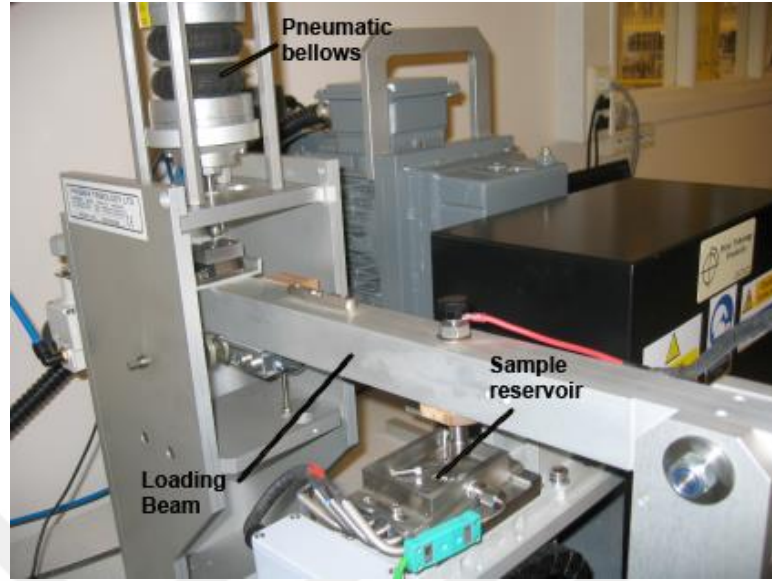
süresinde yaşanan değişimler gibi pek çok faktöre bakılması gerekir. Sürtünmelerden dolayı artan sıcaklıkların etkisi mevcutsa da, test sıcaklığının etkilediği kimyasal süreçler ve mevcut malzemenin mekanik davranışı üzerindeki etkileri açısından önem arz eder.

Sürtünme miktarıyla, deneyden sonra aşınmış yüzeylere yakın örneklerin bulunmasıyla ve aşınma parçacıklarıyla, testteki aşınma mekanizmasının uygulamadakiyle aynı olması sağlanabilir. Daha sonra laboratuvar testi sonuçları uygulamadaki bir probleme güvenli bir şekilde uygulanmalıdır.

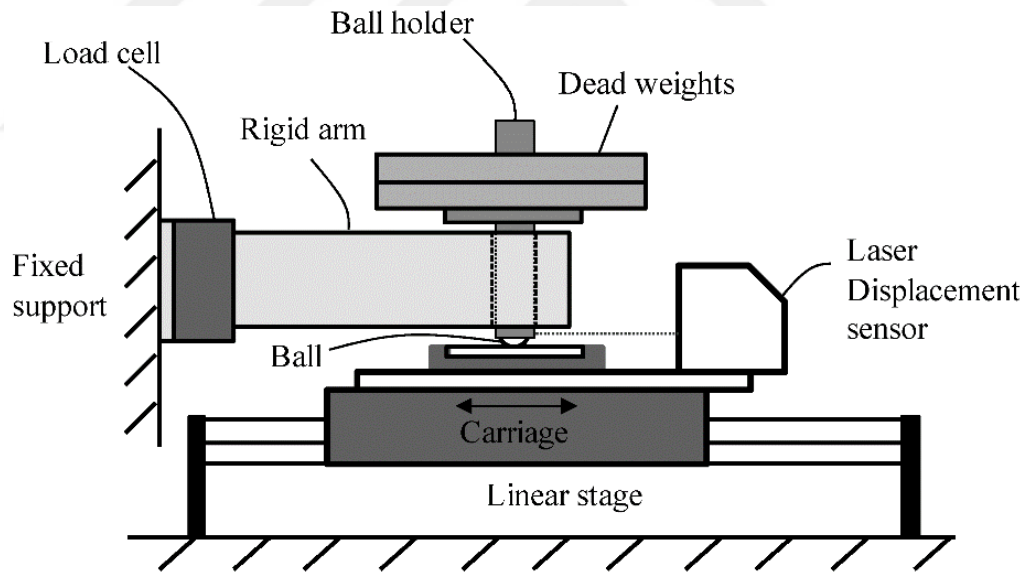
Deneyssel aşınma çalışmalarının yanında tam teorik ve yarı teorik hesaplamalar araştırmalar da yürütülmektedir. Yapılan deneyleri matematiksel yöntemlerle ifade etmek amacıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaktadır.

Bu çalışmadaki aşınma deneyinde, aşınmaya konu olan malzemelerin kayma aşınma davranışları incelenmiştir. Oda sıcaklığı altında malzeme açık havada doğrusal (ASTM F 732 (reciprocating mode) ileri-geri) aşınma deneyini gerçekleştiren reciprocating aşınma cihazı ile aşınma davranışı incelenmiştir. Malzeme kaybının ve sürtünme katsayısının zaman içindeki değişimi cihazı kontrol eden bilgisayarla deney koşulları tanımlanarak belirlenmiştir. Bu çalışmada yapay tükürük(silviya) kullanılarak ağız ortamı elde edilmiştir. Bu çalışma İzmir Dokuz Eylül üniversitesi metalürji ve malzeme mühendisliği bölümünün araştırma laboratuvarlarında yapılmıştır.

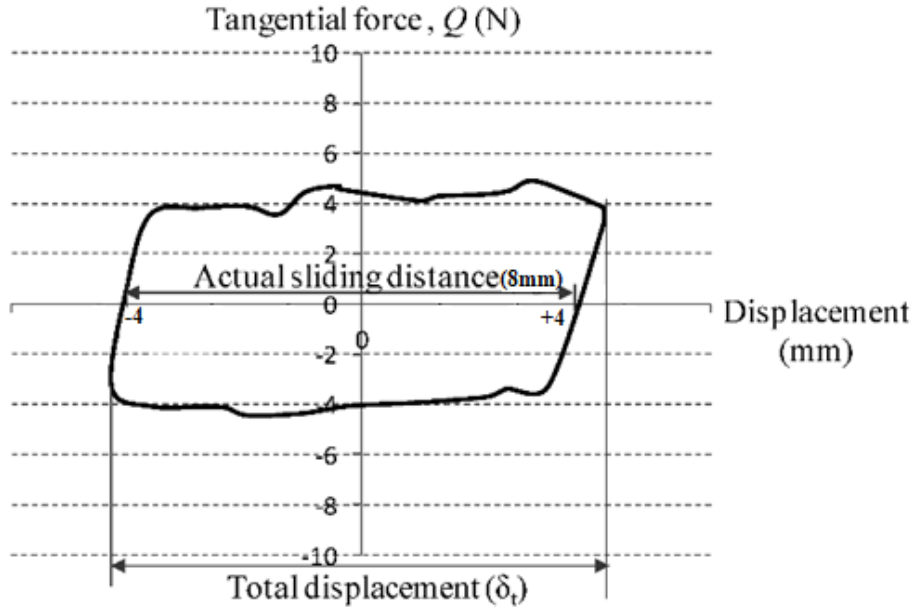
İleri-geri aşınma deneyleri 50 N yük uygulanan zirkonya malzemesinden yapılmış aşındırıcı kürenin hareketi ile yapılmıştır. Zirkonya kürenin çapı 6 mm'dir. Aşınma ise 8 mm'lik bir çizgi boyunca kürenin git gel hareketiyle yapılmıştır. Aşınma cihazı Şekil 3.3, deney düzeneği Şekil 3.4 ve aşınma bölgesinin şematik yapısı Şekil 3.5'de verilmiştir.



Şekil 3.3. Aşınma cihazı



Şekil 3.4. Aşınma deney düzeneği



Şekil 3.5. Aşınma mesafesi ve şematik yapısı

Aşınma deneylerinde kullanılan restoratif diş malzemeleri ve özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Bu malzemelerden oluşan numuneler ASTM F 732 cihazının standardına göre Atatürk üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi’nde hazırlanmıştır.

Çizelge 3.1. Malzeme özellikleri

Malzeme Özellik	Direk Kompozitler		İndirek Kompozitler	Seramikler		Diş
	NanoHibrit (Grandio)	Mikrohibrit (FiltekZ2)	Belle Glass	Feldespatk	Rezin Nano Seramik	Dentin
Üretim Fabrikasyonu	Vacopostfach 767Guxhaven, Germany	Z2503MESPE, St-Paul, MN, EUA	BelleGlass, Kerr Lab Corporation west Collins Orange, CA, USA	Vintage Opaque 3M USA	Lava Ultimate, 3M bulding USA	--
Elastisite Modülü	20G pa	16 G pa	30 G pa	8 G pa	11 G pa	18Gpa
Poisson Oranı	0.33	0.31	0.32	0.31	0.33	0.32
Arrhenius Etkisi	$1.2e-29 \text{ M}^{-1}\text{S}^{-1}$	$3.2e-29 \text{ M}^{-1}\text{S}^{-1}$	$2.4e-33 \text{ M}^{-1}\text{S}^{-1}$	$7.4e-30 \text{ M}^{-1}\text{S}^{-1}$	$4.5e-32 \text{ M}^{-1}\text{S}^{-1}$	$3.01e-29 \text{ M}^{-1}\text{S}^{-1}$
Yüzey Pürüzlülüğü (R_z)	2.12 μm	2.53 μm	2.02 μm	1.89 μm	1.93 μm	1.81 μm
Sertlik (Brinell)	105mpa	109mpa	99,8mpa	287mpa	173mpa	300mpa
Plastisite Modülü	2Gpa	1,6Gpa	3Gpa	0,8Gpa	1,1 Gpa	1.8 Gpa
Akma mukavimeti	320	335	299,4	835	520	420

Aşınmaya etki eden çok sayıda parametre sözkonusudur. Bunlar arasında yüzey pürüzlülüğü önemli bir yer tutmaktadır. Bu yüzden yüzey pürüzlülüğünün tanımlanması için çalışmalar yapılmış ve bunun standartlaştırıldığı kavramlar geliştirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün tanımlanması aşağıdaki kavramlarla yapılmaktadır.

3.1.1. Yüzey pürüzlülüğü ölçme

Malzemelerin yüzey pürüzlülüklerini ortaya koyan farklı standartlar mevcuttur. Bunlardan bazıları Türk Standardı TS 6212 , Amerikan ANSI B46.1, Alman DIN 4768 ve İngiliz BS 1134 (Part I ve Part II)örnek olarak verilebilir. Homojen malzemeler için yapılmış olan yüzey pürüzlülüğünü tanımlamak için pek çok metod belirlenmiştir.

Bu çalışmada Roddenstock RM 600 laser cihazında mikroskop altında yüzey düzensizliklerinde küçük açılarla gönderilen X ışınları ile pürüzlük değerleri elde edildi. Yüzey pürüzlülüğü değerleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Bu değerler SEY analizlerinde de kullanılmıştır.

3.1.2. Yüzey pürüzlülüğü parametreleri

Yüzey pürüzlülüğü ile ilgili parametreler; profil ortalama çizgisine(Şekil 3.6’ center-Line olarak görülmektedir) göre yüzeyin 2 boyutlu profilini veren, profilin düşey doğrultuda(Şekil 3.6’da yüzey düzlemine dik Y doğrultusu) girinti ve çıkıntıların oluşturduğu düzensizlikleri ifade etmektedir. Numune yüzeylerinin pürüzlülüklerinin sayısal olarak ifade edilmesinde genellikle Ra (Ortalama pürüzlülük değeri), Rmax (En büyük pürüzlülük değeri) ve Rz (10 noktanın ortalama pürüzlülük değeri) parametrelerinden faydalanılmaktadır.

Ortalama Pürüzlülük Değeri (R_a)

Ortalama pürüzlülük (R_a), pürüzlülük profili boyunca profil ortalama çizgisinden sapmalara (Y_i) ilişkin tüm değerlerin aritmetik ortalamasıdır. R_a , pürüzlülük profili ile bu profilin ortalama çizgisi arasındaki alandır. Şekil 3.6'da ortalama pürüzlülük değeri verilmiştir.

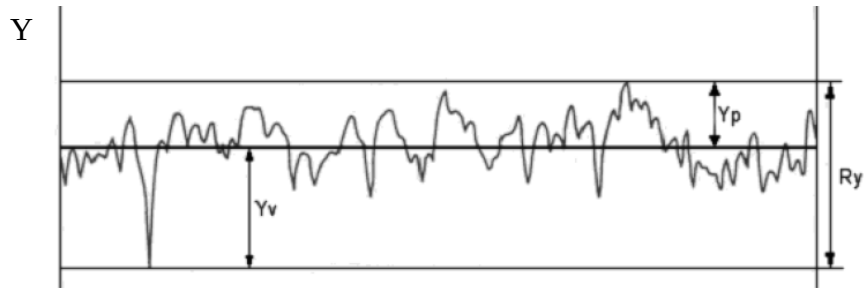


Şekil 3.6. Ortalama pürüzlülük değeri

Yüzey pürüzlülüğünü belirlemek için en sık kullanılan parametre, ortalama pürüzlülüktür. Ancak bu parametre yüzeyin yapısını açıklamak için tam bilgi veremez.

3.1.3. En büyük pürüzlülük değeri (R_{max})

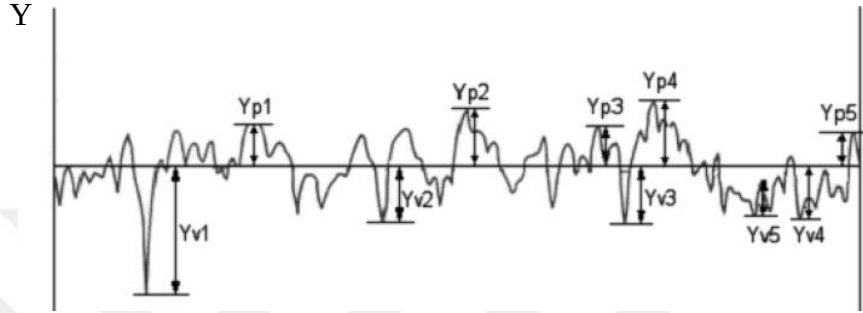
R_{max} , pürüzlülük profili boyunca, ortalama profil çizgisine göre en yüksek tepe (Y_p) ile en derin çukurun (Y_v) toplamını ifade etmektedir. Şekil 3.7'de R_y en büyük pürüzlülük değeri gösterilmektedir.



Şekil 3.7. En büyük pürüzlülük değeri

3.1.4. On nokta pürüzlülüğü ortalama değeri (R_z)

R_z değeri profil uzunluğu boyunca en yüksekte ya da en çukurda olan 5 adet tepe veya çukurun ortlamalarının toplanmasıyla bulunur (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. On nokta pürüzlülüğü ortalama değeri

Deney Numuneleri

Bu çalışmada kullanılan numuneler Çizelge 3.1’de verildiği gibi doğal diş ve üç ana grubundan oluşan 6 farklı malzemeden (İndirek kompozitler, Nanohibritler, Mikrohibritler, Feldspatikler, Resin nano seramikler, Dentin) oluşmuştur. Her malzeme için 5 numune hazırlanmıştır.

3.1.5. Deney mesafesi

Her deney 100 m mesafe için incelenmiştir.

3.1.6. Deney şartları

Deney oda sıcaklığında ve yapay tükürükle 50 N yük altında 100 m kayma mesafesinde, gerçekleştirildi.

3.1.7. Malzemelerde sertlik deneyi

Sertliği malzemelerin deformasyon karşısında gösterdikleri direnç olarak tanımlamak mümkündür. Sertlik deneyleri çok önemli mekanik deneyler arasındadır. Bu deneyler ve imal edilmiş parçaların tahribatsız muayenesini sağlamaktadır. Sertlik lme yöntemi numune üzerinde kalıcı iz büyüklüğüne dayanan bir yöntemdir.

Standart batıcı bir ucun malzemeye batırılması ile malzemenin göstermiş olduğu direnç bize sertliği vermektedir. Batıcı uçlar; piramit bilye ya da koni biçiminde olup sertlikleri deney numunesinin sertliğinden çok yüksektir. Malzemeye uygun seçilen batıcı uç uygulanan yük altında malzemeye batırıldığında malzeme üzerinde bir iz oluşturur. Genellikle malzeme sertliği, bu izin büyüklüğü ile ters orantılıdır.

3.1.8. Mikrosertlik lme yöntemleri

Çok küçük deney numuneler ve ince sacların sertlik ölümüne uygun bir yöntemdir.

Metalik alaşım fazlarının sertlik tespitinde, cam, porselen ve segregasyonlar gibi çok sert ve kırılğan malzemelerin sertlik ölümlerinde kullanılır. Knoop ve Vickers mikrosertlik lme yöntemleridir.

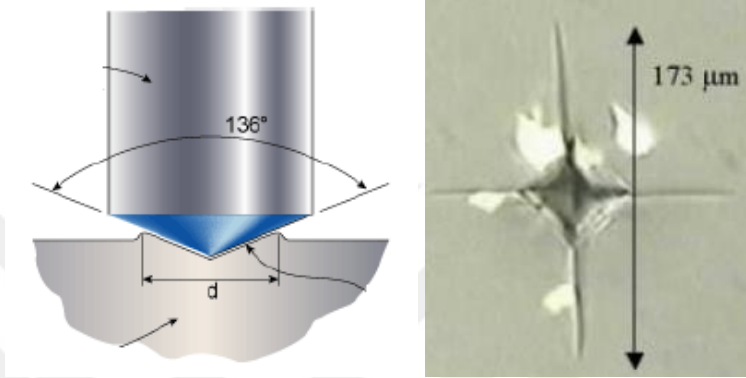
3.1.9. Vickers sertlik deneyi

Vickers lme yönteminde 136° tepe açısı olan, tabanı kare, elmas piramit batıcı uç kullanılmaktadır. Sertlik; batıcı piramit ucun malzeme cinsine göre seçilen yük altında malzemenin yüzeyine belli bir süre batırılması sonucu oluşan izin köşegen uzunlukları

llerek belirlenmektedir. Vickers sertlik değeri; (VSD) $VSD \left(\frac{kgf}{mm^2} \right) = (1,8544F)/d^2$

bağıntısıyla bulunur. Burada uygulanan yük, F, oluşan izin alanına bölünür. d izin

ortalama köşegen uzunluğu olup $d = (d_1 + d_2)/2$ formülü ile hesaplanır. Şekil 3.9'da Vickers sertlik ölçüm deneyinin şematik gösterimi bulunmaktadır. Şekil 3.10'da Mikro sertlik cihazı verilmiştir.



Şekil 3.9. Vickers sertlik deneyinin şematik gösterimi

Vickers sertliğinin avantajı, oldukça doğru okumalar yapması ve tüm metal ve işlem görmüş yüzeyler için sadece bir tip batıcı ucun kullanılmasıdır.



Şekil 3.10. Sertlik ölçme cihazı

Bu çalışmadaki modellerin sertlik değerleri Vickers yöntemi ile Atatürk üniversitesi malzeme mühendisliği bölümünde ölçülmüştür. Numunelerin sertlik değerleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

3.2. Sayısal Material ve Yöntem

Sayısal yöntemler (sonlu elemanlar yöntemi, sınır eleman yöntemi, sonlu fark yöntemi) mühendislik çalışmalarında çok yaygın kullanım alanı bulmuştur. Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemler, bilgisayar kapasitelerinin artmasıyla beraber, günümüzde tıp, diş hekimliği ve mühendislik alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Tıpta; ortopedi, damar cerrahisi, kalp ve plastik cerrahide kullanılan sonlu elemanlar gerilme analizi, diş hekimliğinde; tedavi, implant, ve protez bilim dallarında kullanılmaktadır.

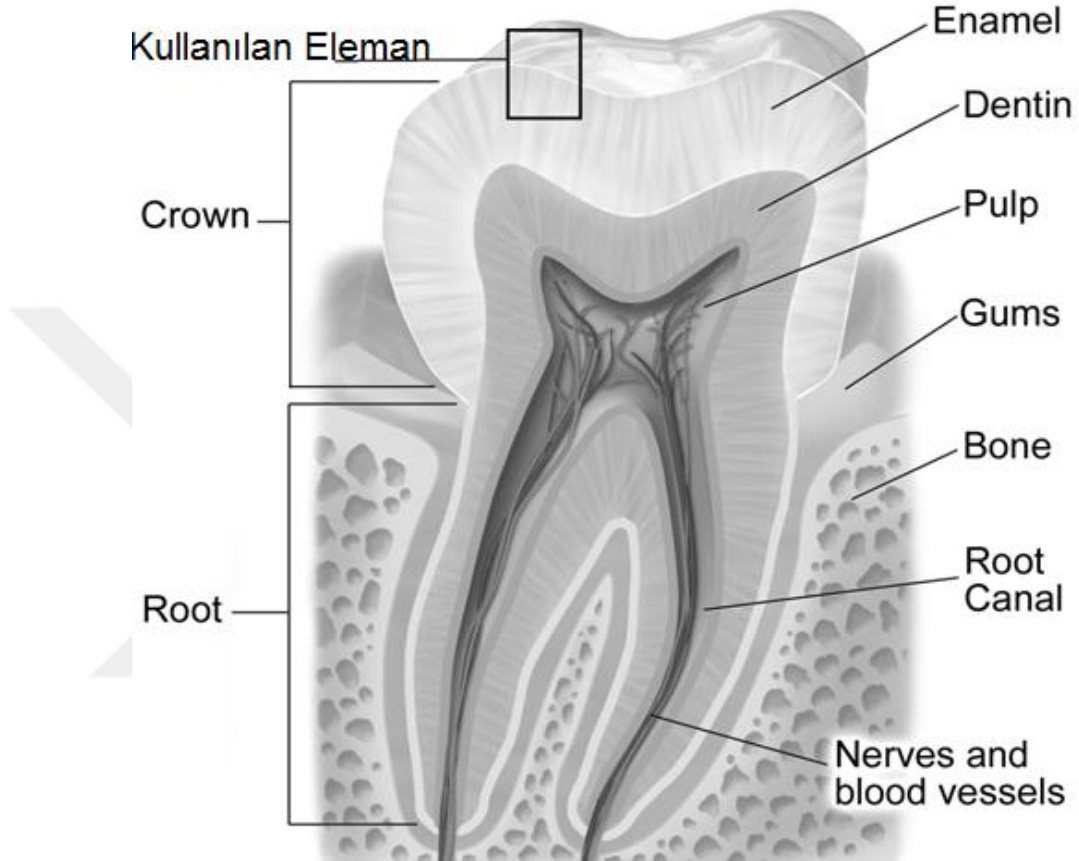
Sonlu elemanlar yöntemi, düzgün olmayan geometri, özelliklerin yöne bağlı olan/olmayan (anizotropik/ izotropik) malzemeler ve karmaşık sınır koşullarına sahip olan yapılar için uygun bir sayısal yöntemidir.

Bu çalışmada malzemelerin aşınma davranışlarını incelemek için sonlu elemanlar tabanlı ANSYS paket porogramı kullanıldı.

Sonlu Elemanlar Yönteminde kullanılan Model:

Şekil 3.11’ de şematik olarak görüldüğü gibi dişin restorasyon yapılması gereken kısımdan bir eleman alınmıştır. Restoratif malzeme

ve dişin doğal yapısına uygun bir şekilde modelin üst kısmında oluşturulmuştur.



şekil 3.11. SEY İçin kullanılan elemanın şematik görüntüsü

Aşınmanın kendisi çok yönlü bir olay olduğu için aşınma teorisi ve mekanizması, yüzey przliğn, sistemin malzeme özelliklerini, temas geometrisini, çalışma şartlarını (yk, hız, v.s.) ve çevresel faktörleri kapsayan çok karmaşık bir durumdur. Bir matematik model üstünde bu kadar çok bileşeni dikkate alıp çözümlmek zordur. Son yıllarda azda olsa bazı çalışmalar görülmektedir ve onlardan sadece çok azı aşınma olayını modelleme çalışmışlardır.

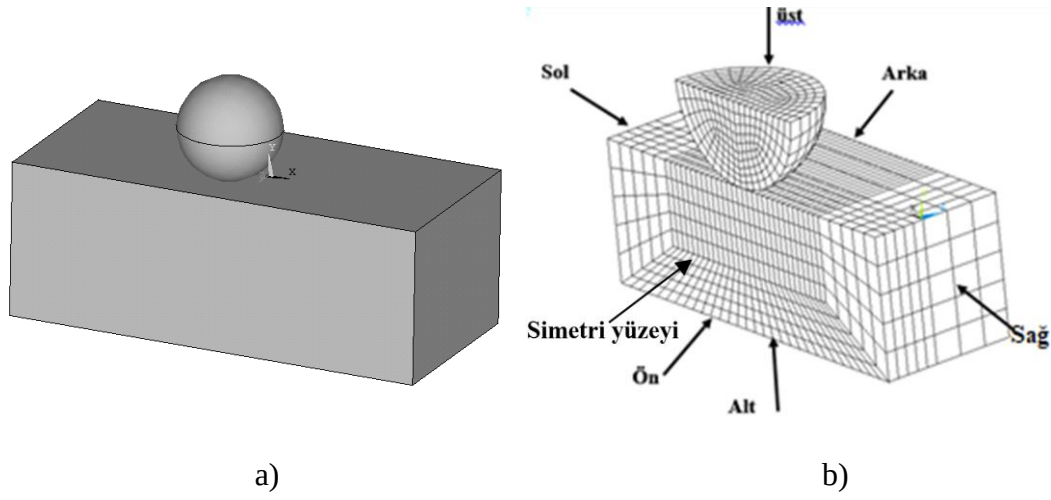
Thomson *et al.* (2006); yaptıkları çalışmada sonlu elemanlar yöntemleri ile bir diskte oluşan sürünme gerinmelerinden yola çıkarak, ARCHARD denklemine göre sürünme

ve aşınma aynı olduğu için bir yaklaşım teorisinde bulunmuşlardır. Eşitliklerinin benzerliklerinden dolayı aşınmayı sürünme çözümleri ile çalışmışlar.

Ozen (2016), çalışmasında farklı yüklere maruz kalan farklı frekanslarda olan ve iki diskten oluşan sistemde aşınma davranışını incelenmiştir.

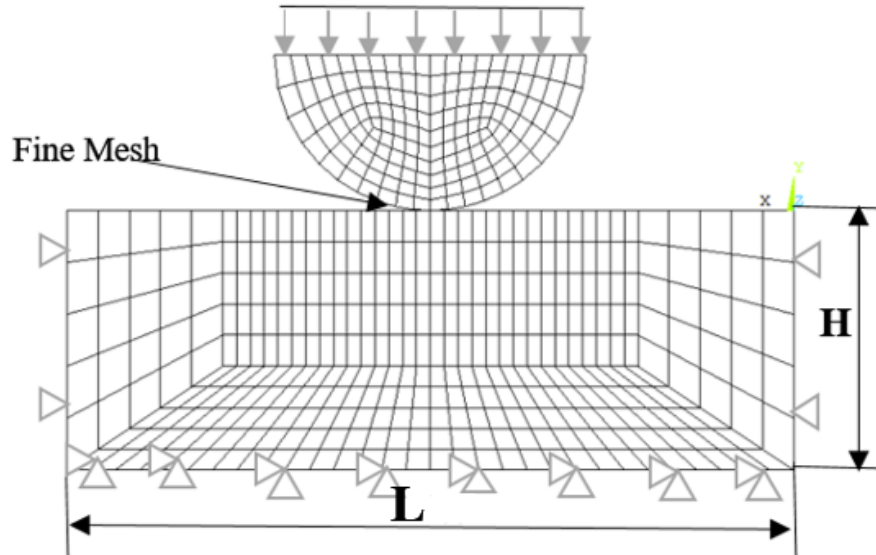
Lewis and Olofsson (2004), çalışmalarında laboratuvar testlerden alınan malzemelerin pin-on disk ve çift disk makineleri üzerinde aşınma katsayılarına ait haritalarını çıkarmışlardır. Bu haritaları kullanarak aşınma rejimi (temas şartları ve temas noktaları) ve geçişlerini, temas basıncı ve kayma hızı şartlarını belirlemeyi hedeflenmiştir. Laboratuvar verileri ile etkinlik alanları arasında yaptıkları karşılaştırmalarda da yüzey morfolojilerini dikkate almışlardır. Belirli basınç ve düşük hız da su verilmiş numunelerin yüksek aşınma direncine sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Ancak yüksek hız ve büyük yüklemde, temas eden sürtünmeli yüzeylerde temas sıcaklığı arttığı için tavlamanın etkisinden ötürü sertleştirilmiş numunelerin aşınma direncinin azaldığı sonucuna varmışlardır. Bu yüzden sertleştirilmiş numunelerin, sertleştirilmemiş numunelerden daha fazla katı aşınmasına maruz kaldığını vurgulamışlardır.

Bu çalışmada ANSYS paket programı ile gel-git aşınma sisteminin detaylarını içeren üç boyutlu yarım model hazırlanmıştır. Model boyutları deneyde kullanılan numune boyutları ile aynı seçilmiştir. Eleman tipi olarak SOLID 185 kullanılmış olup, bu 3 boyutlu yapıların modellenmesinde kullanılan bir elemandır. Üçer serbestlik derecesi bulunan dokuz adet düğüm noktası ve ortotropik malzeme özellikleri tanımlanabilmektedir. Eleman, plastisite, hiperelastisite, gerilme sertleşmesi, sünme, yüksek deformasyon ve yüksek gerinim kapasitesine sahiptir. Düzensiz bölgelerde kullanıldığı zaman prizmatik, dörtyüzlü ve piramit şekillerini alması avantaj sağlamaktadır. Kontak bölgesini modellemek için “surface to surface” özelliğine sahip TARGE170 ve CONTA174 elemanlar kullanıldı. Şekil 3.12 ve 3.13’de görüldüğü gibi numunelerde boy L, yükseklik H ve en W ile tanımlanmıştır. Burada L=14mm, W=10mm ve H=5mm dir.

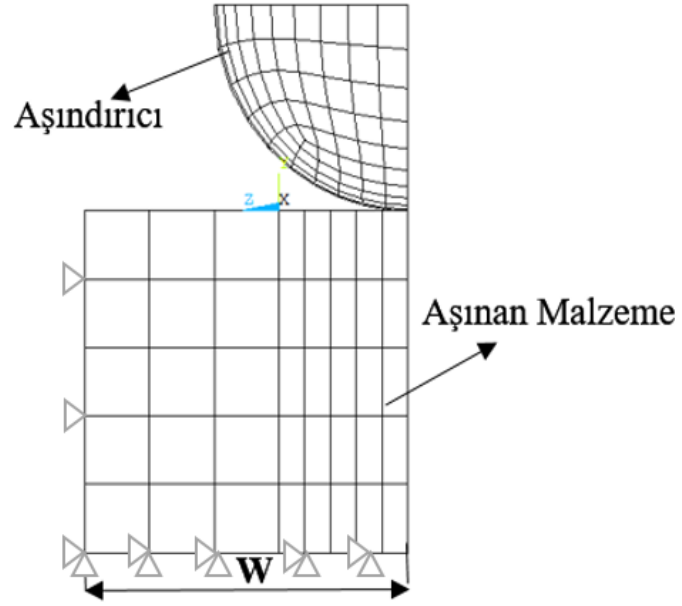


Şekil 3.12. a) Tam model b) kullanılan yarım modele bakış yönleri

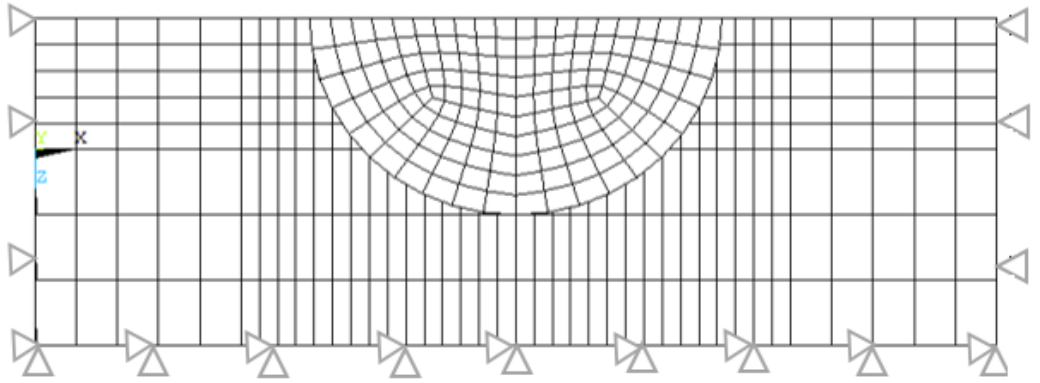
Şekil 3.14, 3.15 ve 3.16 üç boyutlu sonlu elemanlar modelini farklı açılardan göstermektedir. Model alt ve kenardan bağlanmış olup aşındırıcının üst kısmından yük uygulanmıştır. Model alt, sağ ve sol ve arkadan rijitlenmiştir ve yarım küre üzerinden yük uygulanmıştır.



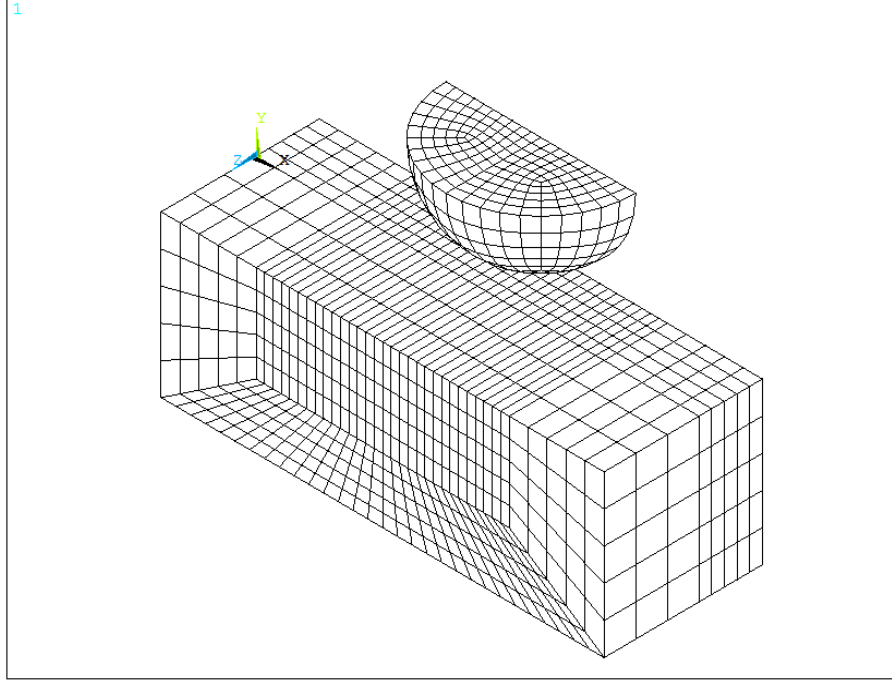
Şekil 3.13. Kullanılan modelin sınır şartları



Şekil 3.14. Kullanılan modelin soldan görünüşü



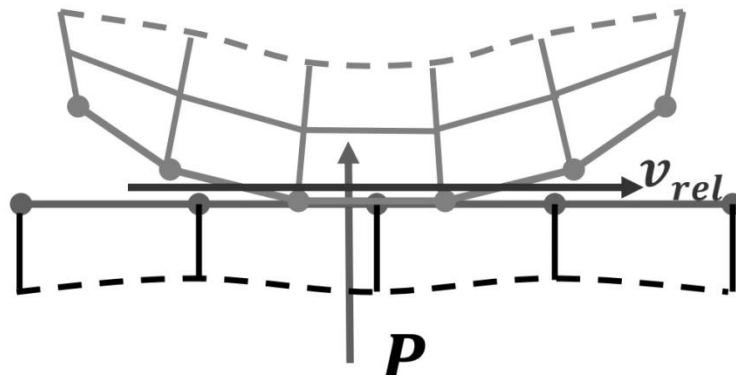
Şekil 3.15. Kullanılan modele üsten görünüşü



Şekil 3.16. Kullanılan modelin perspektif görünüşü

3.2.1. Archard aşınma modeli

Archard aşınma modeli (Şekil 3.17) temas yüzeyinden malzemenin yavaş yavaş artan bir şekilde kaybını simüle eder. Aşınma sırasında, w hacim kaybını tahmin eder buda temas yüzeyindeki basınç, kayma hızı ve kontak yüzeyi ile orantılıdır. Aşınma temas yüzeyinin ters yönünde ortaya çıkar.



Şekil 3.17. Aşınma modeli

$$W = \frac{K}{H} P^m v_{rel}^n \quad (3.1)$$

Burada K aşınma katsayısı, H malzeme sertliği, P kontak basıncı, m basınç üssü, v_{rel} kayma hızı ve n hız üssünü, göstermektedir. Kontak NODE'ları yeni pozisyonlara hareket ederek, kontak değişkenleri değişiyor. Altta olan süreklilik unsurlarında malzeme kaybına uğrar ve dolayısıyla aşınma simüle olur.

ANSYS paket programında archard aşınma modeli, TBDATA komutunda C1, C2, C3 ve C4 sabitleri girilerek belirtilmiştir. Bu sabitler aşınma katsayısı (K) malzeme sertliği (H), temas basıncı (m) ve kayma hızı üssü (n) olarak tanımlanmıştır. ANSYS'de TBDATA komutları alttaki gibi hazırlanmıştır.

TBFIELD,TIME,...

TBDATA,1,C1,C2,C3,C4

Burada C₁ aşınma katsayısı, C₂ sertlik, C₃ basınç üssü ve C₄ hız üssü olarak TBDATA komutunda yer almaktadır.

C₁ aşınma katsayısı alttaki denklemden elde edilir.

$$C_1 = k = \frac{VH}{FS} \quad (3.2)$$

Burda K aşınma katsayısı, V aşınan hacim, F uygulanan yük, H sertlik ve S kayma mesafesidir.

C₂, malzeme sertlik değeri olarak mikro sertlik ölçüm cihazları vasıtası ile ölçülmüştür. Bu çalışmadaki sertlik değerleri Atatürk Üniversitesi metalurji bölümündeki mikro sertlik cihazları vasıtası ile ölçülmüştür.

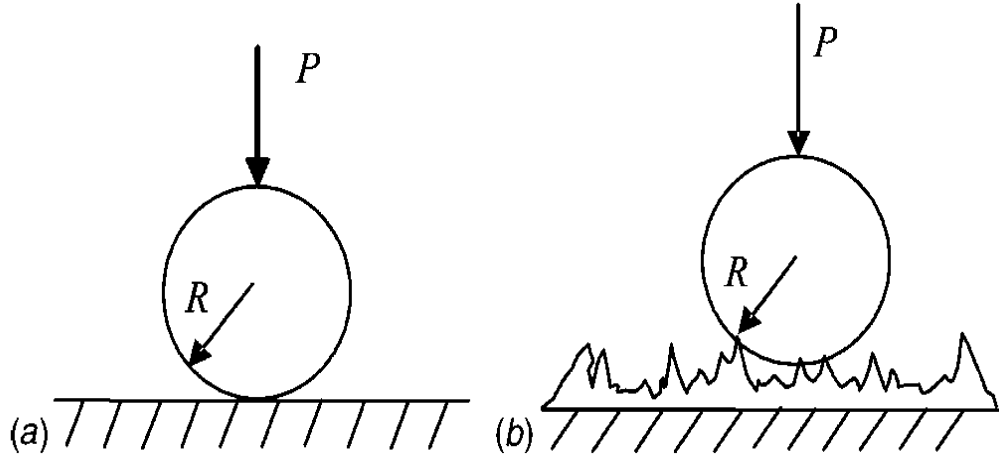
C₃ veya basınç üssü, pürüzlü temas yüzeyindeki kontak basınç ve Hertz teorisi vasıtası ile belirlenmiştir. Şekil 3.18 hertz kontak şematiğini pürüzlü ve pürüzsüz yüzeylerde göstermektedir. Kolaylık sağlamak için tüm elastik deformasyon sadece bir cisimde

meydana geldiği düşünülmektedir, buda E' olarak tanımlanmaktadır diğer cisim ise rijit olarak varsayılır.

$$\frac{1}{E'} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (3.3)$$

Burda E elastisite modülü ve ν poisson oranıdır. Hertz basınç dağılımı aşağıdaki gibidir.

$$P_H\left(\frac{r}{a_H}\right) = P_{0,H} \sqrt{1 - \left(\frac{r}{a_H}\right)^2} \quad (3.4)$$



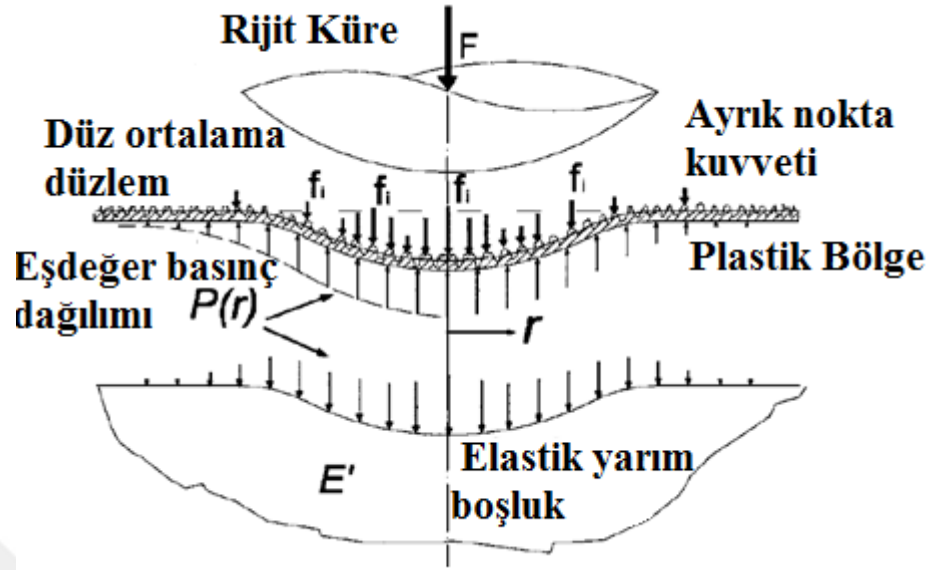
Şekil 3.18. Hertz kontak şematiği
(a) Pürüzsüz yüzey (b)Pürüzlü yüzey

Burda $P_{0,H} = \frac{1.5F}{(\pi a_H^2)}$ ve $a_H = \left(\frac{0.75F\rho}{E}E'\right)^{1/3}$ sırasıyla maksimum basınç ve Hertz temas alanının yarıçapı olarak tanımlanmaktadır. F basınç ve ρ eğrilik yarıçapı olarak tanımlanmaktadır.

Pürüzlülük izotropik ve rastgele dağılmışsa, yüzey Gauss olarak adlandırılır. Bu çalışmada pürüzlerdeki deformasyon modu plastik olarak kabul edilmiştir, buradan gerçek temas yüzeyi ile pürüzler arasındaki ilişki ortaya çıkmaktadır:

$$\frac{Ar}{A0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \lambda \quad (3.5)$$

Alt tabakadaki deformasyon elastik olarak varsayılır. Kontak bölgesinin geometrisi Şekil 3.19’da görülmektedir.



Şekil 3.19. Temas bölgesinin geometrisi

Temas bölgesindeki genel basınç dağılımından yola çıkarak basınç üssünün elde edilmesi mümkün olmaktadır:

$$\gamma = 1.5 \frac{P_0}{P_{0,H}} \left(\frac{a_L}{a_H} \right)^2 - 1 \quad (3.6)$$

Burda γ basınç üssü veya C_3 , $\frac{P_0}{P_{0,H}} = P'_0$ veya maksimum göreceli basınç değeri ve

$\frac{a_L}{a_H} = a'_L$ bu da göreceli kontak yarıçapı olarak tanımlanmaktadır.

Ayrıca:

$$P'_0 = \frac{1}{1+1.22\alpha\beta^{-0.16}} \quad (3.7)$$

$$\beta = \frac{E'}{H_{mic}} \sqrt{\frac{\rho}{\sigma}} \quad (3.8)$$

Burda H_{mic} sertlik ve α pürüzlülük parametresidir

$$\alpha = \frac{\sigma\rho}{\alpha_H^2} \quad (3.9)$$

ve

$$\alpha'_L = \begin{cases} 1.605/\sqrt{P'_0} & 0.01 \leq P'_0 \leq 0.47 \\ 3.51 - 2.51P'_0 & 0.47 \leq P'_0 \leq 1 \end{cases} \quad (3.10)$$

3.10 ve 3.7 denklemlerinin 3.6'da yerlerine yazılarak γ veya C_3 değeri hesaplanmaktadır.

Sınır şartlarının uygulanmasında ise deneylerde yapılan yüklemeye benzeyen bir sistemin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu çalışma hem deneysel ve hem sayısal yöntemler ile diş restoratif malzemelerinde ortaya çıkan aşınma incelemiştir. Daha sonra deneyler ve analizlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneysel kısımlarda aşınma izleri, aşınma kesit alanları, hacim kayıpları, aşınma sırasında ortaya çıkan sürtünme davranışları, yüzüy pürüzlülükleri ve sertlik ölçülmüştür.

4.1. Deneysel Bulgular ve Tartışma

4.1.1. Aşınma izi

Testten sonra aşınma izleri gözlemlenir ve düzenli ya da düzensiz aşınma izlerinin fotoğraflarıyla karşılaştırılır.

Bu çalışmada diş restoratif malzemelerinin oda sıcaklığında ve yapay tükürükle (silviya) linear (ASTM F 732 (reciprocating mode) ileri-geri) aşınma deneyi yapan reciprocating aşınma cihazı ile aşınma davranışı incelenmiştir.

Bu tez kapsamında Çizelge 3.1 verilen malzemeler için toplamda 25 numune hazırlanmıştır.

Aşınma izleri optik mikroskopla çekilmiş ve on kat büyütüldükten sonra Şekil 4.1 - 4.5'te verilmiştir.

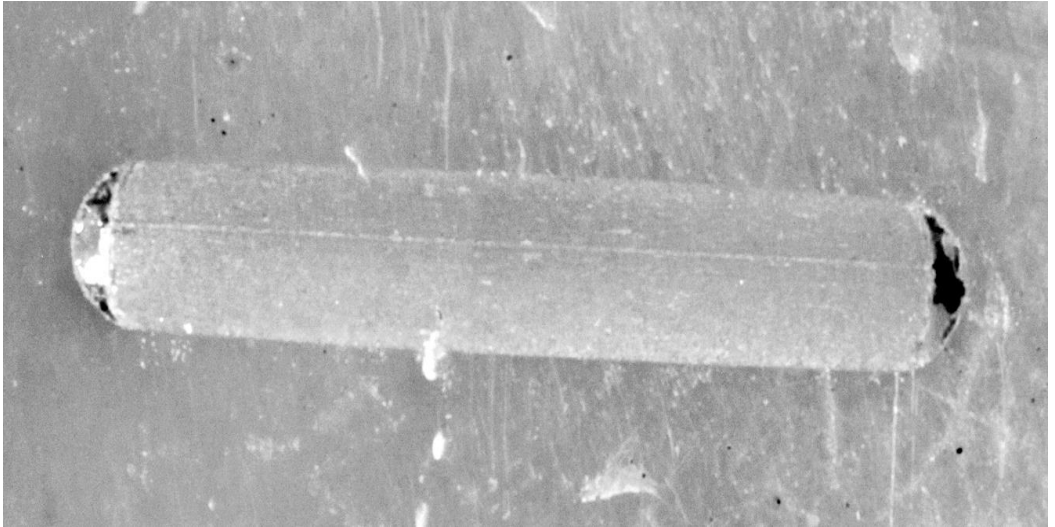
Şekil 4.1'te görüldüğü gibi nanohibritlerde aşınma izi düz bir yüzey oluşturmuş olup herhangi bir partikül görülmemektedir. Aşınma mekanizması abrezif aşınma olmalıdır. Aşınma mekanizmasına göre malzemenin Zirkonya aşındırıcı küresine göre daha az sertliği vardır.

Mikrohibrit numunelerde ise aşınma izinde bir çok dalgalanma ve iz vardır. Aşınma testi sırasında ortaya çıkan sıcaklık malzeme iç yapısını etkileyerek, yüzeyde ince bir tabaka oluşturmuştur (Şekil 4.2).

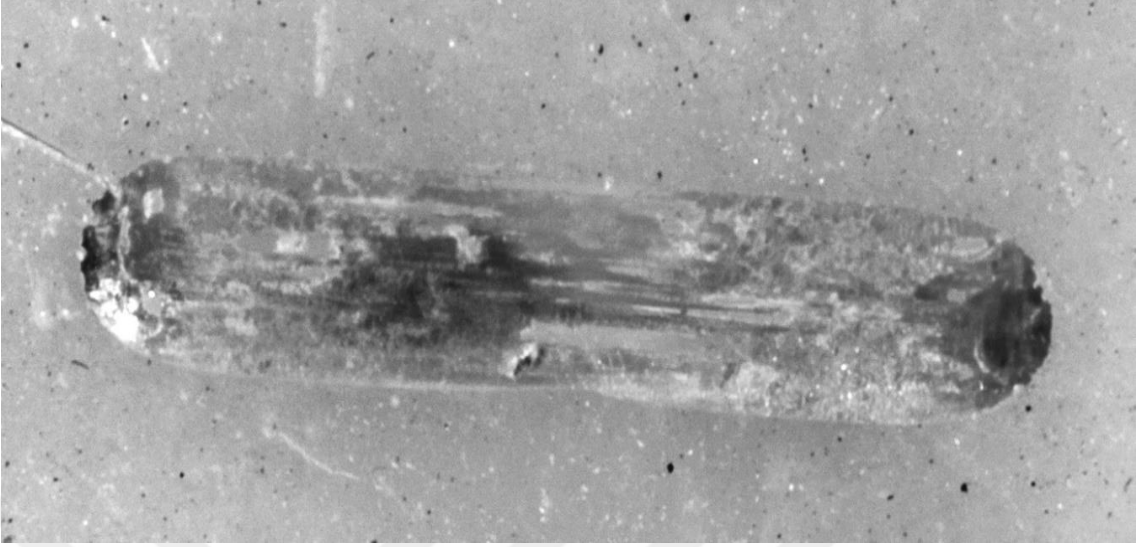
İndirek kompozitlerin aşınma izleri Şekil 4.3'te olduğu gibi ince ve dar görüntü vermektedir. Aşınma izinde siyah tanecikler görülmektedir. Bu tanecikler aşınma mekanizmasının üçlü abraziv aşınma olabileceğinin göstergesi olabilir. Malzemeden ayrılan partiküller zirkonya aşındırıcısının basıncı altında bu siyah noktaların ortaya çıkma nedeni olabilir.

Şekil 4.4 Rezin nano seramiklerin aşınma izini göstermektedir. Aşınma izi bu malzemenin diğerlerine göre aşınma bölgesinin genişlediğini göstermektedir. Burada farklı renkler ve farklı izler görülmektedir. Malzeme parçaları kopmuş ve tekrar basınç etkisi altında aşınma sistemine dahil olmuş. Adeziv aşınma mekanizması bu numune için daha yaygındır.

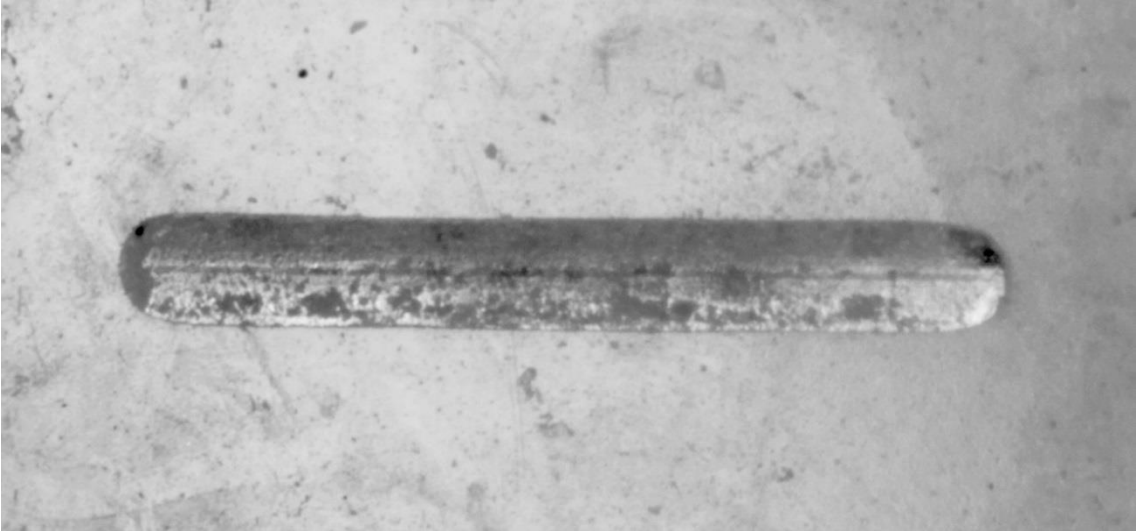
Şekil 4.5 ise Feldepatiklerdeki aşınma izini göstermektedir. Bu şekilde beyaz noktalar görülmektedir, bunlar şeffaf partiküller adeziv mekanizma vasıtası ile ortaya çıkmıştır. Aşınma izine göre bu malzemeninde hacim kaybının yüksek olduğunun göstergesidir.



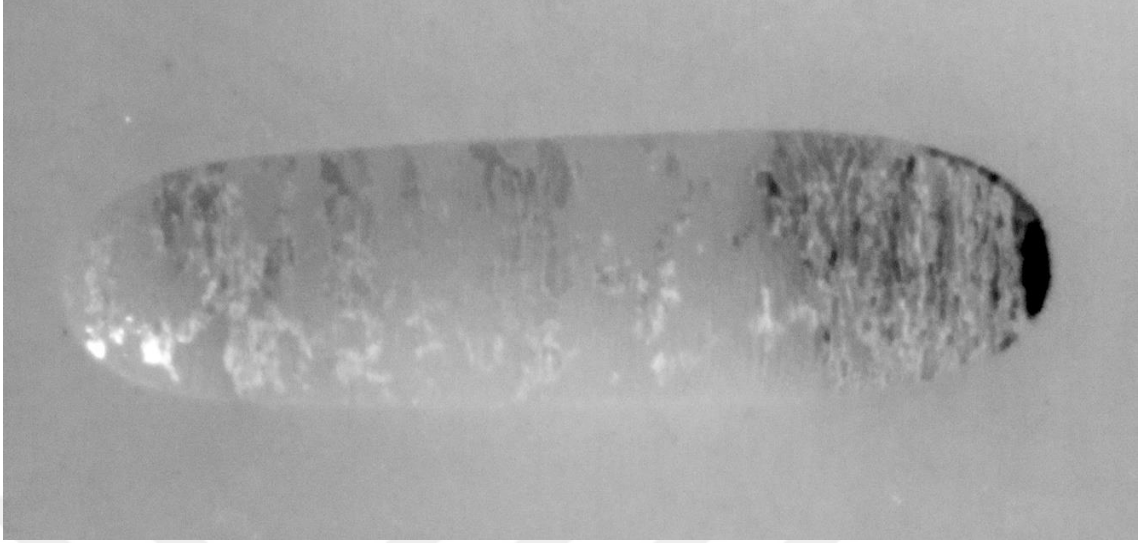
Şekil 4.1. Aşınma izi – Nanohibrit x10



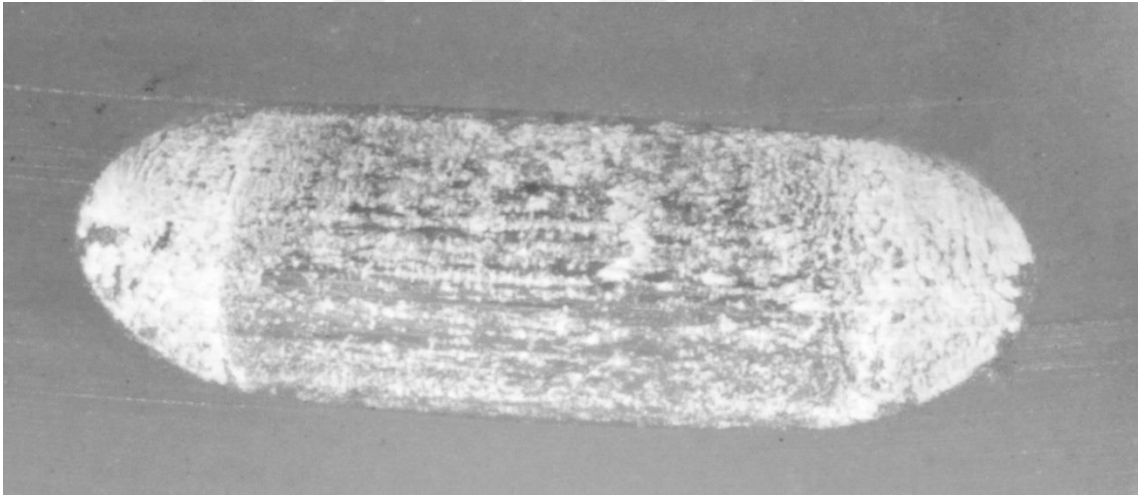
Şekil 4.2. Aşınma izi – Microhibrit x10



Şekil 4.3. Aşınma izi – İndirek kompozitx10



Şekil 4.4. Aşınma izi – Rezin nano seramik x10



Şekil 4.5. Aşınma izi - Feldspatik x10

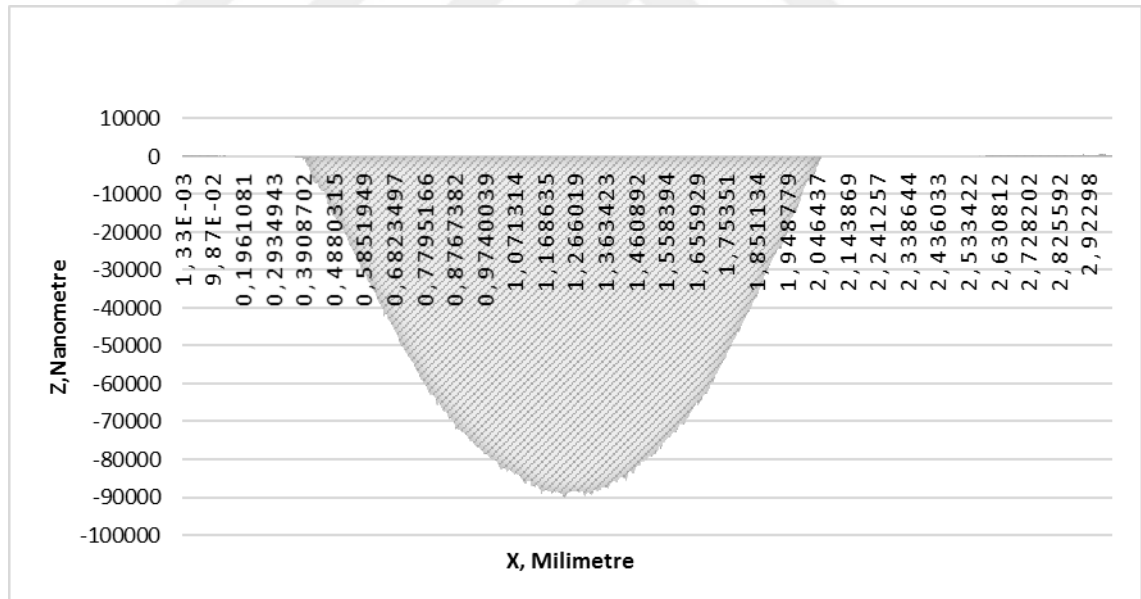
Deneydeki aşınma kesit alanları Şekil 4.6-4.10’da verilmiştir. Roddenstock RM 600 laser cihazında mikroskop altında yüzey pürüzlüklerine küçük açılarla gönderilen X ışınları ile pürüzlük değerleri elde edilip aşınma kesit alanı ölçüldü. Aşınma sırasındaki hacim kaybı kesit alanlarından hesaplandı. Bu çalışma İzmir Dokuz Eylül üniversitesinde yapılmıştır.

Nanohibritlerin aşınma kesit alanları Şekil 4.6’da verilmiştir. Bu numunede ulaşılan en yüksek aşınma derinliği 0.092 mm olarak hesaplanmıştır.

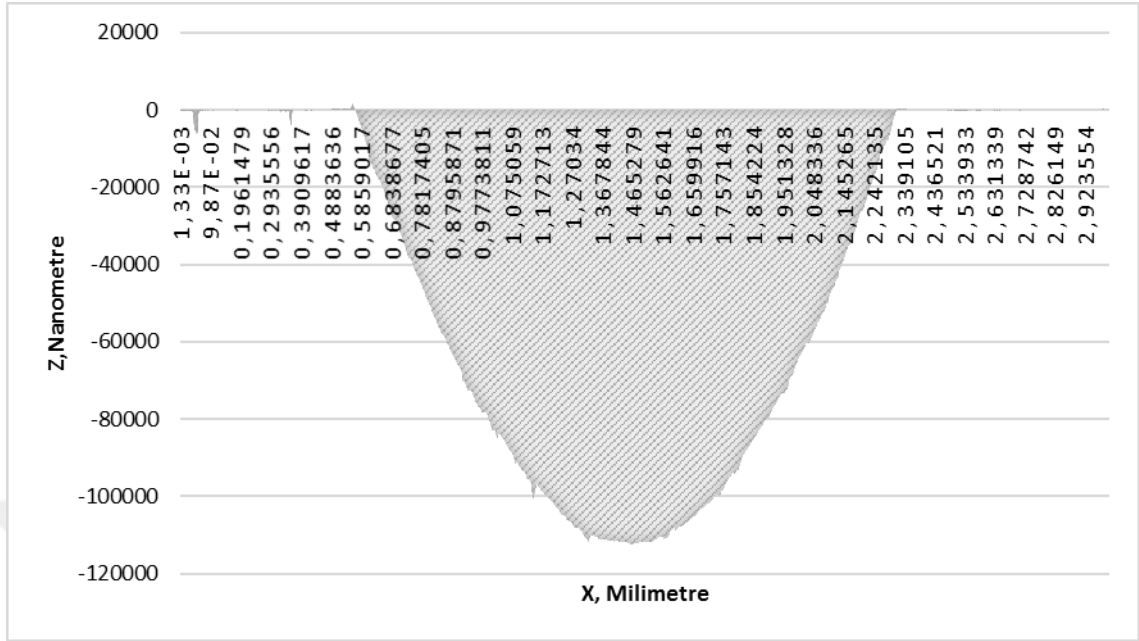
Şekil 4.7’de Mikrohibritlerin aşınma kesit alanı verilmiştir, 0.11 mm ulaşılan en yüksek aşınma değeridir.

Şekil 4.8 İndirek kompozitlerin aşınma kesit alanlarını göstermektedir. İndirek kompozitler diğer malzemelere göre daha az aşınma derinliğine (~0.043mm) sahiptir.

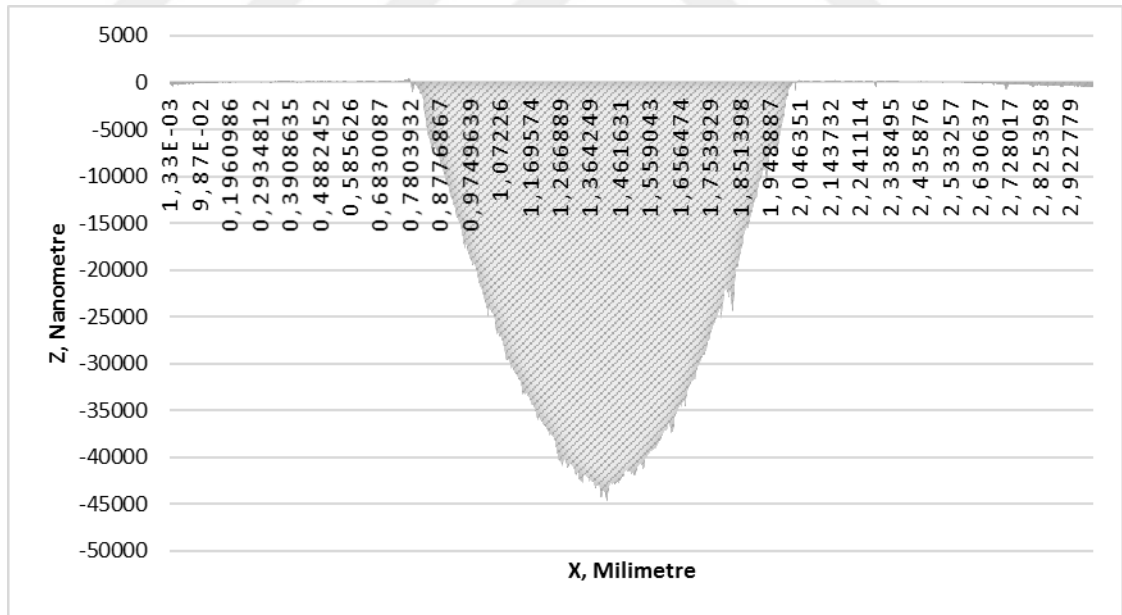
Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da sırasıyla Rezin nanoseramikler ve Felespatiklerin aşınma kesit alanları verilmiştir ve bu malzemelerde sırasıyla 0.22 mm ve 0.24 mm aşınma derinliğini elde etmiştir.



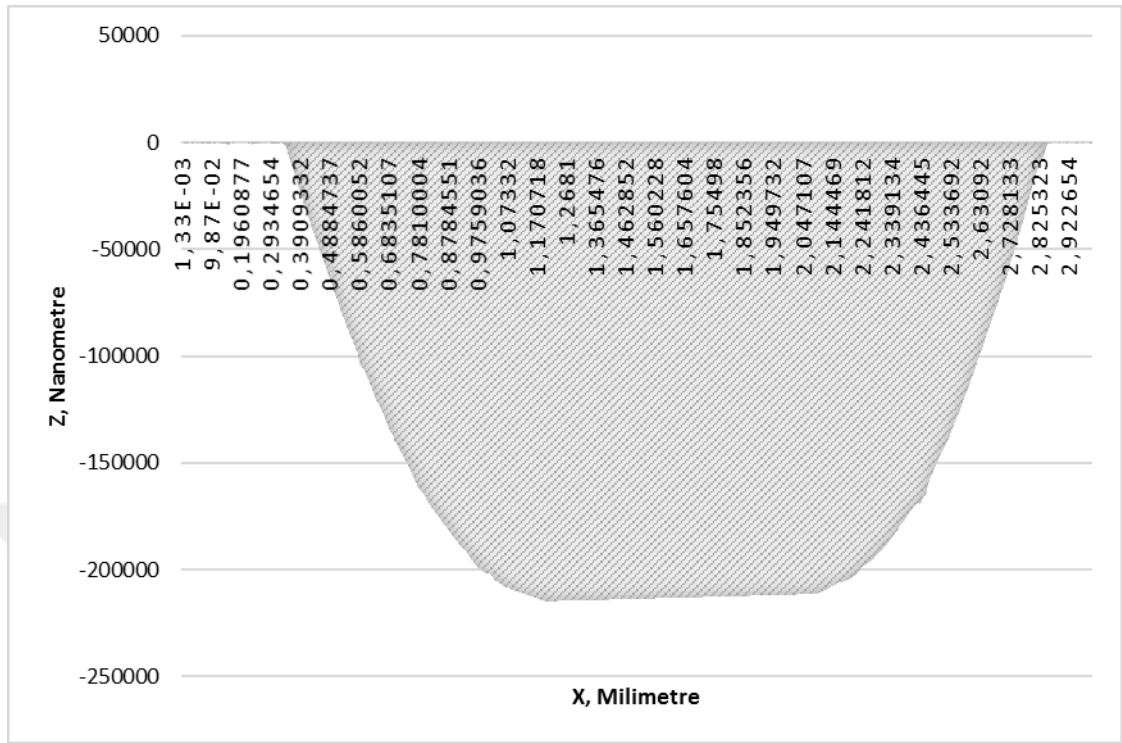
Şekil 4.6. Aşınma kesit alanı - Nano Hibrit



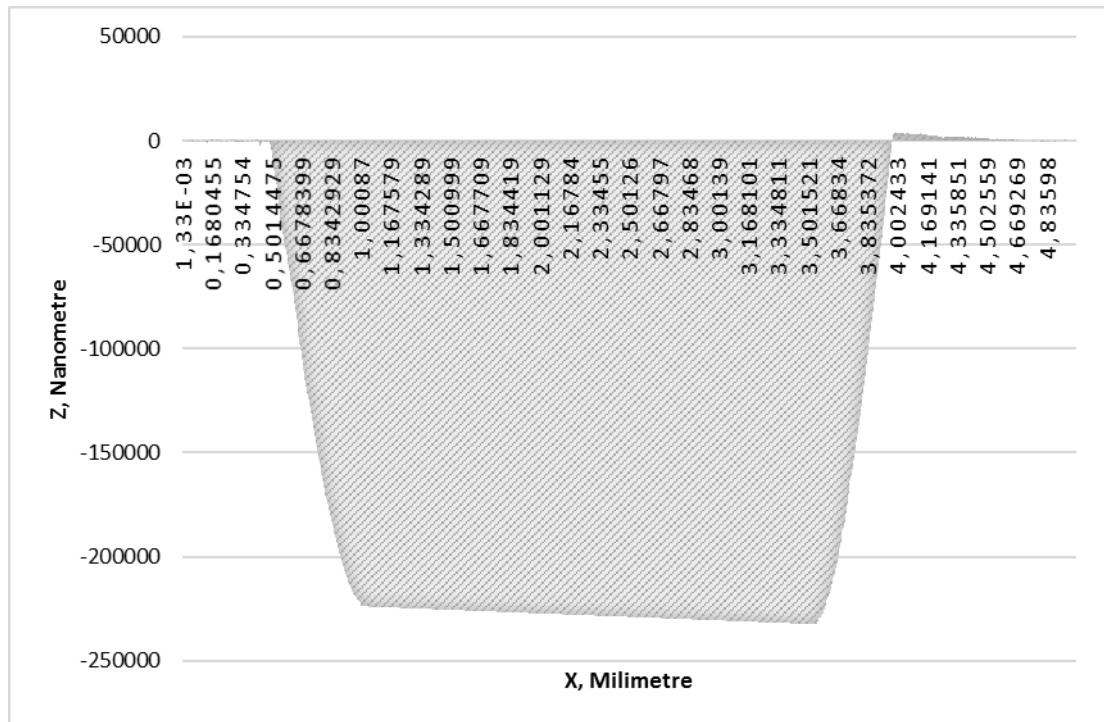
Şekil 4.7. Aşınma kesit alanı - Mikro Hibrit



Şekil 4.8. Aşınma kesit alanı - Indirek Kompozit

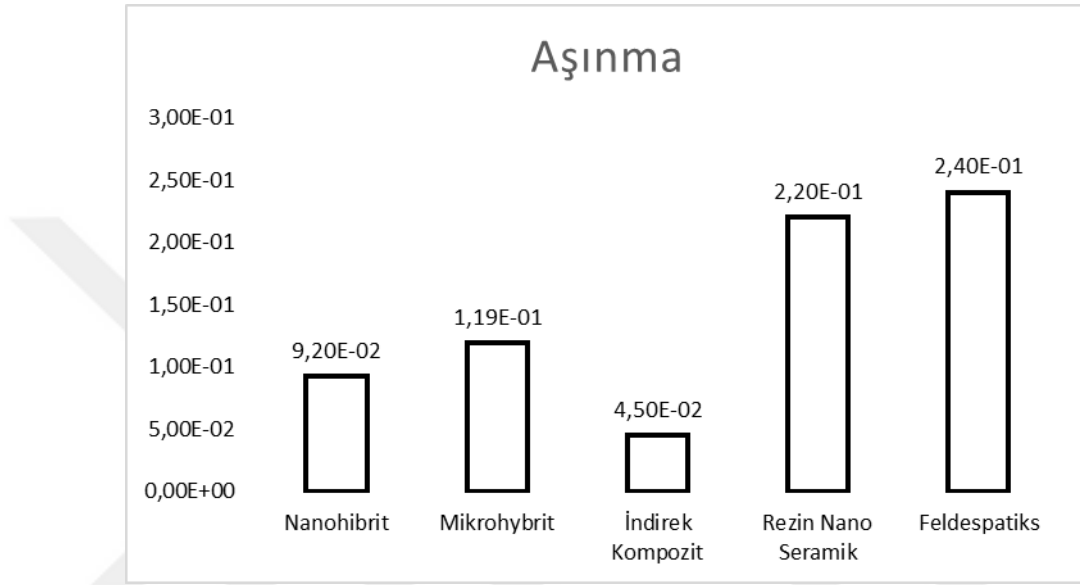


Şekil 4.9. Aşınma kesit alanı - Rezin Nano Seramik



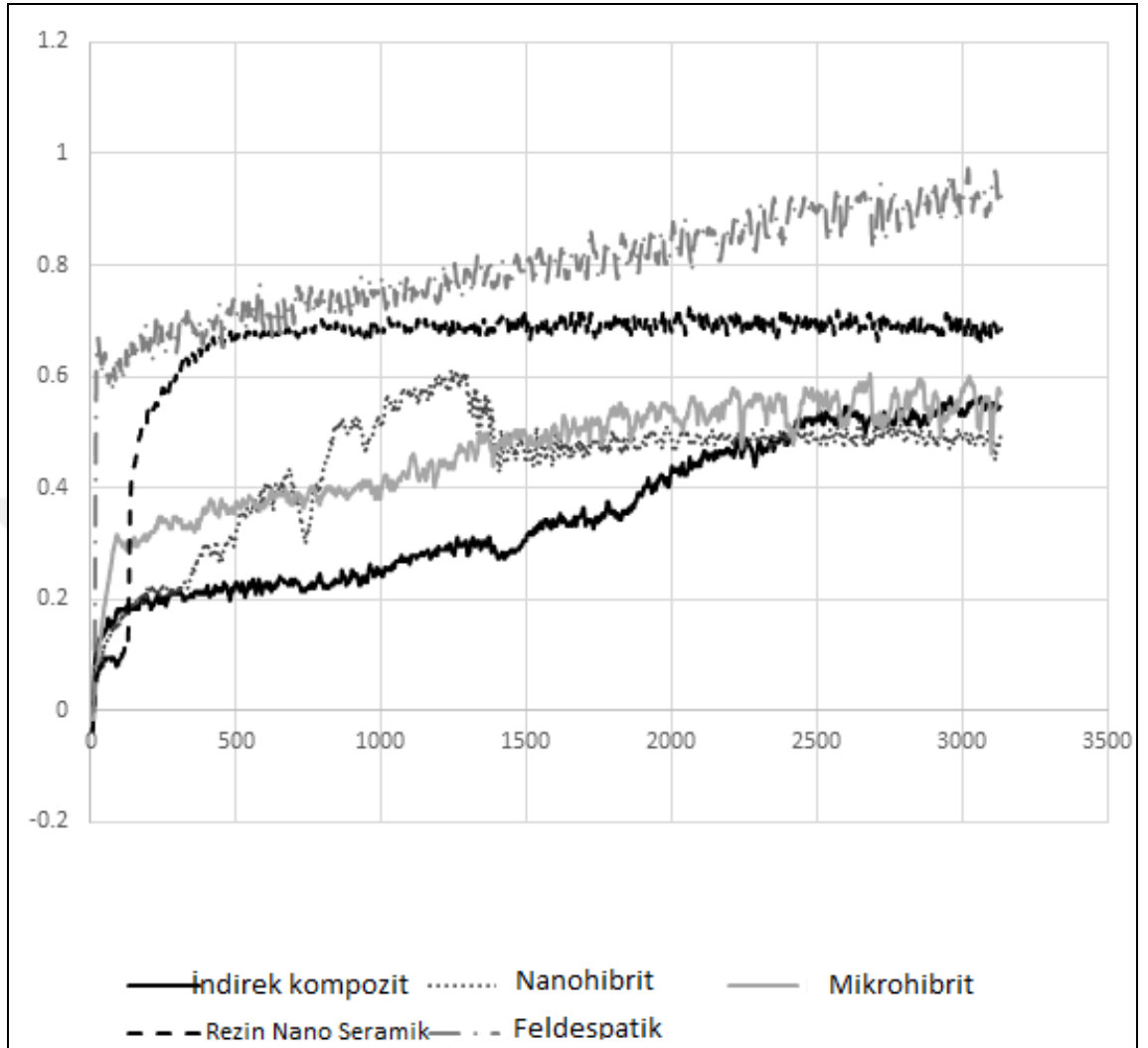
Şekil 4.10. Aşınma kesit alanı - Feldespatik

Kesit alanlarından elde edilen derinlikler ve dolayısıyla numunelerde hesaplanan aşınmalar Şekil 4.11’de verilmiştir. En çok aşınma oranı Feldespatik numunelere aittir, bu numuneler en az aşınma direncine sahiptirler. İndirek kompozitler ise en çok aşınma dayanıklılığına sahiptirler.



Şekil 4.11. Numunelerin deneysel aşınma oranları (mm)

Zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi Şekil 4.12’de verilmiştir. Sürtünme katsayılarının sıralaması Şekil 4.13’te verilmiştir. En büyük sürtünme katsayısı Feldespatik numunelerine aitken en küçük sürtünme katsayısı indirek kompozitlere aittir. Feldespatik numunelerde olan adeziv aşınma sürtünme katsayısının yüksek olmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.12. Deney boyunca sürtünme katsayısının değişimi



Şekil 4.13. Sürtünme katsayısı

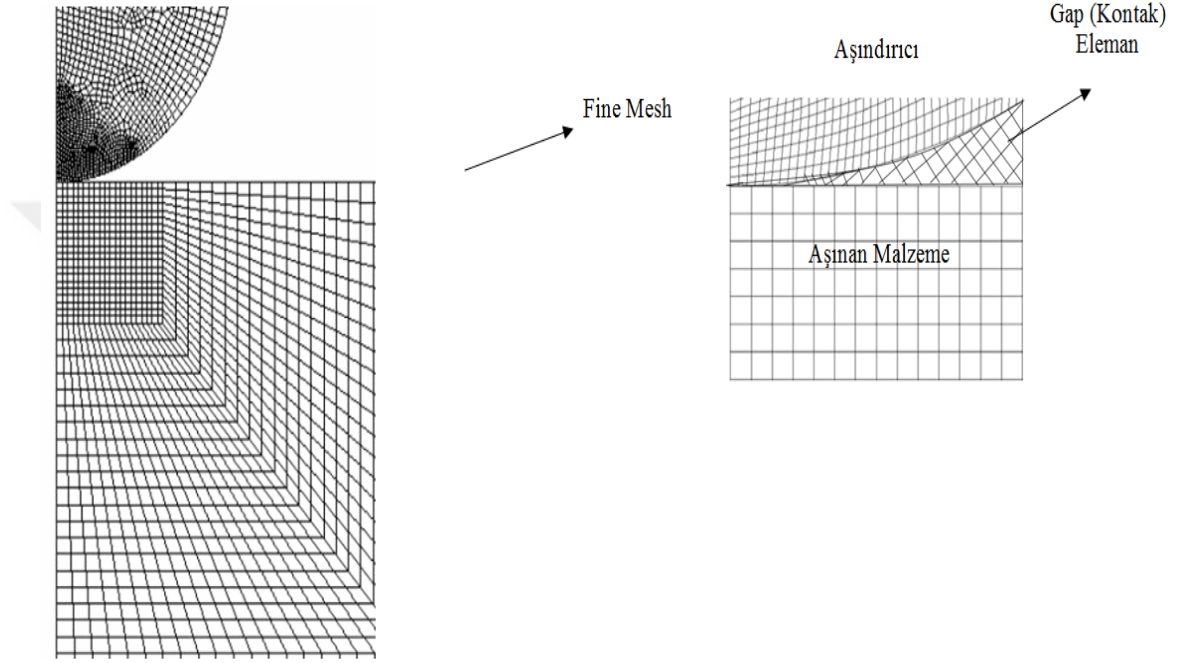
Elastisite modülü ve hacim kaybı arasında anlamlı bir ilişki mevcuttur. Yüksek elastisite modülüne sahip olan numuneler daha az hacim kaybı ve daha çok aşınma dayanıklılığına sahiptirler. Elastisite modülü ve aşınma arasında olan bu ilişki birçok çalışmada vurgulanmıştır.

Test sonuçlarına göre kompozit malzemeler, seramiklere göre daha az hacim kaybı ve dolayısıyla daha az aşınmaya uğrar. Yüksek sürtünme gerinmesine sahip olan malzemeler yorulmaya karşı daha dayanıklıdırlar. Aşınma sırasında malzemedan ayrılan parçacıklar üçlü adeziv aşınmaya yol açarak aşınma hızını yükseltmektedir.

4.2. Sayısal Bulgular ve Tartışma

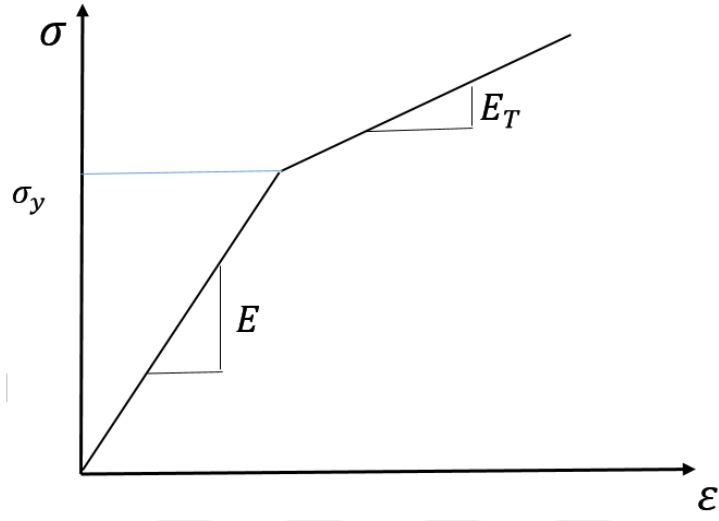
Bu çalışmada ANSYS paket programı ile gel-git aşınma sisteminin detaylarını içeren üç boyutlu model hazırlanmıştır. Bu tez kapsamında deneyde kullanılan her 5 malzeme için deney şartlarına uygun toplamda 5 farklı malzemedan modeller hazırlanmıştır.

Model boyutları deneyde kullanılan numune boyutları ile aynı alınmıştır. Model 4251 eleman ve 4770 düğümden oluşmuştur. Elemanların 3000 tanesi aşınan malzemede olup geri kalanı aşındırıcıya aittir. Kontak bölgesinin hassasiyetinden dolayı fine mesh uygulanmıştır (Şekil 4.14).



Şekil 4.14. Fine mesh uygulaması

Sonlu elemanlar analizlerinde ilk olarak malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Malzemelerin doğrusal olmayan özellikleri de bilineer (çift doğrusal) (bilinear isotropic hardening – akma yükü ve tanjant veya plastisite modülü) olarak tanımlanmış ve tüm malzeme özellikleri elasto – plastik ve izotropik olarak kabul edilmiştir. ANSYS’de tanımlanan elasto plastik malzeme modeli Şekil 4.15’de verilmiştir.



Şekil 4.15. ANSYS programında tanımlanan elasto-plastik malzeme modeli

Burda:

σ_y : Akma dayanımı

E : Elastisite modülü

E_T : Tanjant(plastisite) modülü olarak tanımlanmaktadır.

Numuneler için tanımlanan 5 malzeme için mikrosertlik deneyinden elde edilen sertlik değeri, yüzey kalitesi ölçme deneyinden yüzey pürüzlülüğü, üretim literatürlerinden elastisite modulu, poisson oranı ve diğer malzeme özellikleri ve sayısal yöntemlerden C_1 – C_4 katsayıları hesaplanmıştır. Numuneler tez kapsamındaki deney şartları altında ve gel – git (resiprocating) aşınma sistemine uygun analiz edilmiştir. Bu çalışmada analizler önce deney şartlarında daha sonra farklı yük ve üst malzeme şartlarında yapılmıştır. Bu tez kapsamında toplam 105 beş model oluşturulmuş olup. Modellerin açıklaması ve kodlaması Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Tez kapsamında kullanılan malzeme kodları

Modeller					
1.Sıra	Alt Malzeme	2.Sıra	Üst Malzeme	3.Sıra	Yük
1	İndirek Kompozit	1	Zirkonya	1	25N
		2	Diş		
2	NanoHibrit	3	İndirek Kompozit	2	50N
3	MikroHibrit	4	NanoHibrit		
		5	MikroHibrit		
4	Feldespatik	6	Feldspatik	3	75N
5	Rezin Nano Seramik	7	Rezin Nano Seramik		

Örnek: Model -1.2.3; İlk sayı : Alt(Taban) malzeme kodu

İkinci sayı: Üst malzeme kodu

İlk sayı : Uygulanan yük kodu

Çizelge 4.2. Tez kapsamında kullanılan modellerin kodlaması

Modeller				
Model-1.1.1	Model-2.1.1	Model-3.1.1	Model-4.1.1	Model-5.1.1
Model-1.1.2	Model-2.1.2	Model-3.1.2	Model-4.1.2	Model-5.1.2
Model-1.1.3	Model-2.1.3	Model-3.1.3	Model-4.1.3	Model-5.1.3
Model-1.2.1	Model-2.2.1	Model-3.2.1	Model-4.2.1	Model-5.2.1
Model-1.2.2	Model-2.2.2	Model-3.2.2	Model-4.2.2	Model-5.2.2
Model-1.2.3	Model-2.2.3	Model-3.2.3	Model-4.2.3	Model-5.2.3
Model-1.3.1	Model-2.3.1	Model-3.3.1	Model-4.3.1	Model-5.3.1
Model-1.3.2	Model-2.3.2	Model-3.3.2	Model-4.3.2	Model-5.3.2
Model-1.3.3	Model-2.3.3	Model-3.3.3	Model-4.3.3	Model-5.3.3
Model-1.4.1	Model-2.4.1	Model-3.4.1	Model-4.4.1	Model-5.4.1
Model-1.4.2	Model-2.4.2	Model-3.4.2	Model-4.4.2	Model-5.4.2
Model-1.4.3	Model-2.4.3	Model-3.4.3	Model-4.4.3	Model-5.4.3
Model-1.5.1	Model-2.5.1	Model-3.5.1	Model-4.5.1	Model-5.5.1
Model-1.5.2	Model-2.5.2	Model-3.5.2	Model-4.5.2	Model-5.5.2
Model-1.5.3	Model-2.5.3	Model-3.5.3	Model-4.5.3	Model-5.5.3
Model-1.6.1	Model-2.6.1	Model-3.6.1	Model-4.6.1	Model-5.6.1
Model-1.6.2	Model-2.6.2	Model-3.6.2	Model-4.6.2	Model-5.6.2
Model-1.6.3	Model-2.6.3	Model-3.6.3	Model-4.6.3	Model-5.6.3
Model-1.7.1	Model-2.7.1	Model-3.7.1	Model-4.7.1	Model-5.7.1
Model-1.7.2	Model-2.7.2	Model-3.7.2	Model-4.7.2	Model-5.7.2
Model-1.7.3	Model-2.7.3	Model-3.7.3	Model-4.7.3	Model-5.7.3

Sırasıyla bu çalışmadaki kombinasyonlar:

- 1) Model-1.1.1: alt malzeme indirek kompozit, üst malzeme zirkonya ve yük 25N.
- 2) Model-1.1.2: alt malzeme indirek kompozit, üst malzeme zirkonya ve yük 50N.
- 3) Model-1.1.3: alt malzeme indirek kompozit, üst malzeme zirkonya ve yük 75N.
- 4) Model-1.2.1: alt malzeme indirek kompozit, üst malzeme diş(dentin) ve yük 25N,
- 5) Model-1.2.2: alt malzeme indirek kompozit, üst malzeme diş(dentin) ve yük 50N.
- 6) Model-1.2.3: alt malzeme indirek kompozit, üst malzeme diş(dentin) ve yük 75N.
- 7) Model-1.3.1: alt malzeme indirek kompozit, üst malzeme İndirek kompozit ve yük 25N.
- 8) Model-1.3.2: alt malzeme indirek kompozit, üst malzeme İndirek kompozit ve yük 50N.
- 9) Model-1.3.3: alt malzeme indirek kompozit, üst malzeme İndirek kompozit ve yük 75N.
- 10) Model-1.4.1: alt malzeme indirek kompozit, üst malzeme nanohibrit ve yük 25N.
- 11) Model-1.4.2: alt malzeme indirek kompozit, üst malzeme nanohibrit ve yük 50N.
- 12) Model-1.4.3: alt malzeme indirek kompozit, üst malzeme nanohibrit ve yük 75N.
- 13) Model-1.5.1: alt malzeme indirek kompozit, üst malzeme mikrohibrit ve yük 25N.
- 14) Model-1.5.2: alt malzeme indirek kompozit, üst malzeme mikrohibrit ve yük 50N, Model-1.5.2.
- 15) Model-1.5.3: alt malzeme indirek kompozit, üst malzeme mikrohibrit ve yük 75N.
- 16) Model-1.6.1: alt malzeme indirek kompozit, üst malzeme Feldspatik ve yük 25N.
- 17) Model-1.6.2: alt malzeme indirek kompozit, üst malzeme Feldspatik ve yük 50N.
- 18) Model-1.6.3: alt malzeme indirek kompozit, üst malzeme Feldspatik ve yük 75N.
- 19) Model-1.7.1: alt malzeme indirek kompozit, üst malzeme rezin nano seramik ve yük 25N.
- 20) Model-1.7.2: alt malzeme indirek kompozit, üst malzeme rezin nano seramik ve yük 50N.
- 21) Model-1.7.3: alt malzeme indirek kompozit, üst malzeme rezin nano seramik ve yük 75N.
- 22) Model-2.1.1: alt malzeme nanohibrit, üst malzeme zirkonya ve yük 25N.

- 23) Model-2.1.2: alt malzeme nanohibrit, üst malzeme zirkonya ve yük 50N.
- 24) Model-2.1.3: alt malzeme nanohibrit, üst malzeme zirkonya ve yük 75N.
- 25) Model-2.2.1: alt malzeme nanohibrit, üst malzeme diş(dentin) ve yük 25N.
- 26) Model-2.2.2: alt malzeme nanohibrit, üst malzeme diş(dentin) ve yük 50N.
- 27) Model-2.2.3: alt malzeme nanohibrit, üst malzeme diş(dentin) ve yük 75N.
- 28) Model-2.3.1: alt malzeme nanohibrit, üst malzeme indirek kompozit ve yük 25N.
- 29) Model-2.3.2: alt malzeme nanohibrit, üst malzeme indirek kompozit ve yük 50N.
- 30) Model-2.3.3: alt malzeme nanohibrit, üst malzeme indirek kompozit ve yük 75N.
- 31) Model-2.4.1: alt malzeme nanohibrit, üst malzeme nanohibrit ve yük 25N.
- 32) Model-2.4.2: alt malzeme nanohibrit, üst malzeme nanohibrit ve yük 50N.
- 33) Model-2.4.3: alt malzeme nanohibrit, üst malzeme nanohibrit ve yük 75N.
- 34) Model-2.5.1: alt malzeme nanohibrit, üst malzeme mikrohibrit ve yük 25N.
- 35) Model-2.5.2: alt malzeme nanohibrit, üst malzeme mikrohibrit ve yük 50N.
- 36) Model-2.5.3: alt malzeme nanohibrit, üst malzeme mikrohibrit ve yük 75N.
- 37) Model-2.6.1: alt malzeme nanohibrit, üst malzeme feldspatik ve yük 25N.
- 38) Model-2.6.2: alt malzeme nanohibrit, üst malzeme feldspatik ve yük 50N.
- 39) Model-2.6.3: alt malzeme nanohibrit, üst malzeme feldspatik ve yük 75N.
- 40) Model-2.7.1: alt malzeme nanohibrit, üst malzeme rezin nano sreamik ve yük 25N.
- 41) Model-2.7.2: alt malzeme nanohibrit, üst malzeme rezin nano sreamik ve yük 50N.
- 42) Model-2.7.3: alt malzeme nanohibrit, üst malzeme rezin nano sreamik ve yük 75N.
- 43) Model-3.1.1: alt malzeme mikrohibrit, üst malzeme zirkonya ve yük 25N.
- 44) Model-3.1.2: alt malzeme mikrohibrit, üst malzeme zirkonya ve yük 50N.
- 45) Model-3.1.3: alt malzeme mikrohibrit, üst malzeme zirkonya ve yük 75N,
- 46) Model-3.2.1: alt malzeme mikrohibrit, üst malzeme diş(dentin) ve yük 25N.
- 47) Model-3.2.2: alt malzeme mikrohibrit, üst malzeme diş(dentin) ve yük 50N.
- 48) Model-3.2.3: alt malzeme mikrohibrit, üst malzeme diş(dentin) ve yük 75N.
- 49) Model-3.3.1: alt malzeme mikrohibrit, üst malzeme indirek kompozit ve yük 25N.
- 50) Model-3.3.2: alt malzeme mikrohibrit, üst malzeme indirek kompozit ve yük 50N.
- 51) Model-3.3.3: alt malzeme mikrohibrit, üst malzeme indirek kompozit ve yük 75N.
- 52) Model-3.4.1: alt malzeme mikrohibrit, üst malzeme nanohinrit ve yük 25N.
- 53) Model-3.4.2: alt malzeme mikrohibrit, üst malzeme nanohinrit ve yük 50N.

- 54) Model-3.4.3: alt malzeme mikrohibrit, üst malzeme nanohinrit ve yük 75N.
- 55) Model-3.5.1: alt malzeme mikrohibrit, üst malzeme mikohibrit ve yük 25N.
- 56) Model-3.5.2: alt malzeme mikrohibrit, üst malzeme mikrohibrit ve yük 50N.
- 57) Model-3.5.3: alt malzeme mikrohibrit, üst malzeme mikrohibrit ve yük 75N.
- 58) Model-3.6.1: alt malzeme mikrohibrit, üst malzeme feldspatik ve yük 25N.
- 59) Model-3.6.2: alt malzeme mikrohibrit, üst malzeme feldspatik ve yük 50N.
- 60) Model-3.6.3: alt malzeme mikrohibrit, üst malzeme feldspatik ve yük 75N.
- 61) Model-3.7.1: alt malzeme mikrohibrit, üst malzeme rezin nano seramik ve yük 25N.
- 62) Model-3.7.2: alt malzeme mikrohibrit, üst malzeme rezin nano seramik ve yük 50N.
- 63) Model-3.7.3: alt malzeme mikrohibrit, üst malzeme rezin nano seramik ve yük 75N.
- 64) Model-4.1.1: alt malzeme feldespatikt, üst malzeme zirkonya ve yük 25N.
- 65) Model-4.1.2: alt malzeme feldespatikt, üst malzeme zirkonya ve yük 50N.
- 66) Model-4.1.3: alt malzeme feldespatikt, üst malzeme zirkonya ve yük 75N.
- 67) Model-4.2.1: alt malzeme feldespatikt, üst malzeme diş(dentin) ve yük 25N.
- 68) Model-4.2.2: alt malzeme feldespatikt, üst malzeme diş(dentin) ve yük 50N.
- 69) Model-4.2.3: alt malzeme feldespatikt, üst malzeme diş(dentin) ve yük 75N.
- 70) Model-4.3.1: alt malzeme feldespatikt, üst malzeme indirek kompozit ve yük 25N.
- 71) Model-4.3.2: alt malzeme feldespatikt, üst malzeme indirek kompozit ve yük 50N.
- 72) Model-4.3.3: alt malzeme feldespatikt, üst malzeme indirek kompozit ve yük 75N.
- 73) Model-4.4.1: alt malzeme feldespatikt, üst malzeme nanohibrit ve yük 25N.
- 74) Model-4.4.2: alt malzeme feldespatikt, üst malzeme nanohibrit ve yük 50N.
- 75) Model-4.4.3: alt malzeme feldespatikt, üst malzeme nanohibrit ve yük 75N.
- 76) Model-4.5.1: alt malzeme feldespatikt, üst malzeme mikrohibrit ve yük 25N.
- 77) Model-4.5.2: alt malzeme feldespatikt, üst malzeme mikrohibrit ve yük 50N.
- 78) Model-4.5.3: alt malzeme feldespatikt, üst malzeme mikrohibrit ve yük 75N.
- 79) Model-4.6.1: alt malzeme feldespatikt, üst malzeme feldspatik ve yük 25N.
- 80) Model-4.6.2: alt malzeme feldespatikt, üst malzeme feldspatik ve yük 50N.
- 81) Model-4.6.3: alt malzeme feldespatikt, üst malzeme feldspatik ve yük 75N.

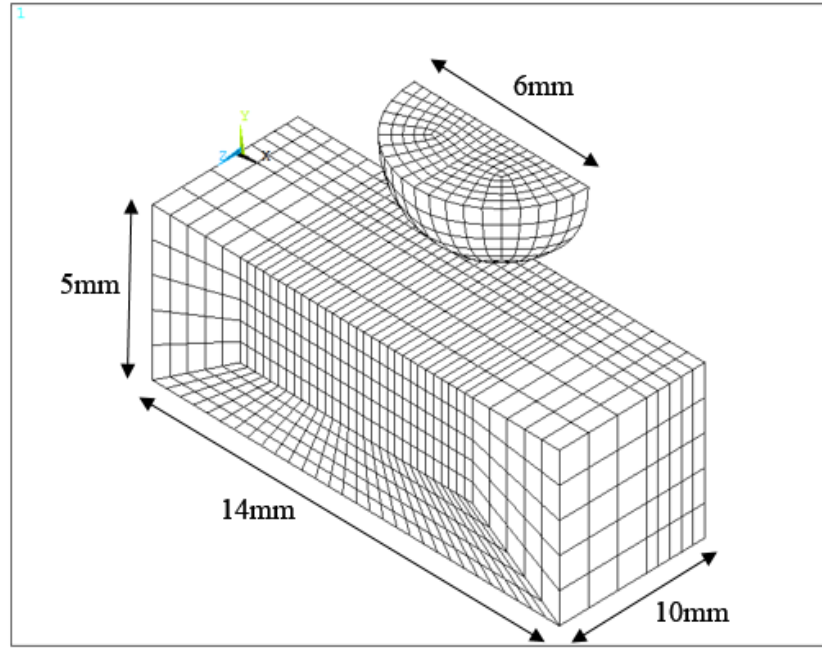
- 82) Model-4.7.1: alt malzeme feldespatikt, üst malzeme rezin nano seramik ve yük 25N.
- 83) Model-4.7.2: alt malzeme feldespatikt, üst malzeme rezin nano seramik ve yük 50N.
- 84) Model-4.7.3: alt malzeme feldespatikt, üst malzeme rezin nano seramik ve yük 75N.
- 85) Model-5.1.1: alt malzeme rezin nano seramik, üst malzeme zirkonya ve yük 25N.
- 86) Model-5.1.2: alt malzeme rezin nano seramik, üst malzeme zirkonya ve yük 50N.
- 87) Model-5.1.3: alt malzeme rezin nano seramik, üst malzeme zirkonya ve yük 75N.
- 88) Model-5.2.1: alt malzeme rezin nano seramik, üst malzeme diş(dentin) ve yük 25N.
- 89) Model-5.2.2: alt malzeme rezin nano seramik, üst malzeme diş(dentin) ve yük 50N.
- 90) Model-5.2.3: alt malzeme rezin nano seramik, üst malzeme diş(dentin) ve yük 75N.
- 91) Model-5.3.1: alt malzeme rezin nano seramik, üst malzeme indirek kompozit ve yük 25N.
- 92) Model-5.3.2: alt malzeme rezin nano seramik, üst malzeme indirek kompozit ve yük 50N.
- 93) Model-5.3.3: alt malzeme rezin nano seramik, üst malzeme indirek kompozit ve yük 75N.
- 94) Model-5.4.1: alt malzeme rezin nano seramik, üst malzeme nanohibrit ve yük 25N.
- 95) Model-5.4.2: alt malzeme rezin nano seramik, üst malzeme nanohibrit ve yük 50N.
- 96) Model-5.4.3: alt malzeme rezin nano seramik, üst malzeme nanohibrit ve yük 75N.
- 97) Model-5.5.1: alt malzeme rezin nano seramik, üst malzeme mikrohibrit ve yük 25N.
- 98) Model-5.5.2: alt malzeme rezin nano seramik, üst malzeme mikrohibrit ve yük 50N.
- 99) Model-5.5.3: alt malzeme rezin nano seramik, üst malzeme mikrohibrit ve yük 75N.
- 100) Model-5.6.1: alt malzeme rezin nano seramik, üst malzeme feldspatik ve yük 25N.
- 101) Model-5.6.2: alt malzeme rezin nano seramik, üst malzeme feldspatik ve yük 50N.

- 102) Model-5.6.3: alt malzeme rezin nano seramik, üst malzeme feldspatik ve yük 75N,
- 103) Model-5.7.1: alt malzeme rezin nano seramik, üst malzeme rezin nano seramik ve yük 25N.
- 104) Model-5.7.2: alt malzeme rezin nano seramik, üst malzeme rezin nano seramik ve yük 50N.
- 105) Model-5.7.3. alt malzeme rezin nano seramik, üst malzeme rezin nano seramik ve yük 75N.

Olarak planlanmıştır.

Şekil 4.16’da simetrik modelin perspektif görünüşü verilmiştir. Aşınan malzeme ve aşındırıcının boyutları verilmiştir. Yarım modelde aşınan malzeme 14×10x5 mm boyutlarında ve aşındırıcının çapı 6 mm dir.

Deneylerde toplam kayma mesafesi 100 m alınmıştır, aşınma izi 8 mm olduğu için her git - gelde 16 mm mesafe kat edilmektedir. Buna göre SEY’de 100 metreye denk gelen 780 çevrim toplam kayma mesafesi olarak ele alınmıştır. Analizlerde 65 çevrim tanımlandı ve her bir çevrim için 100 aşınma git-gel’i ve toplam 6500 çevrim tanımlanmıştır. Bu da deneylerdeki 100 metrelik aşınmanın mesafesi ile yaklaşık aynı değerde olmasını vurgulamaktadır ($100000 \text{ mm}/16 \text{ mm}=6250$).

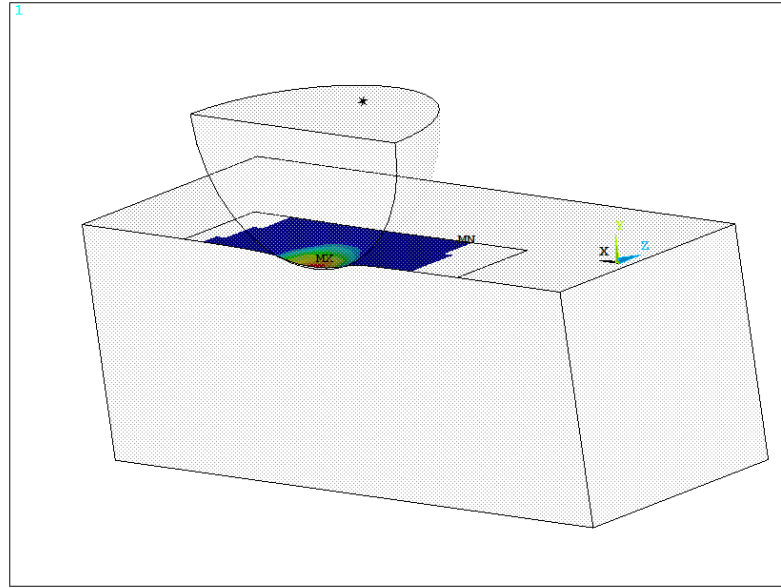


Şekil 4.16. Kullanılan modelin boyutları

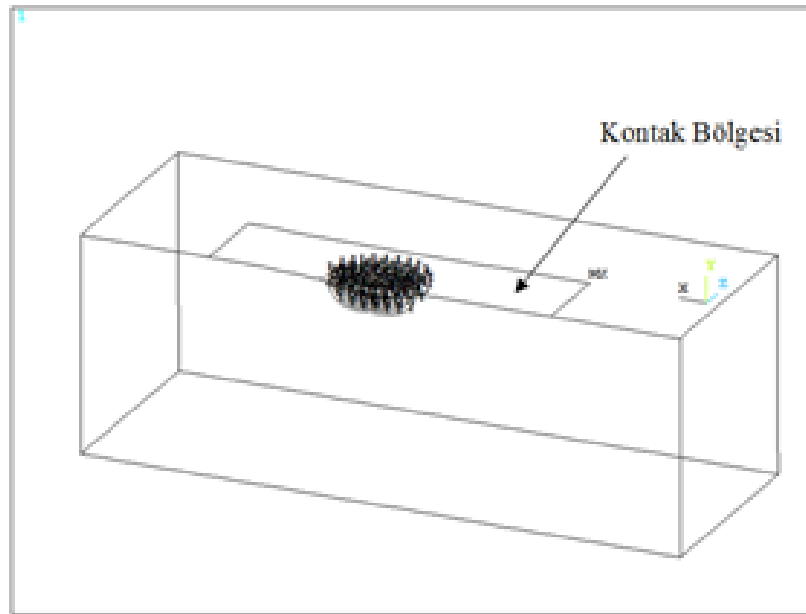
4.3. Sayısal Hesaplamalar

Bu bölümde önce deneysel çalışmaları yapılmış olan modellerin sayısal çalışmaları yapılarak karşılaştırma ve modellerin kabul edilebilirliği gösterilmiştir. Bu modeller Çizelge 4.2’de verilen Model-1.1.2, Model-2.1.2, Model-3.1.2, Model-4.1.2 ve Model-5.1.2’ den ibarettir. Daha sonraki çalışmalarda aşınan malzeme, aşındırıcı malzem ve yük değiştirilerek farklı kombinasyonlar ile farklı analizler yapılmıştır.

Modellerin üç boyutlu aşınma analizleri Şekil 4.17 ve Şekil 4.18a’da verilmiş olup, Şekil 4.18b’de ise kontak bölgesindeki aşınma analizi görünmektedir.

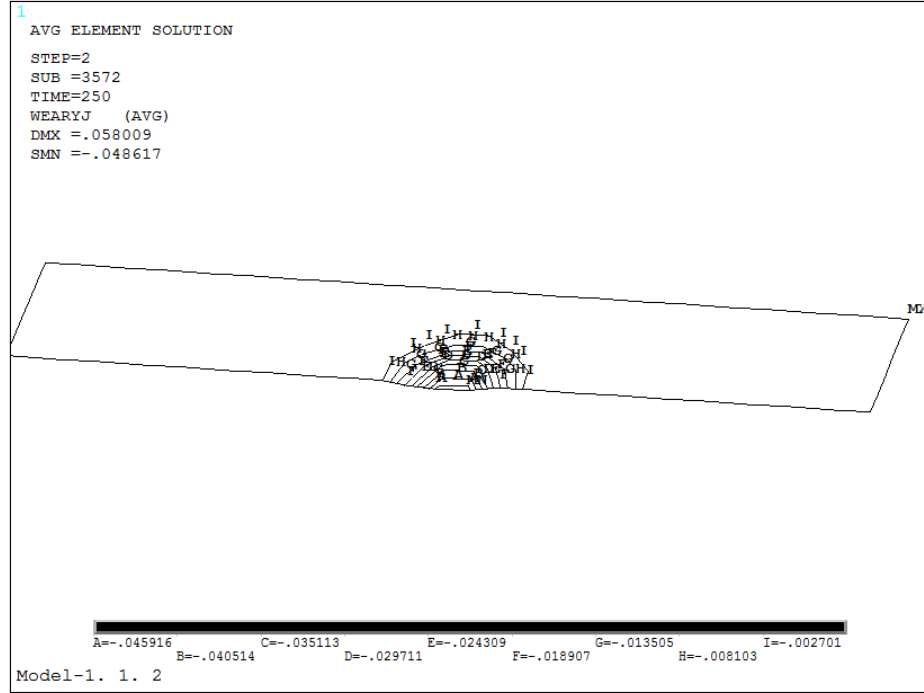


Şekil 4.17. Modelin üç boyutlu aşınma analizi



a)

Şekil 4.18. (devam)



b)

Şekil 4.18. a) üç boyutlu aşınma analizi, b) Kontak bölgesindeki aşınma analizi

Daha öncede bahs edildiği gibi analizlerde önce deneyleri yapılan modellerin analizleri, deney şartları altında yapılmıştır. Deney ve analizden elde edilen aşınma sonuçları birbiri ile karşılaştırılmıştır.

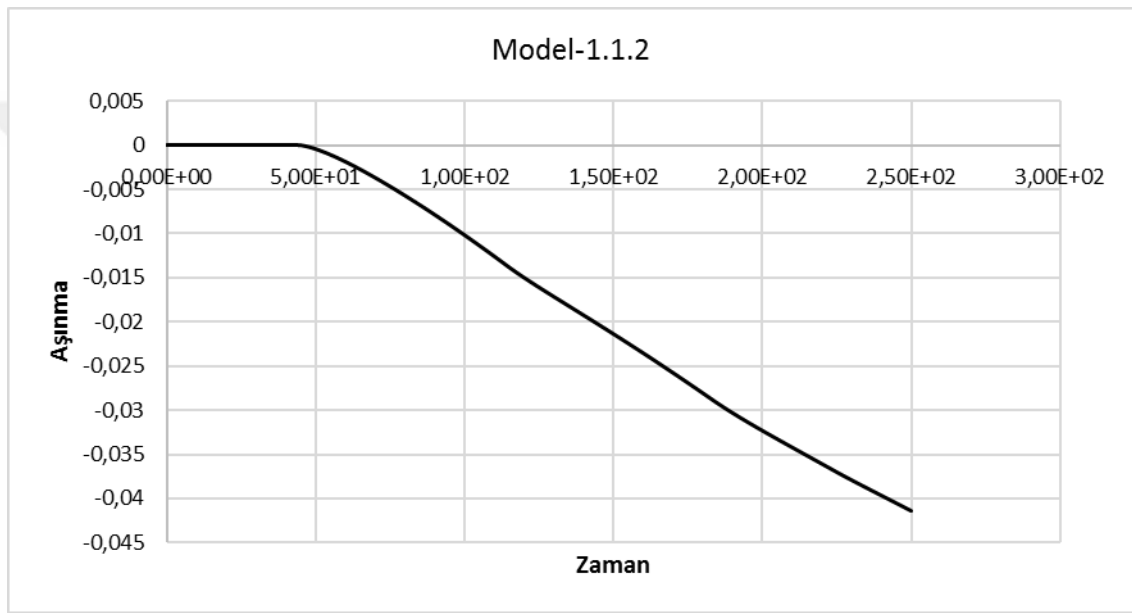
Deney şartlarında olan modellerde alt malzeme olarak, indirek kompozitler, nanohibritler, mikrohbritler, feldspatikler ve rezin nano seramikler kullanılmıştır. Bu modellerin hepsinde deneylerde olduğu gibi üst malzeme olarak zirkonya kullanılmıştır ve 50N yük modellere uygulanmıştır.

4.3.1. Model-1.1.2, alt malzeme indirek kompozit

Bu model İndirek kompozitlerin Zirkonya aşındırıcısı ile aşınmasını vurgulamaktadır, model deney şartlarında ve 50 N yük altında gerçekleştirilmiştir. İndirek kompozit

olarak bu çalışmada belleglasslar örnek olarak alınmıştır. Bu malzemelerin %85 oranında 25 µm silika nanopartiküllerden ve prepolimerize dolduruculardan oluşmaktadır.

İndirek kompozitlerin aşınma davranışı Şekil 4.19’da verilmiştir. İndirek kompozitlerde deneysel değerler ve analiz değerleri yaklaşık olarak birbirine yakındır.



Şekil 4.19. Model-1.1.2’nin aşınma davranışı

$$Fark\ yüzdesi = \frac{Sayısal\ sonuç - Deneysel\ sonuç}{Sayısal} \times 100$$

İndirek kompozitler fark yüzdesi %8.8 olarak hesaplanmıştır, deneysel ve sayısal değerler yakın sonuçları vermektedir. Deneysel sonuçlar ve analiz sonuçları arasındaki fark Çizelge 4.3’te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Model-1.1.2'nin sayısal ve deneysel aşınma değerleri

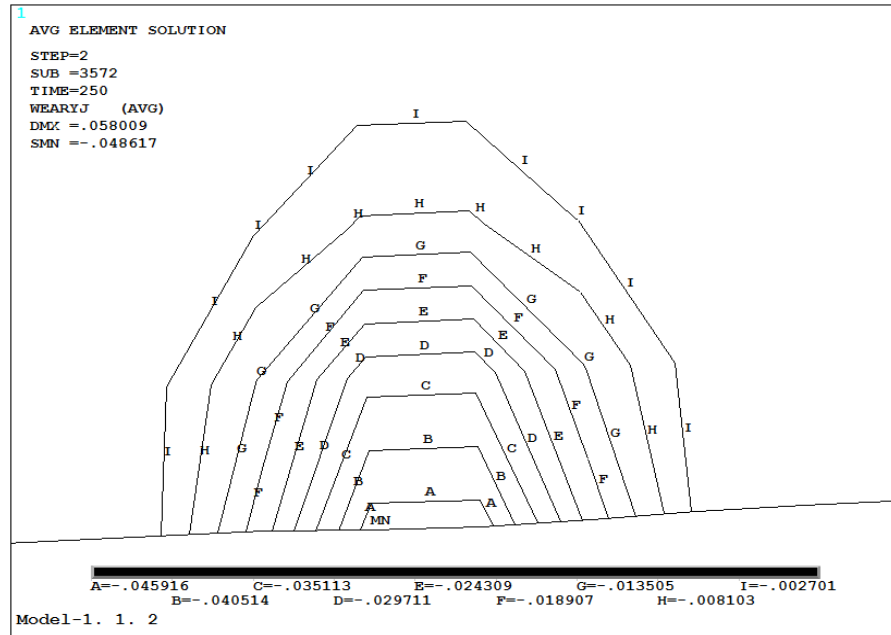
Deneyisel	~0.045	Fark
Sayısal	~0.041	
		%8.8

Diş restoratif malzemesi olarak yüksek performans gösteren indirek kompozitlerin aşınma davranışları incelenmiştir. Deneysel sonuçlarda olduğu gibi, analizlerde de aşınma açısından dayanıklı olduklarını göstermişler.

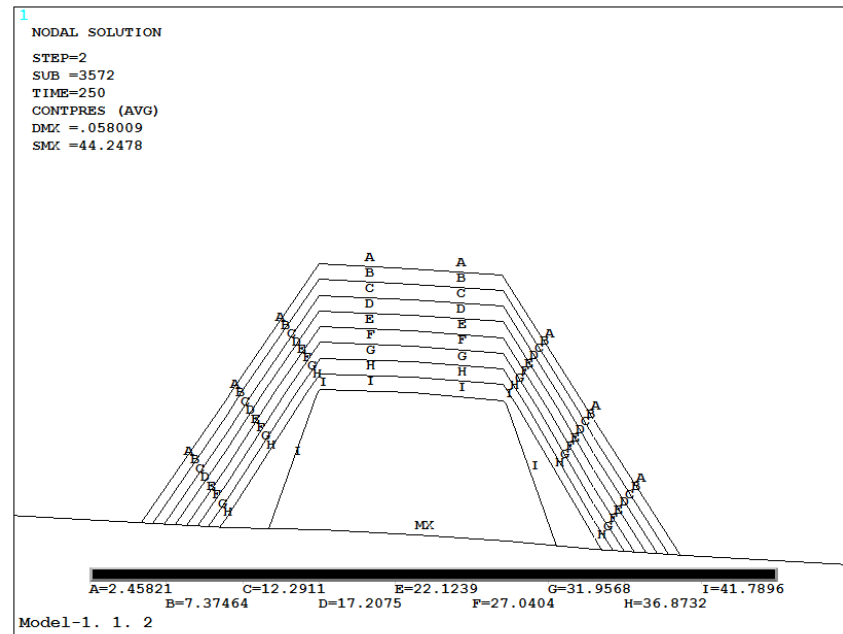
Şekil 4.20'de Model-1.1.2'nin deney şartlarında olan kontak bölgesindeki aşınma analizleri verilmiştir. Buradaki görüntü Şekil 4.19b'de olan görüntünün büyütülmüş ve netleştirilmiş halidir. Görüldüğü gibi A bölgesinde aşınma değeri maksimum miktarına ulaşmıştır.

Şekil 4.21, Model-1.1.2'de aşınma sırasında ortaya çıkan kontak basınçlarını göstermektedir. İ bölgesinde en büyük kontak basıncına ulaşılmıştır.

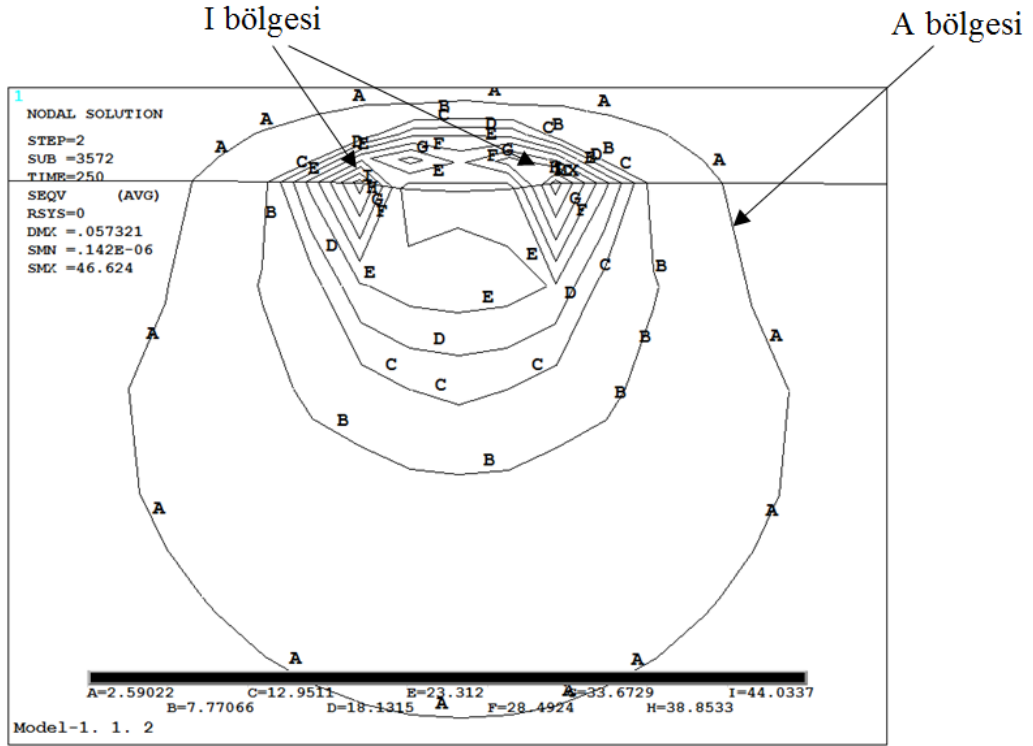
Bu modeldeki Von Mises gerilmeleri, Şekil 4.22'de görünmektedir en çok gerilme dağılımı I bölgesine aittir.



Şekil 4.20. Model-1.1.2'nin eleman aşınma çözümü



Şekil 4.21. Model-1.1.2'deki kontakt basınç

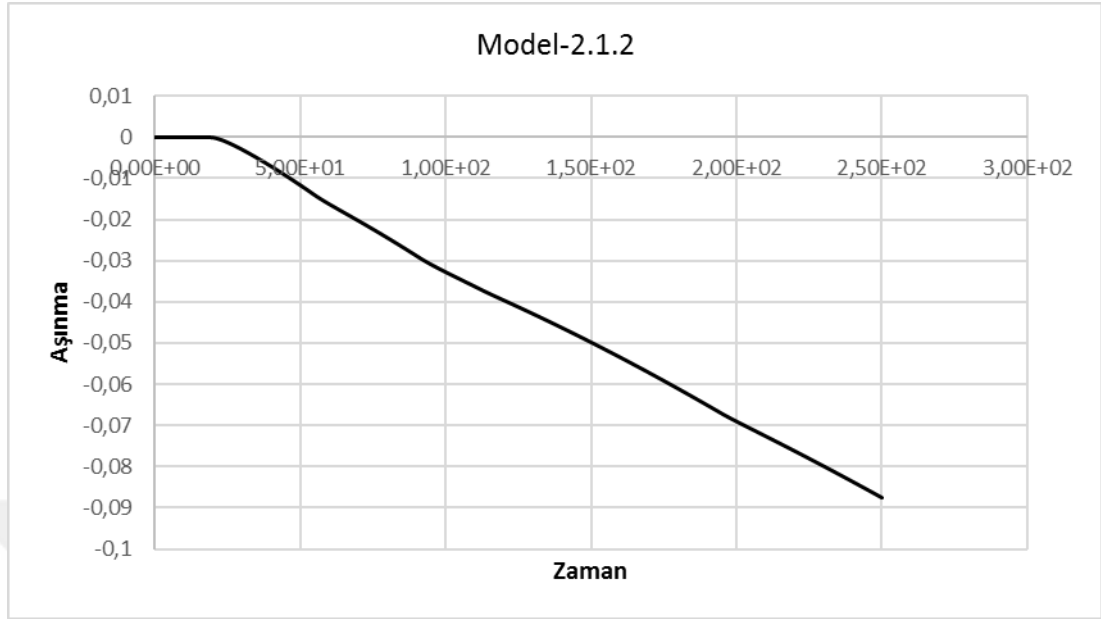


Şekil 4.22. Model-1.1.2'deki Von Mises gerilmeleri

4.3.2. Model-2.1.2, alt malzeme nanohibrit

Model-2.1.2'de nanonohibritler alt malzeme olarak ve zirkonya üst malzeme olarak kullanılmıştır bu model deney şartlarında ve 50 N yük altında analiz edilmiştir.

Nanohibrit kompozitleri analiz sırasında deney sonuçlarına çok yakın bir değere ulaşmışlardır. Bu malzemelerin aşınma davranışı Şekil 4.23'te verilmiştir.



Şekil 4.23. Model-2.1.2'nin aşınma davranışı

Nanohibritlerin sayısal ve deneysel aşınma sonuçları Çizelge 4.4'de verilmiştir. Analiz sonucunda hesaplanan sayısal değer ile deney sonuçlarının birbirine yakın olduğu görülmüştür.

$$Fark\ yüzdesi = \frac{Sayısal\ sonuç - Deneysel\ sonuç}{Sayısal} \times 100$$

Nanohibritlerdeki fark yüzdesi= %5.7

Çizelge 4.4. Nanohibritlerin sayısal ve deneysel aşınma değerleri

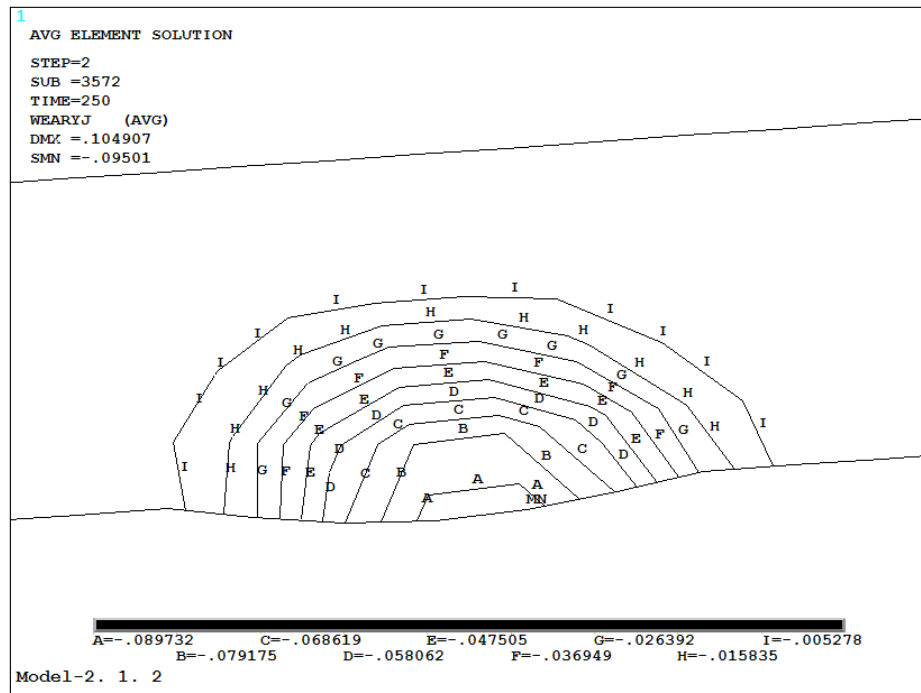
Deneysel	0.092	Fark
Sayısal	0.087	
		%5.7

Direk kompozitler içerisinde yer alan nanohibritlerin eleman aşınma çözümleri, kontak basınçları ve Von Mises gerilme dağılımları sırasıyla Şekil 4.24-4.26'da verilmiştir.

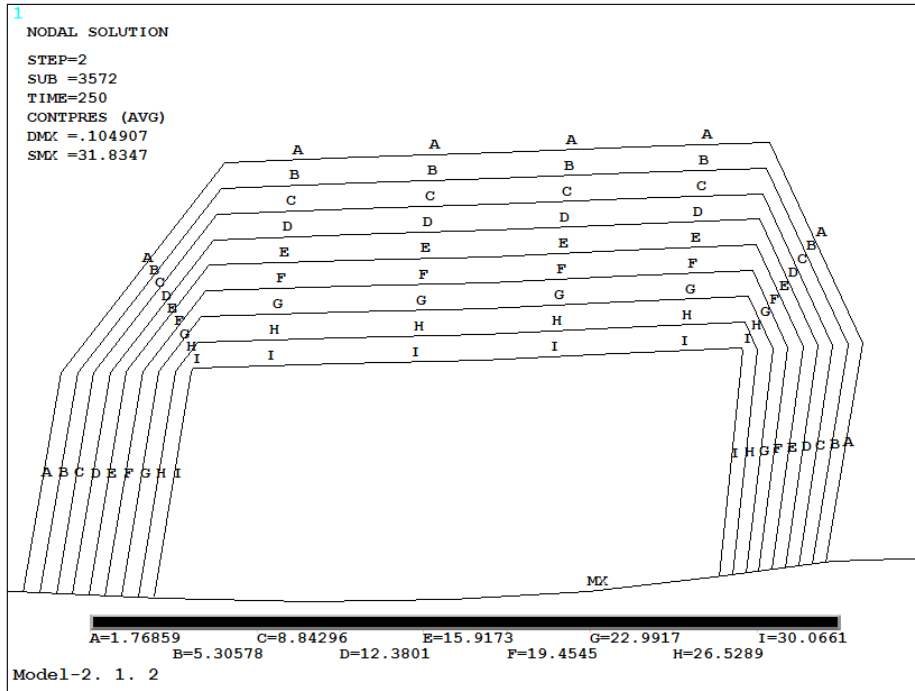
Şekil 4.24’de görüldüğü gibi maksimum aşınmalar A bölgesinde ortaya çıkmaktadır. Nanohibritlerde çok az aşınan numunelerin içinde yer almaktadırlar. Bu malzemelerin mekanik özelliklerinden kaynaklanan nedenlerden dolayı aşınma dayanımları yüksektir.

Nanohibritlerin kontak basınç değerleri Şekil 4.25’te verilmiştir. A bölgesinden I bölgesine doğru kontak basınç değerleri maksimum değerine ulaşmak üzeredir.

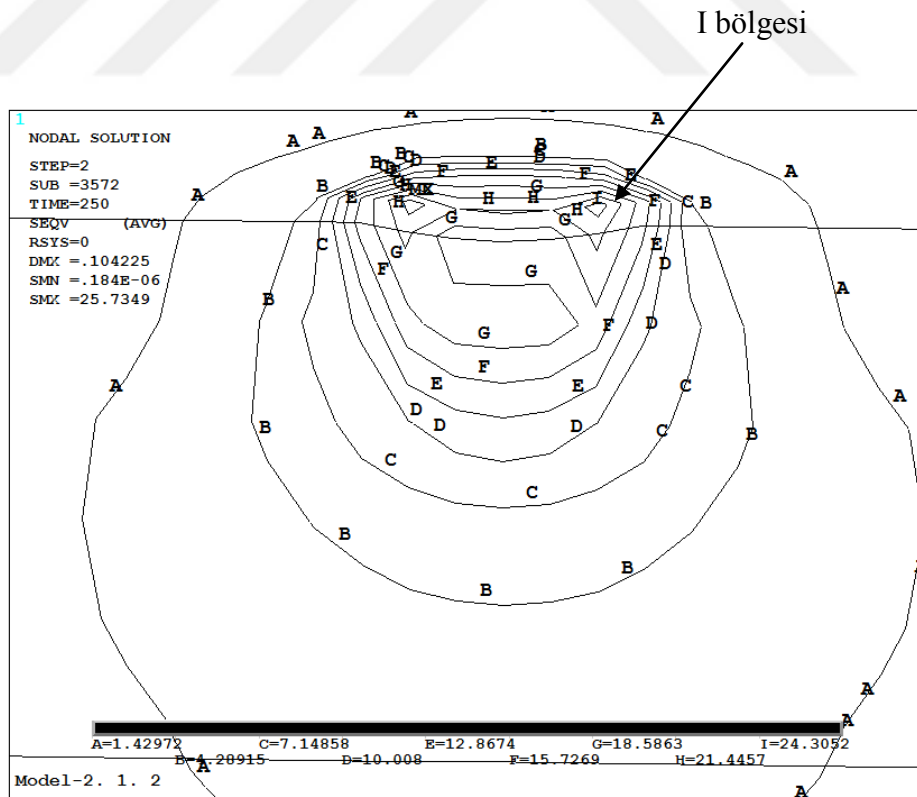
Şekil 4.26’da olduğu gibi, nanohibrit kompozitlerin gerilme dağılımları A bölgesinde minimum iken I bölgesinde en yüksek ulaşmıştır.



Şekil 4.24. Model-2.1.2’nin eleman aşınma çözümü



Şekil 4.25. Model-2.1.2'deki kontakt basınç

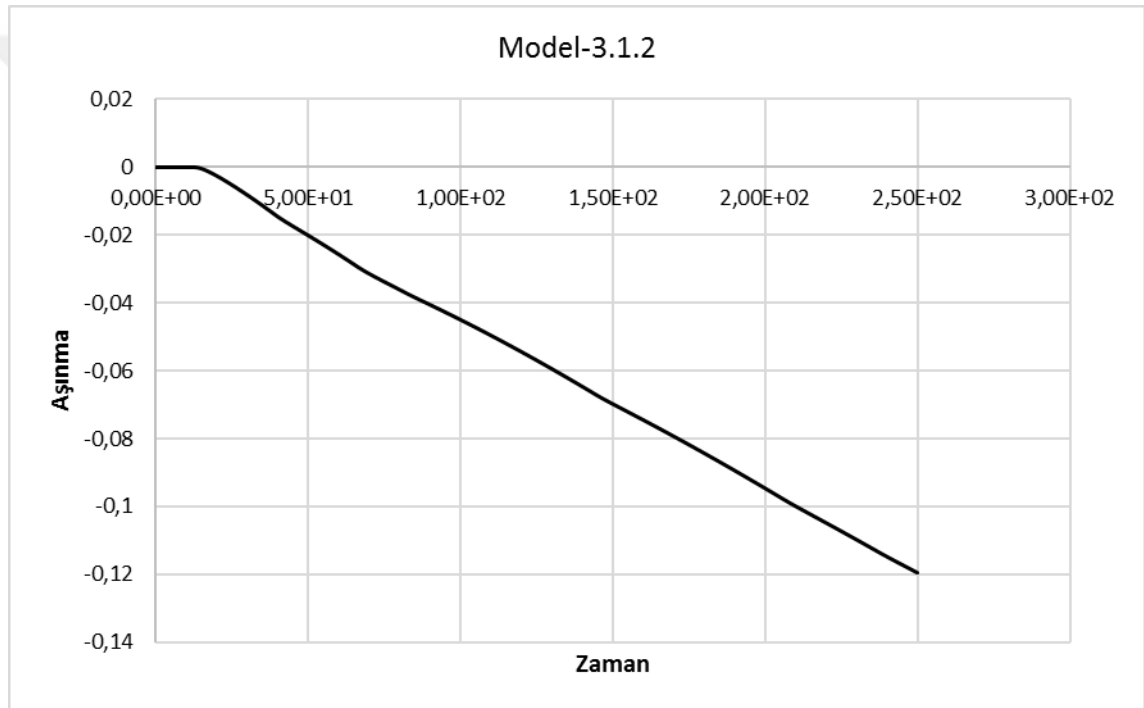


Şekil 4.26. Model-2.1.2'deki Von Mises gerilmeleri

4.3.3. Model-3.1.2, alt malzeme mikrohibrit

Model-3.1.2’de alt malzeme olarak mikrohibrit ve üst malzeme olarak zirkonya kullanılmıştır. Bu modelde deney şartlarında ve 50 N yük altında hesaplanmıştır.

Model-3.1.2’nin aşınma analizi Şekil 4.27’de olduğu gibi bir davranış göstermektedir. Çizelge 4.5’te deney ve analiz sonuçlarının arasındaki fark gösterilmiştir.



Şekil 4.27. Model-3. 1. 2’nin aşınma davranışı

$$Fark\ yüzdesi = \frac{Sayısal\ sonuç - Deneysel\ sonuç}{Sayısal} \times 100$$

Mikrohibritlerdeki fark yüzdesi= %7.5

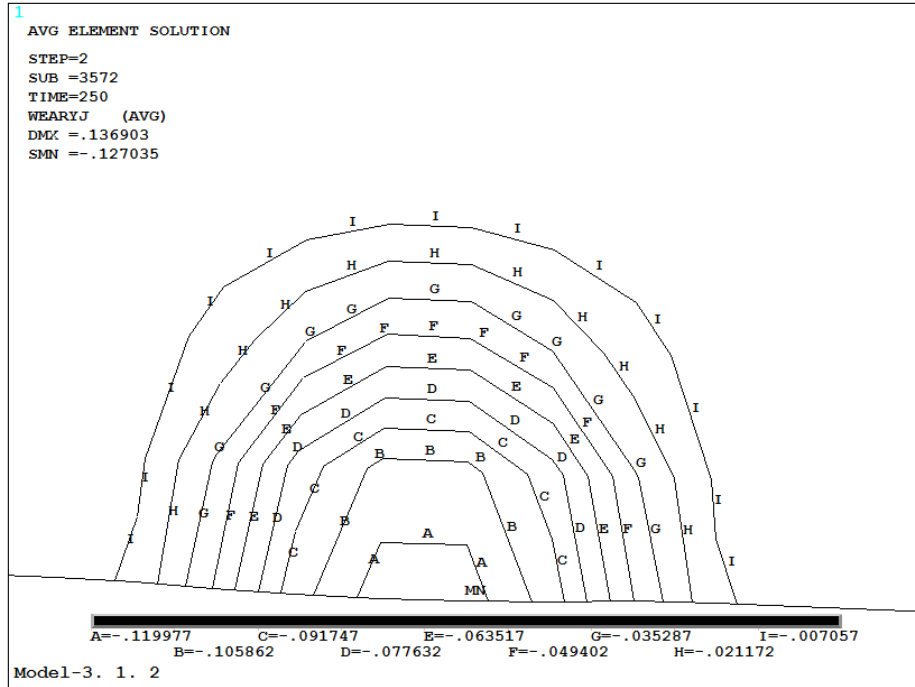
Çizelge 4.5. Mikrohibritlerin sayısal ve deneysel aşınma değerleri

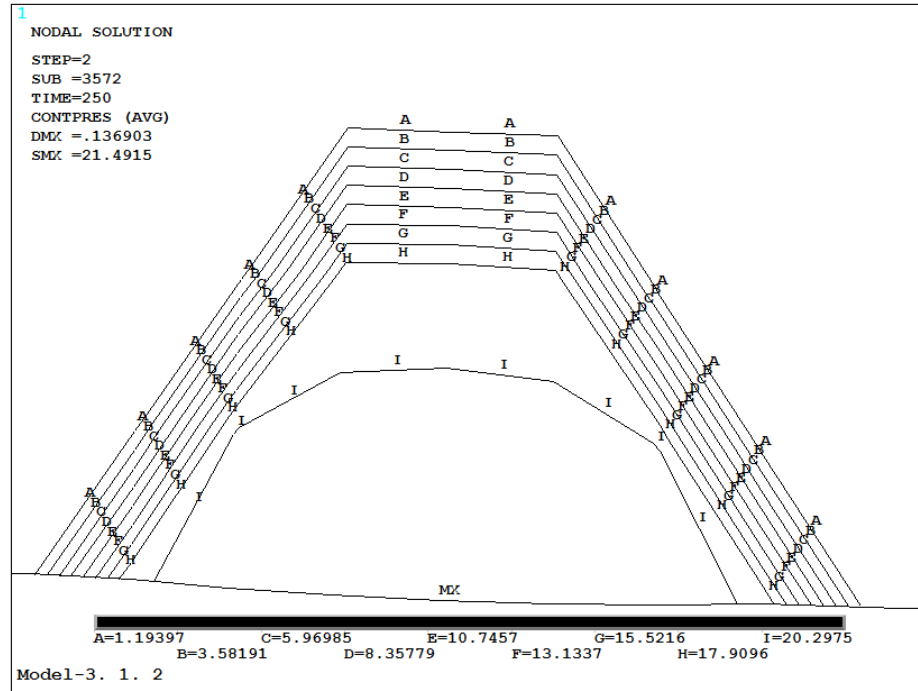
Deneysel	0.11	Fark
Sayısal	0.119	
		%7.5

Model-3.1.2'nin eleman aşınma çözümü Şekil 4.28'de gösterilmiştir. Aşınma değeri A bölgesinde 0.119mm değerine ulaşmaktadır.

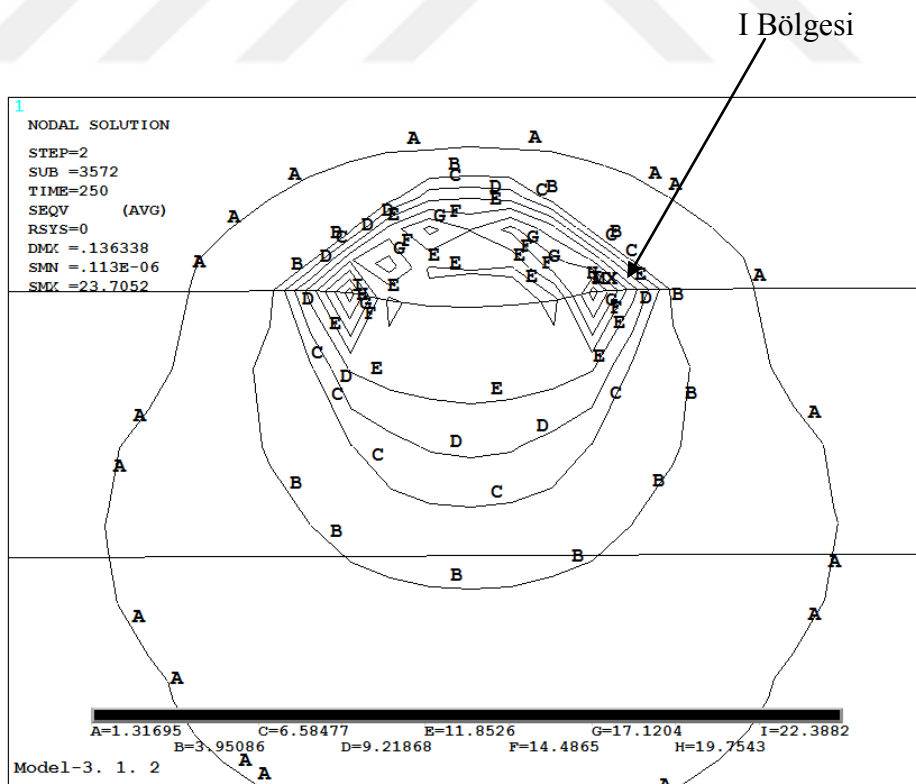
Şekil 4.29'da ise Model-3. 1. 2'nin kontak basınç değerleri gösterilmiştir. A bölgesinde kontakt basınç 1,19 Mpa değerine ulaşırken I bölgesine doğru kontak basınç değeri yükselmektedir.

Model-3.1.2'nin Von Mises gerilme dağılımı Şekil 4.30'da gösterilmiştir. I bölgesinde ise daha çok gerilme yığılması ortaya çıkmıştır.

**Şekil 4.28.** Model-3.1.2'nin eleman aşınma çözümü



Şekil 4.29. Model-3.1.2'deki kontakt basınç

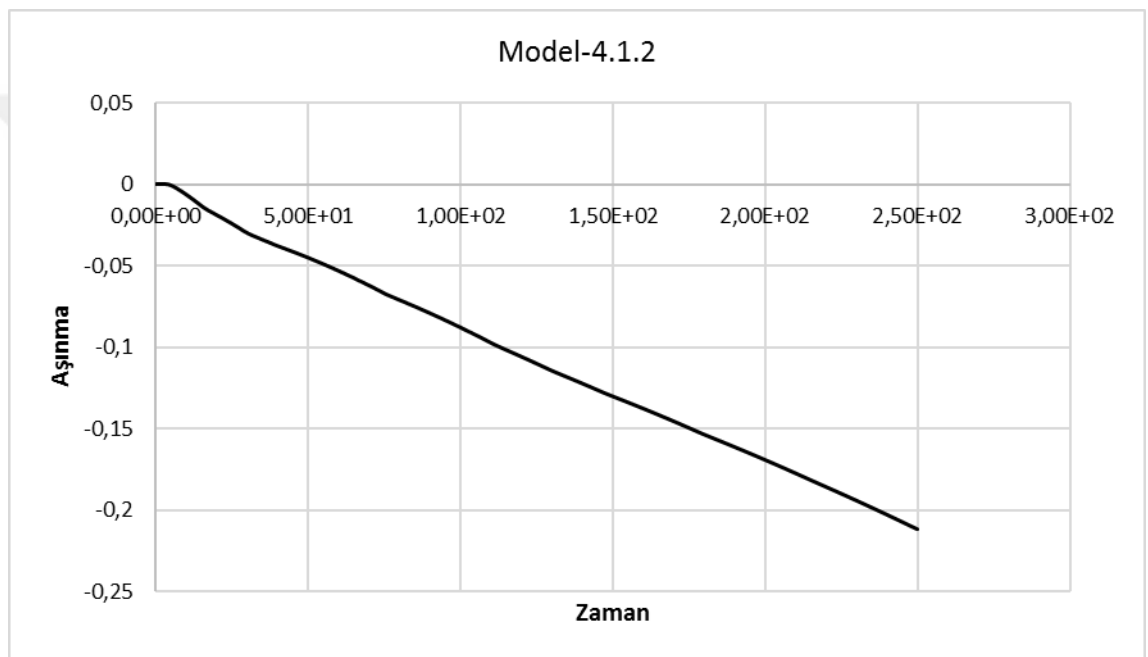


Şekil 4.30. Model-3.1.2'deki Von Mises gerilmeleri

4.3.4. Model-4.1.2, alt malzeme feldspatik

Model-4.1.2’de feldspatik alt malzeme ve zirkonya üst malzeme olarak kullanılmıştır, bu model deney şartlarında ve 50N yük altında analiz edilmiştir.

Model-4.1.2’nin aşınma davranışı Şekil 4.31’de gösterilmiştir.



Şekil 4.31. Model-4.1.2’nin aşınma davranışı

$$Fark\ yüzdesi = \frac{Sayısal\ sonuç - Deneysel\ sonuç}{Sayısal} \times 100$$

Feldespatik fark yüzdesi= %9.5 deneyselin altında

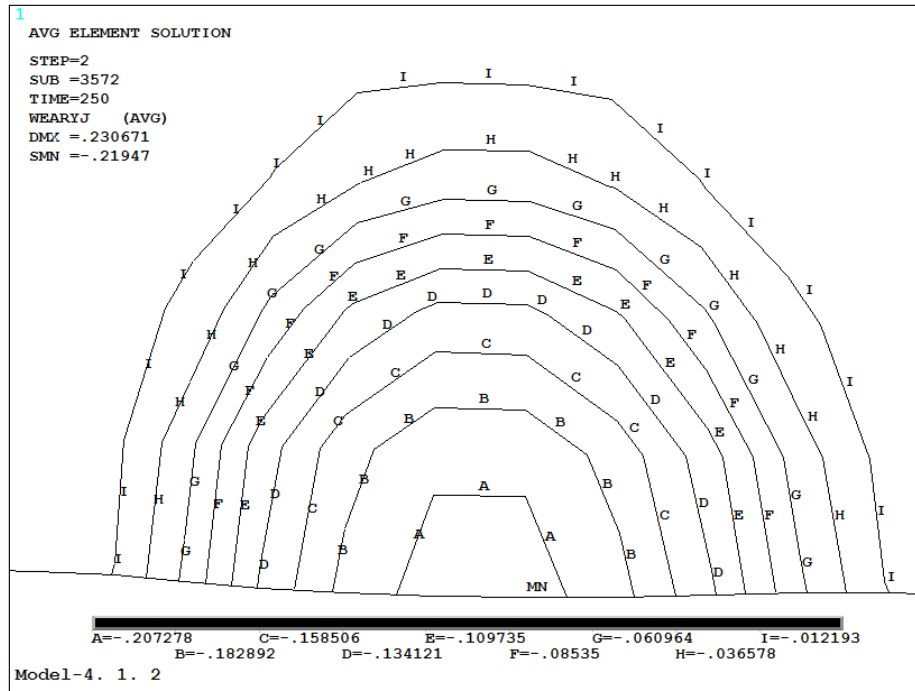
Çizelge 4.6, Model-4.1.2’nin deney ve analiz sonucunda hesaplanan aşınma değerlerini göstermektedir.

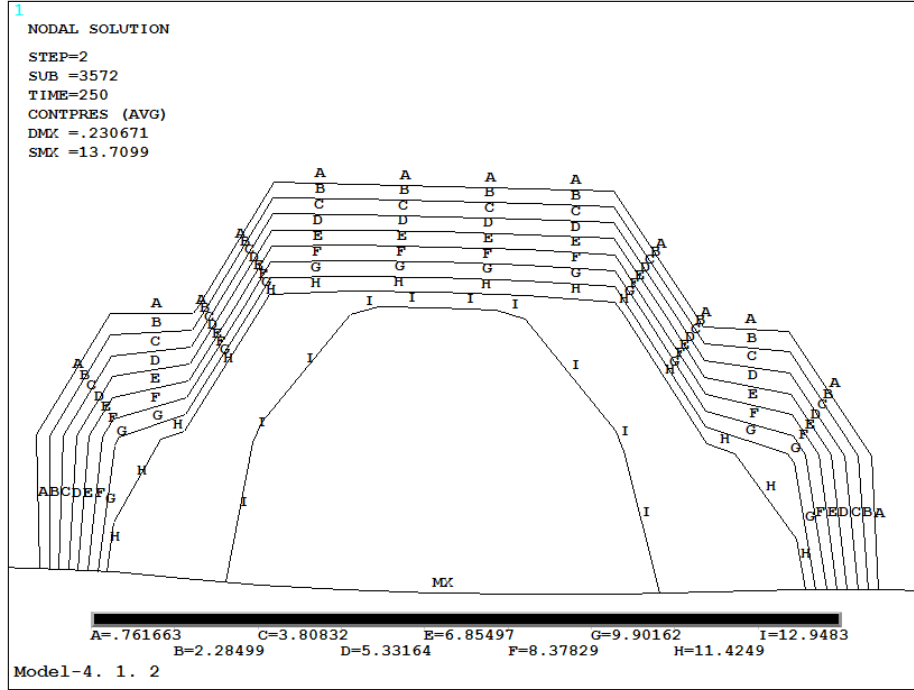
Çizelge 4.6. Feldespatiklerin sayısal ve deneysel aşınma değerleri

Deneyisel	0.24	Fark %9.5
Sayısal	0.21	

Şekil 4.32’de görüldüğü gibi bu malzemelerin maksimum eleman aşınma çözüm değerleri A bölgesinde gözlemlenmektedir.

Kontak basınç açısından A bölgesi minimum değerlere sahipken I bölgesindeki değerler maksimuma ulaşmıştır bu da Şekil 4.33’de görülmektedir.

**Şekil 4.32.** Model-4.1.2’nin eleman aşınma çözümü

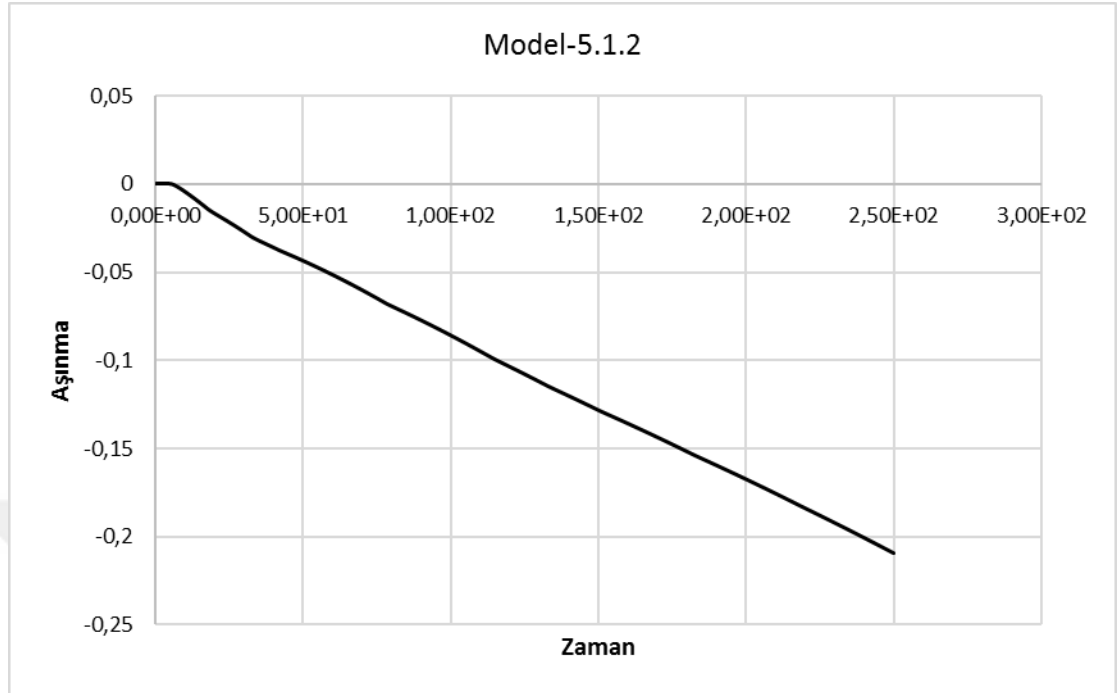


Şekil 4.33. Model-4.1.2'deki kontakt basınç

Model-4.1.2'de kontak sırasında oluşan Von Mises gerilme dağılımları Şekil 4.34'te verilmiştir. Homojen bir dağılıma sahip olmamasına rağmen I bölgesinde maksimum gerilmeye ulaşılmıştır.

4.3.5. Model-5.1.2, Alt malzeme Rezin nano seramik

Model -5.1.2'nin aşınma davranışı Şekil 4.35'te verilmiştir.



Şekil 4.35. Model-5.1.2'nin aşınma davranışı

$$\text{Fark yüzdesi} = \frac{\text{Sayısal sonuç} - \text{Deneysel sonuç}}{\text{Sayısal}} \times 100$$

Rezin Nanoseraamik fark yüzdesi= %5

Rezin nanoseraamiklerin sayısal ve deneysel aşınma değerleri Çizelge 4.7'de verilmiştir.

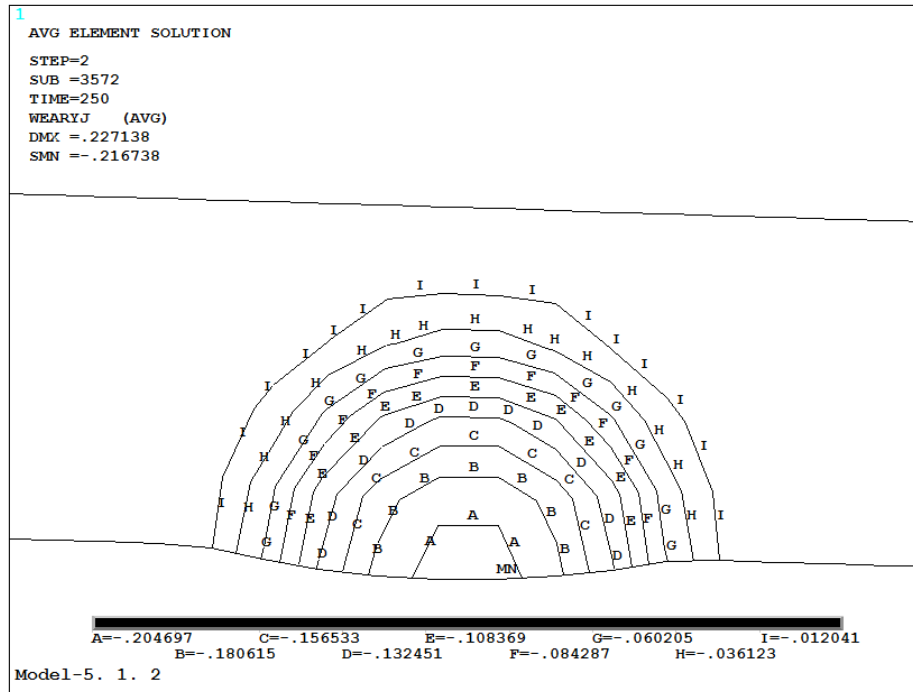
Çizelge 4.7. Model-5.1.2'nin sayısal ve deneysel aşınma değerleri

Deneysel	0.22	Fark %5
Sayısal	0.21	

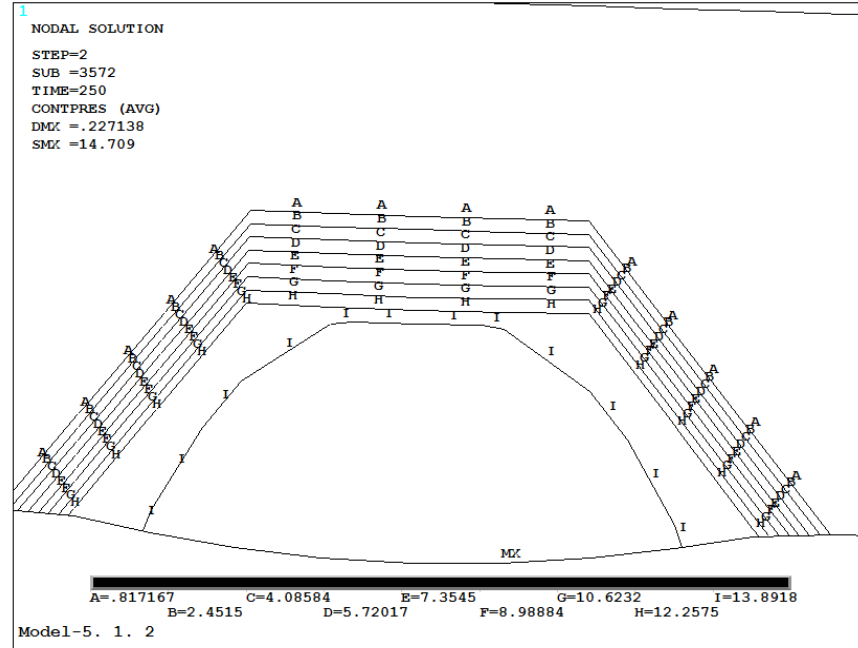
Model-5.1.2'nin eleman aşınma çözümü Şekil 4. 36'da verilmiştir. A bölgesinde daha çok aşınma oluşmaktadır.

Şekil 4.37’de aşınma sırasında model-5.1.2’de oluşan kontak basınç gösterilmiştir. A bölgesinde minimum I bölgesinde ise maksimum değerler ortaya çıkmıştır.

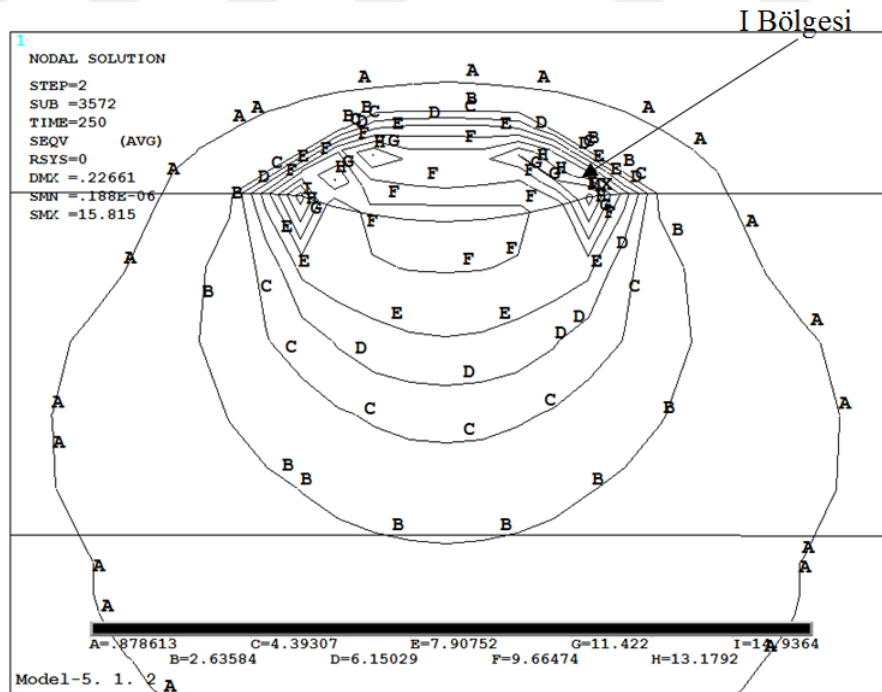
Model-5.1.2’nin toplam Von Mises gerilme dağılımı ise Şekil 4.38’de verilmiştir.



Şekil 4.36. Model-5.1.2’nin eleman aşınma çözümü



Şekil 4.37. Model-5.1.2'deki kontakt basınç



Şekil 4.38. Model-5.1.2'deki Von Mises gerilmeleri

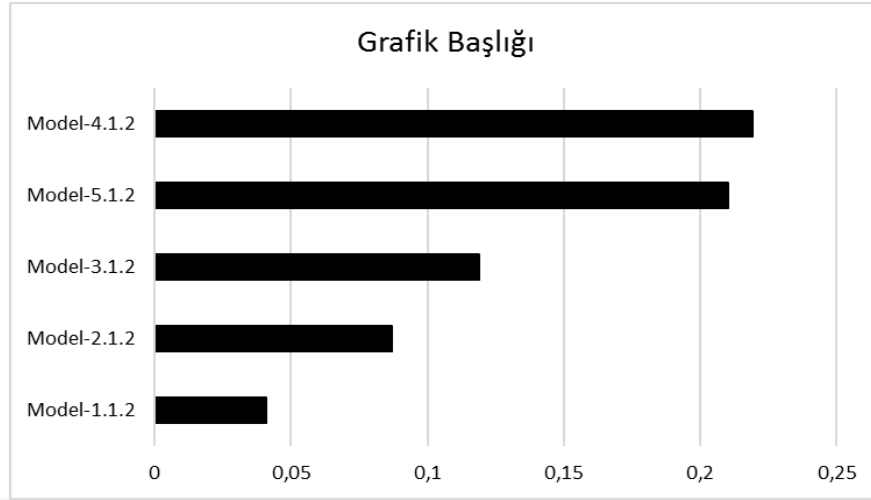
Deney şartlarını sağlayan analizlerden elde edilen sonuçlara göre, A bölgelerinde tüm malzemeler en yüksek aşınma değerlerine sahip olmuşlar.

Model-1.1.2’de analizlerden elde edilen aşınma değeri 0.041mm, Model-2.1.2 için 0.087mm, Model-3.1.2’de 0.0119mm, Model-4.1.2’de 0.219mm ve Model-5.1.2’de ise 0.21mm hesaplanmıştır.

Yine deney şartlarında yapılan hesaplamalara göre, I bölgelerinde en büyük kontak basınç değerleri ortaya çıkmıştır. En büyük kontak basınç, 44.24 MPa değeri ile Model-1.1.2’ye, 31.83 Mpa, Model-2.1.2’ye, 21.49 Mpa, Model-3.1.2’ye, 13.79 Mpa, Model-4.1.2 ve 14.70 Mpa, Model-5.1.2’ye aittir.

Gerilme açısından incelendiğinde ise I bölgeleri yine maksimum değere ulaşan bölgeler olarak görülmektedir. Burada da sırasıyla 46.62 MPa, 25.73 MPa, 23.70 MPa, 12.31 MPa ve 15.85 Mpa, Model-1.1.2, Model-2.1.2, Model-3.1.2, Model-4.1.2 ve Model-5.1.2’ye aittir.

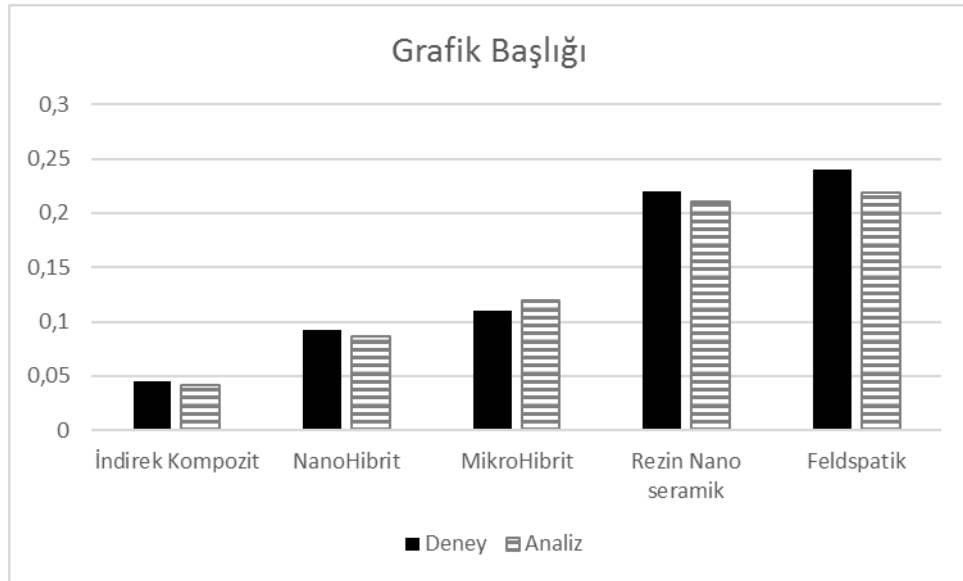
Malzemelerin aşınma analiz sonuçları Şekil 4.39’da verilmiştir, bu sonuçlara göre deneylerde olduğu gibi indirek kompozitler diğerlerine göre daha az aşınarak, daha çok aşınma dayanım göstermektedirler. Feldespatikler en çok aşınma değeri ve en az aşınma dayanıma sahipler.



Şekil 4.39. Medellerin sayısal analizden elde edilen aşınma değerleri(mm)

Hem deneysel sonuçlara hemde analiz sonuçlarına göre sırasıyla, İndirek kompozitler, Nanohibritler, Mikrohibritler, Rezin nanoseraamikler ve Feldespatikler aşınmaya karşı daha iyi bir performans göstermişlerdir.

Malzemelerin analiz ve deneysel sonuçları Şekil 4.40'ta verilmiştir.



Şekil 4.40. Deney ve analizlerden elde edilen aşınma değerleri

Laboratuvar deneyleri ve bunların sayısal çözümlerini takiben, karşılaştırılan sonuçlar, sayısal çalışmalarda kullanılan modelin kabul edilebilirliğini göstermiştir. Bu doğrulamadan sonra, sayısal deneyler farklı yüklerde ve değişen alt ve üst malzemelerle en iyi restoratif malzeme çiftini belirlemek için genişletilmiştir. Bu amaçla, Modeller 25, 50 ve 75 N yük altında çalıştırılarak, yük-aşınma davranış ilişkisi incelenmiştir. Bu kapsamda ayrıntılı olarak takip eden bölümlerde verilen çalışmalar için 100 model hazırlanıp incelenmiştir.

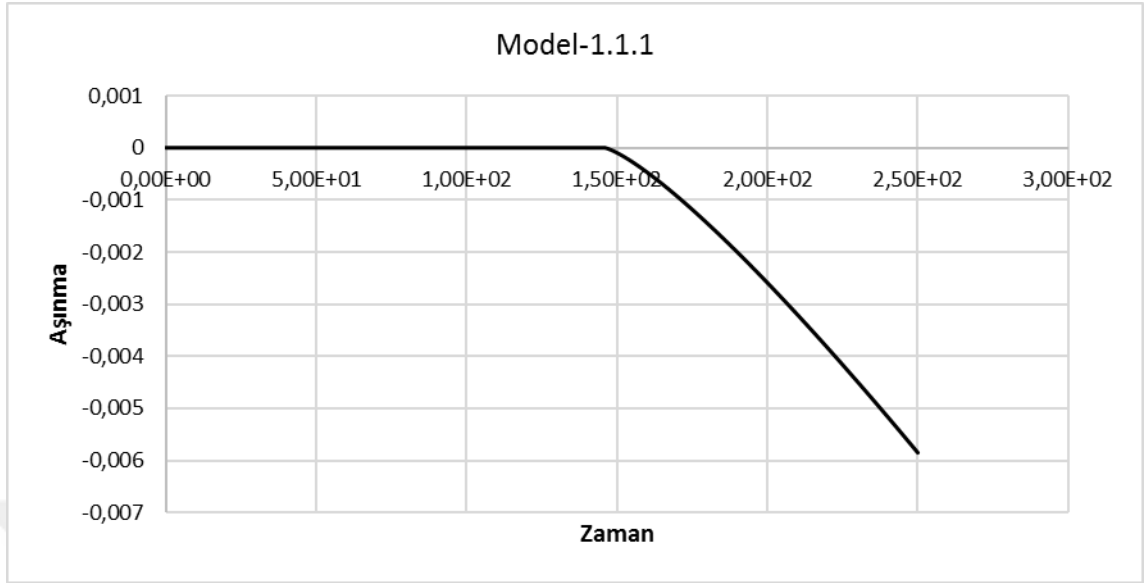
4.4. 25 N Yük altında aşınma davranışı

Ağızda diş ve diş restoratif malzemelerinin aşınmasını daha düşük yüklerde incelemek için 25N yük uygulanarak modeller hazırlanmıştır. Bu kapsamda 35 model hazırlanarak hesaplamalar yapılmıştır. Deneylerde uygulanan yükün alt ve üst sınırlarını kullanarak, yükün aşınmayı nasıl etkilediği incelenmiştir.

4.4.1. Model-1.1.1, alt malzeme indirek kompozit

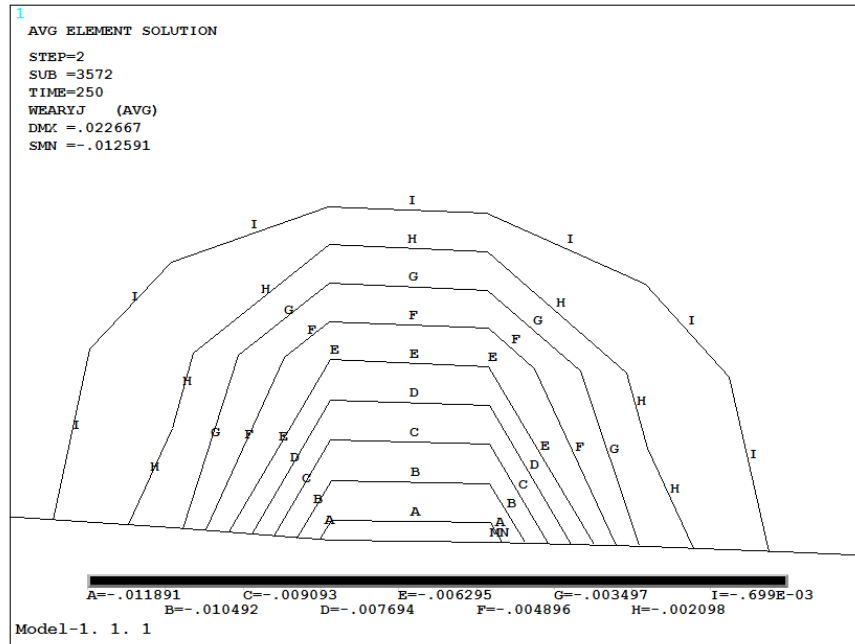
Model-1.1.1’de alt malzeme olarak indirek kompozitler ve üst malzeme olarak zirkonya kullanılmıştır. Bu model deney şartlarında ve 25 N yük altında hesaplanmıştır.

Model-1.1.1’in aşınma davranışları Şekil 4.41’de verilmiştir. Yük azaldığı için aşınma değerinde azalma göstermiştir.

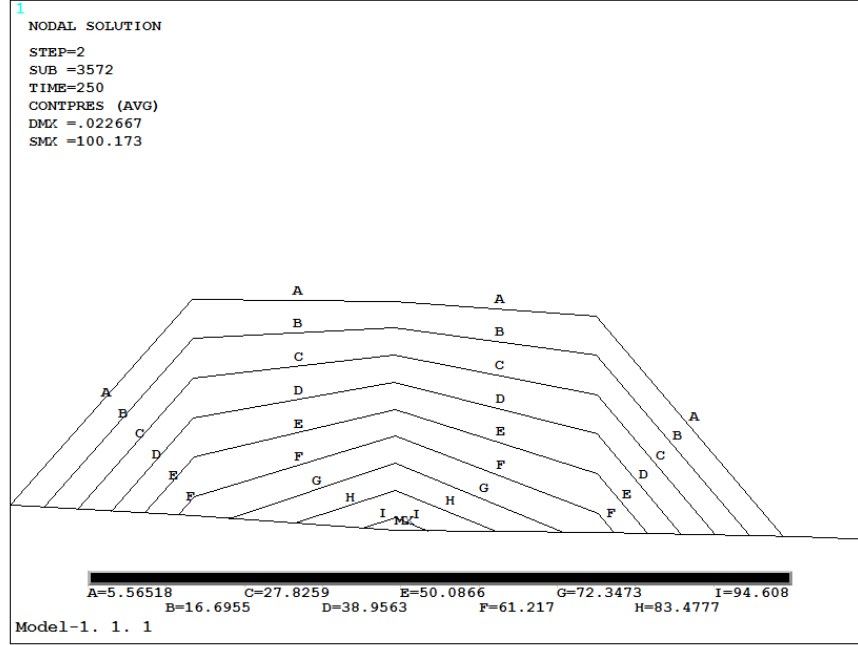


Şekil 4.41. Model-1.1.1'in aşınma davranışı

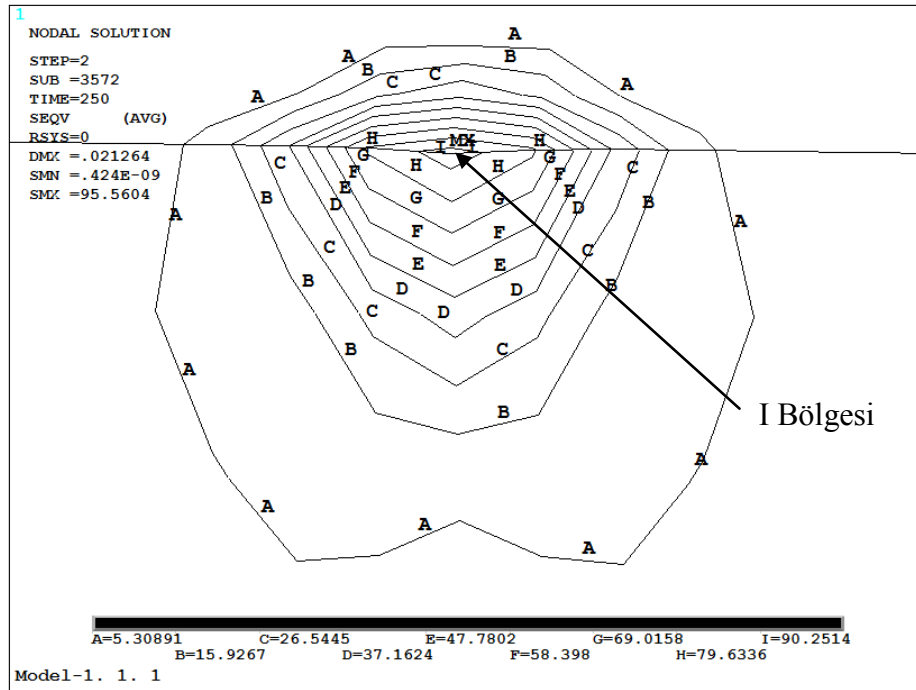
Model-1.1.1'in 25 N yük altındaki eleman aşınma çözümü Şekil 4.42'de verilmiştir. Burada A bölgesinde maksimum aşınmanın meydana geldiği görülmektedir. Bu malzemelerin bahsi geçen koşullar altındaki kontak basınç değerleri Şekil 4.43'te ve Von Mises gerilme dağılımları ise Şekil 4.44'te gösterilmektedir.



Şekil 4.42. Model-1.1.1'in eleman aşınma çözümü



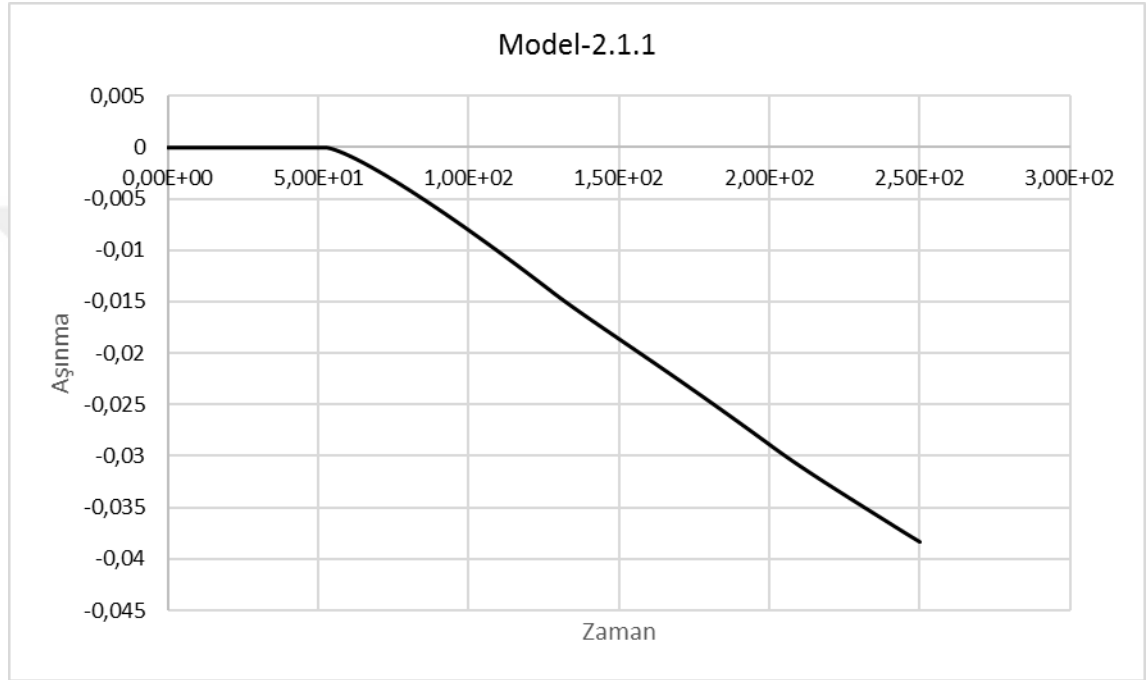
Şekil 4.43. Model-1.1.1'deki kontakt basınç



Şekil 4.44. Model-1.1.1'deki Von Mises gerilmeleri

4.4.2. Model-2.1.1, alt malzeme nanohibrit

Model-2.1.1 Nanohibritlerin 25 N yük altında zirkonya bilyesi vasitesile aşınmasının göstermektedir bu aşınma davranışı Şekil 4.45’de gösterilmektedir.

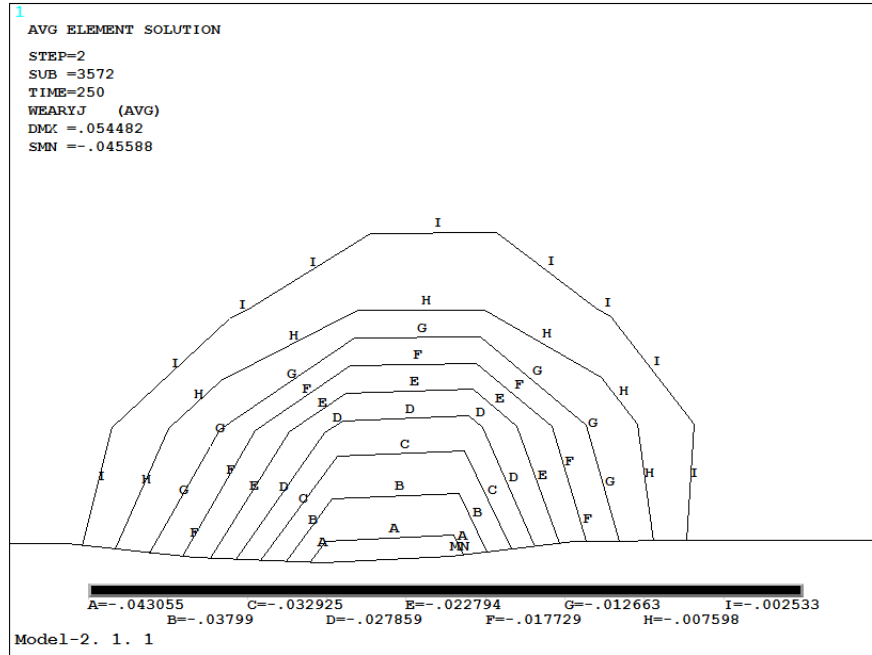


Şekil 4.45. Model-2.1.1’in aşınma davranışı

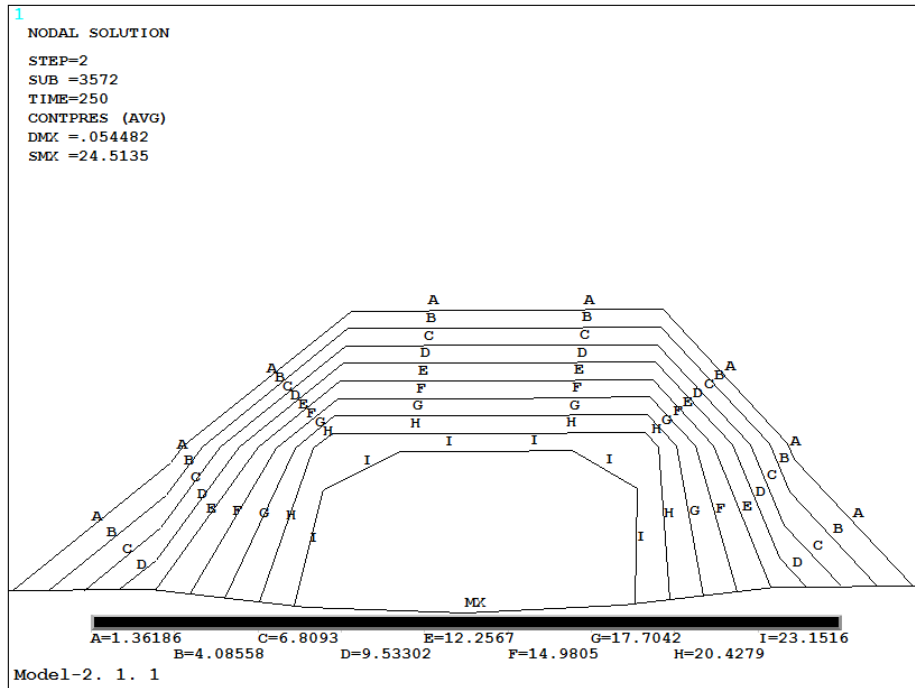
Şekil 4.46 model-2.1.1’in aşınma değerini göstermektedir Aşınma değeri A bölgesinde en yüksek değerine ulaşmıştır.

Şekil 4.47 model-2.1.1’in kontak basınç değerini ifade eder. Görüldüğü gibi A ve I bölgelerinde en az ve en çok basınç değerleri ortaya çıkmıştır.

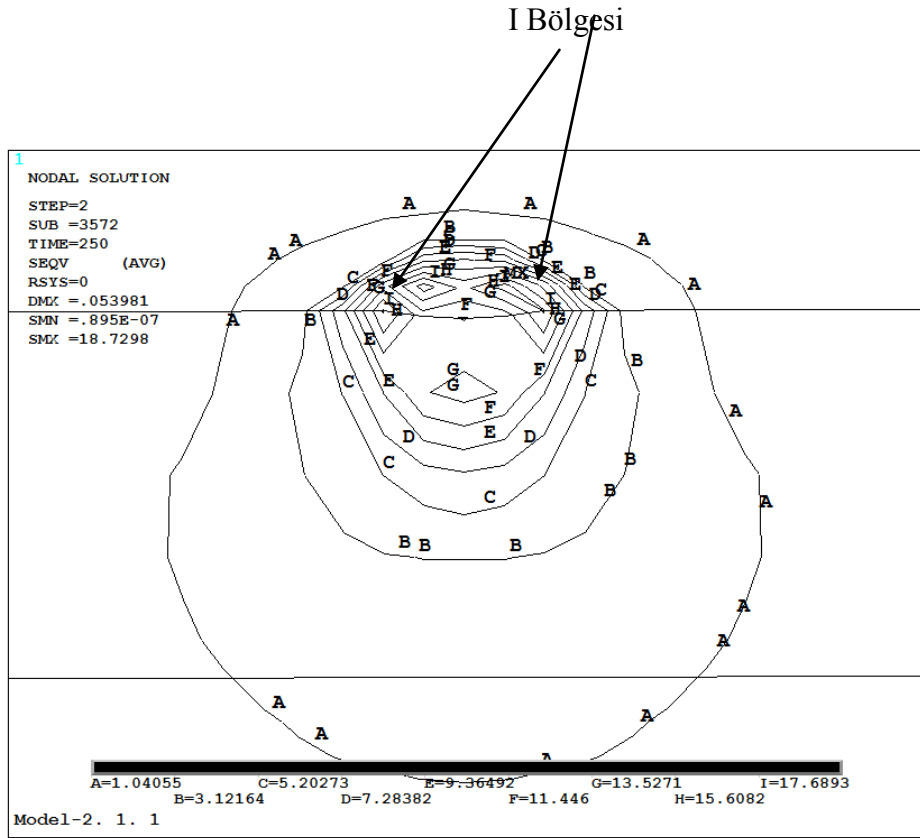
model-2.1.1’in Von Mises gerilme dağılımları ise Şekil 4.48’de gösterilmiştir. Burda olduğu gibi gerilmeler homojen olmayan bir şekilde dağılmıştır.



Şekil 4.46. Model-2.1.1'in eleman aşınma çözümü



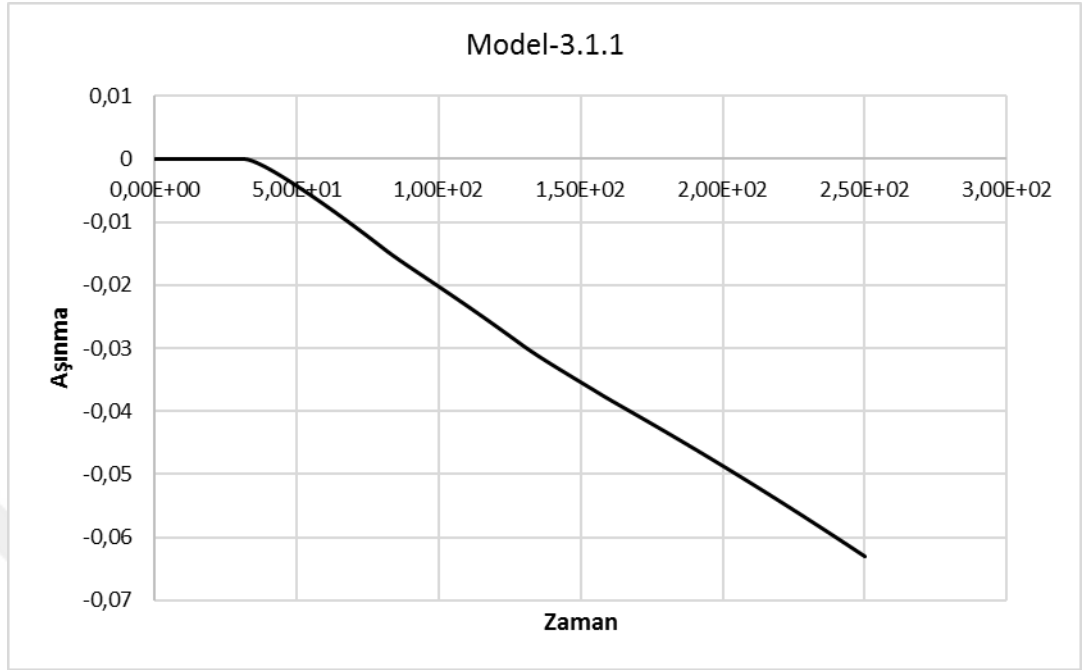
Şekil 4.47. Model-2.1.1'deki kontakt basınç



Şekil 4.48. Model-2. 1. 1'deki Von Mises gerilmeleri

4.4.3. Model-3.1.1, Alt Malzeme Mikrohibrit

Model-3. 1. 1'de Mikrohibritlerin 25 N yük altında zirkonya bilye tarafından aşındırılarak aşınma davranışları Şekil 4.49'da gösterilmiştir.

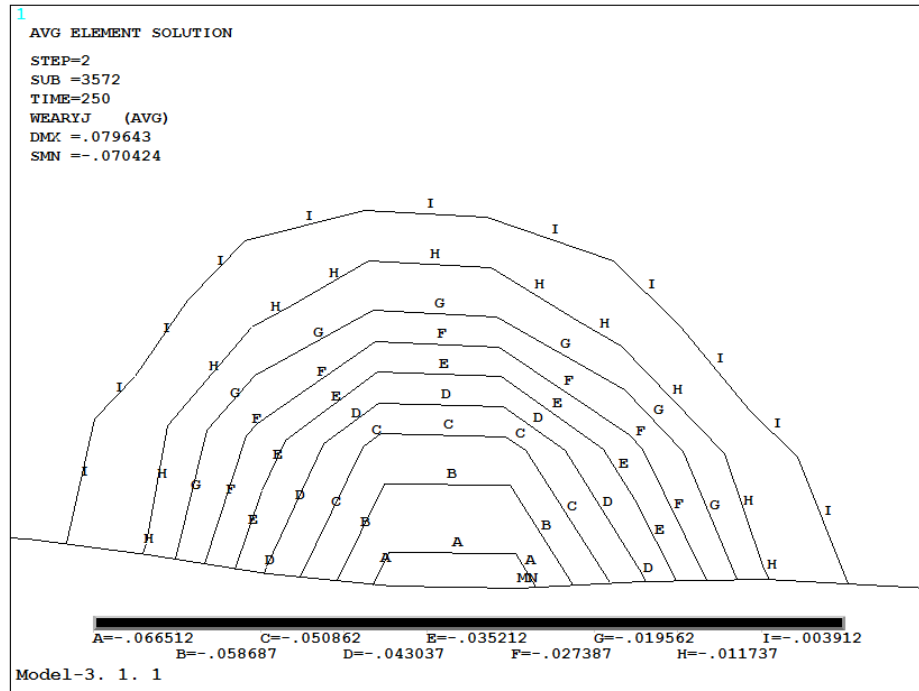


Şekil 4.49. Model-3.1.1'in aşınma davranışı

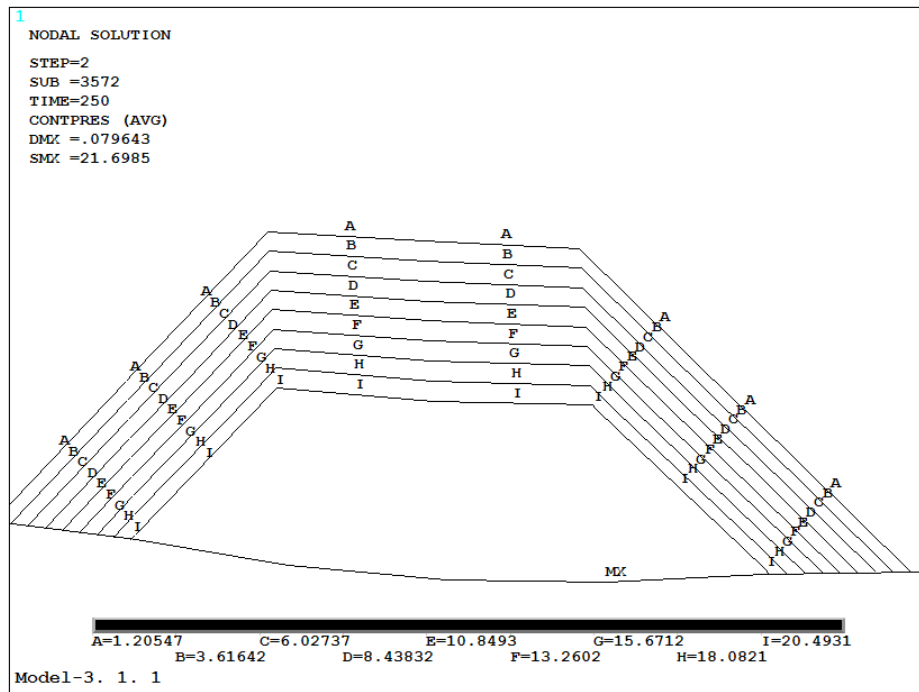
Model-3.1.1'in 25 N yük altındaki eleman aşınma çözümü Şekil 4.50'de ifade edilmektedir. Az yüklerde en çok ve en az değer arasındaki fark daha büyük yük uygulamalarına göre, azdır.

kontak basınç değerleri ise Şekil 4.51'de gösterilmiştir. I bölgesinde en yüksek kontak basınç değerine ulaşılmıştır.

Mikrohibritlerin 25N yükdeki toplam Von Mises gerilme dağılımı Şekil 4.52'de verilmiştir.

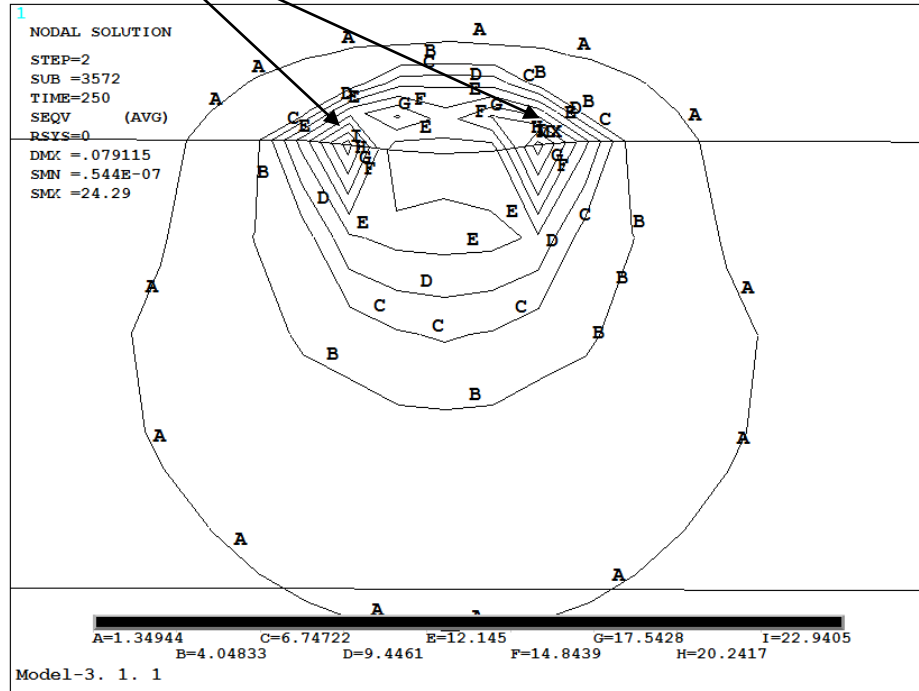


Şekil 4.50. Model-3.1.1'in eleman aşınma çözümü



Şekil 4.51. Model-3.1.1'deki kontakt basınç

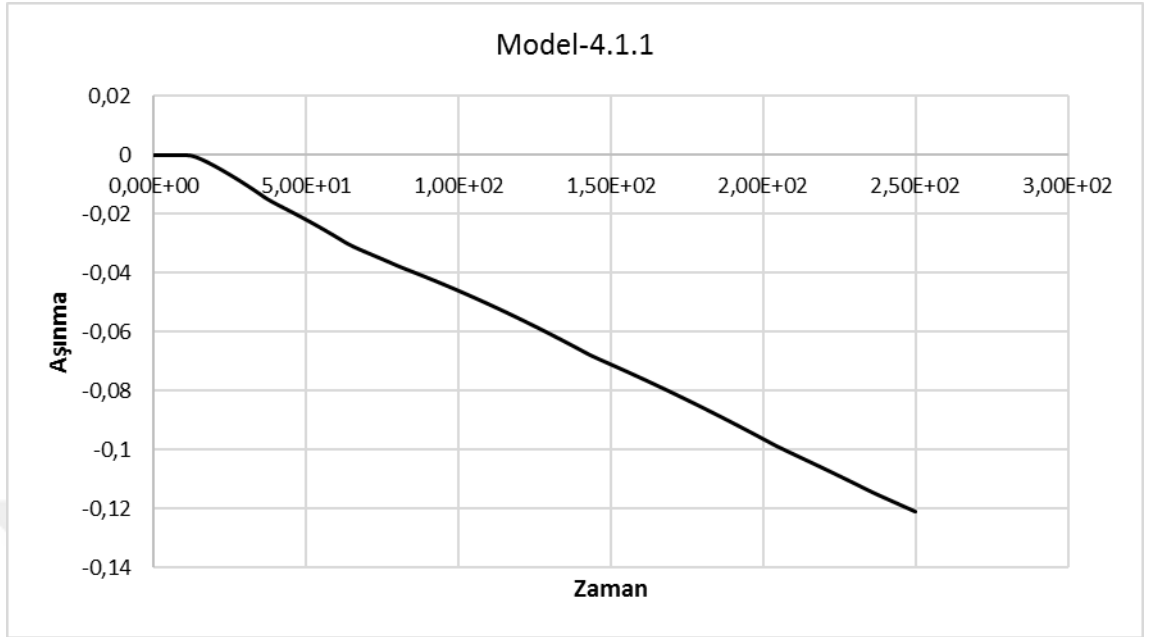
I Bölgesi



Şekil 4.52. Model-3.1.1'deki Von Mises gerilmeleri

4.4.4. Model-4. 1. 1, alt malzeme feldspatik

Model-4.1.1'de alt malzeme olarak feldspatikler ve üst malzeme olarak zirkonya kullanılmıştır bu model 25N yükle aşındırılmıştır. Aşınma davranışı Şekil 4.53'de verilmiştir.

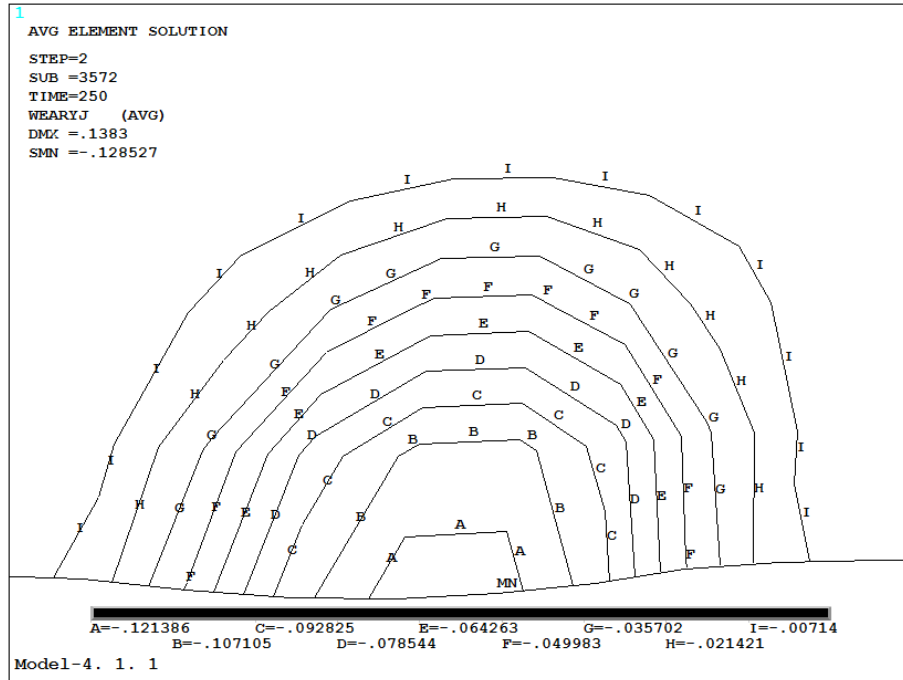


Şekil 4.53. Model-4.1.1'in aşınma davranışı

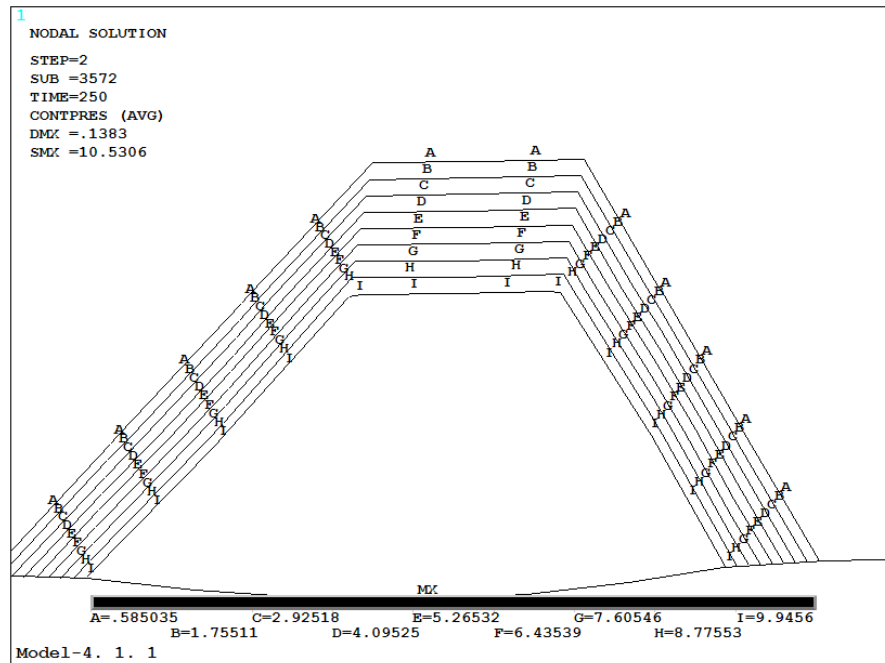
Şekil 4.54'te Model-4.1.1'in eleman aşınma çözümü gösterilmiştir. A bölgesinde 0.121mm değerinde bir aşınmaya ulaşmışken I bölgesinde 0.007mm değerine ulaşmaktadır.

Şekil 4.55'te Model-4.1.1deki kontak basınç değerleri görülmektedir.

Model-4.1.1 de oluşan Von Mises Gerilme dağılımları Şekil 4.56'da verilmiştir. I bölgelerinde daha büyük gerilmeler ortaya çıkmıştır. Bu gerilme yığılımlarına göre malzeme hasarı ilk bu bölgelerden başlanması düşünülmektedir.

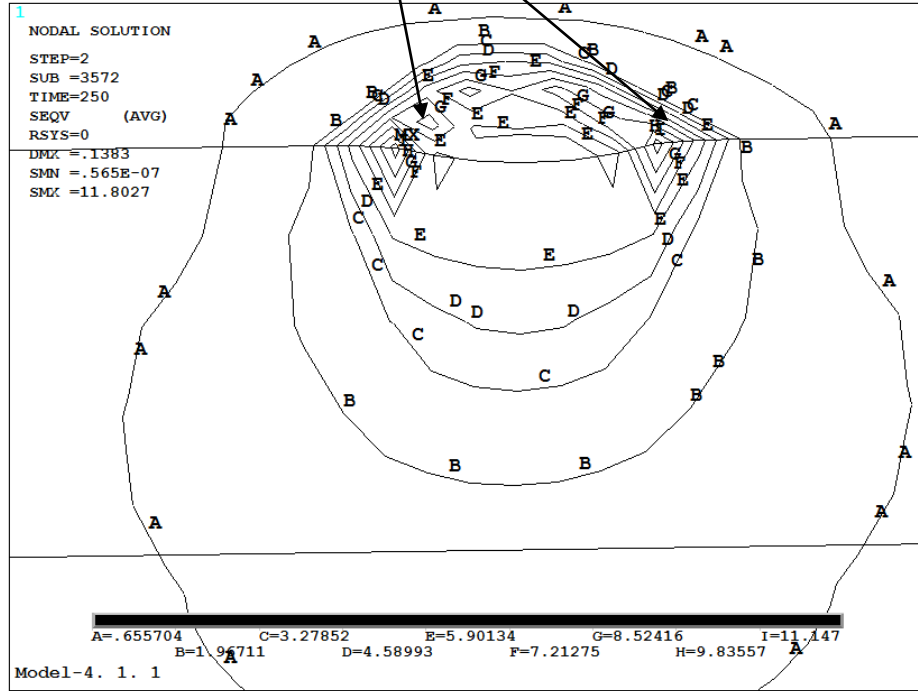


Şekil 4.54. Model-4.1.1'in eleman aşınma çözümü



Şekil 4.55. Model-3.1.1'deki kontakt basınç

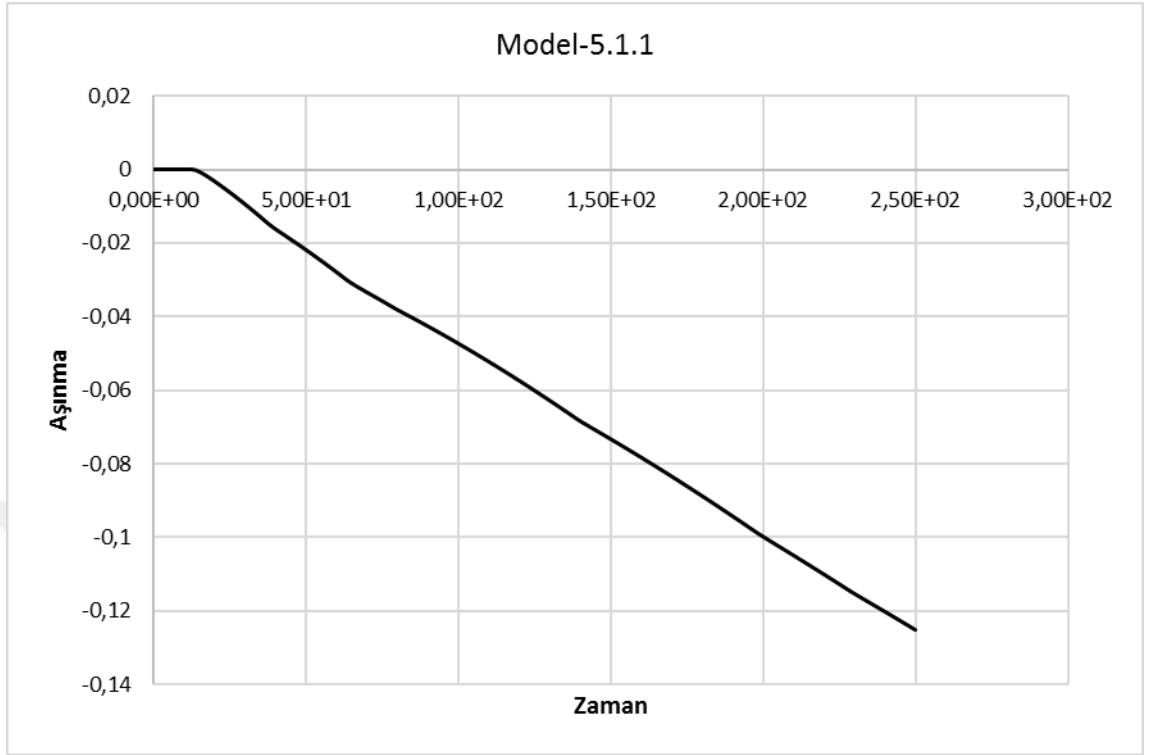
I Bölgesi



Şekil 4.56. Model-4.1.1'deki Von Mises gerilmeleri

4.4.5. Model-5.1.1, alt malzeme rezin nano seramik

Model- 5.1.1'de alt malzeme olarak rezin nano seramik ve üst malzeme olarak zirkonya kullanılmıştır. Bu model 25 N yük ile aşındırılmıştır. Model-5.1.1'in aşınma davranışı Şekil 4.57'de verilmiştir.

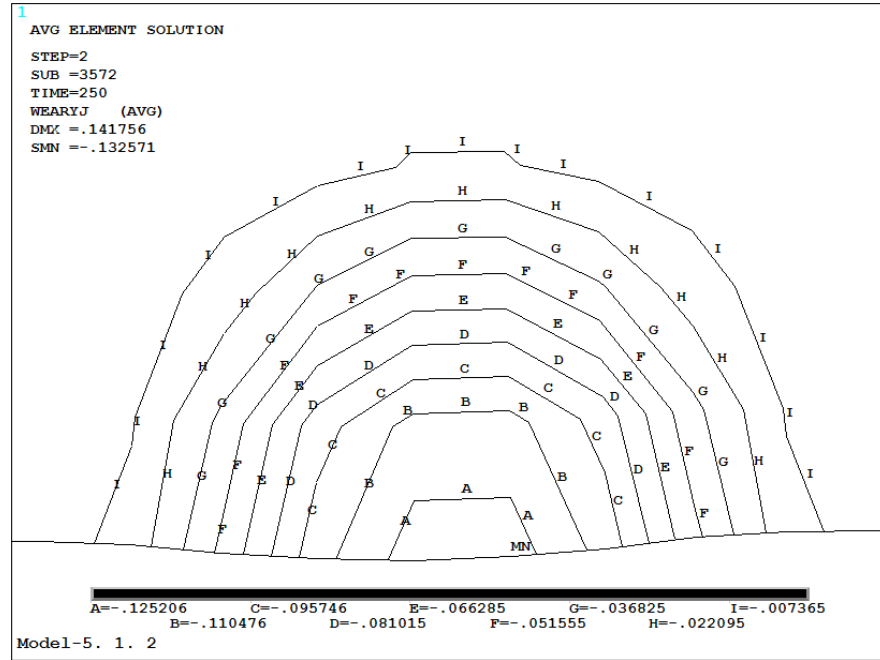


Şekil 4.57. Model-5.1.1'in aşınma davranışı

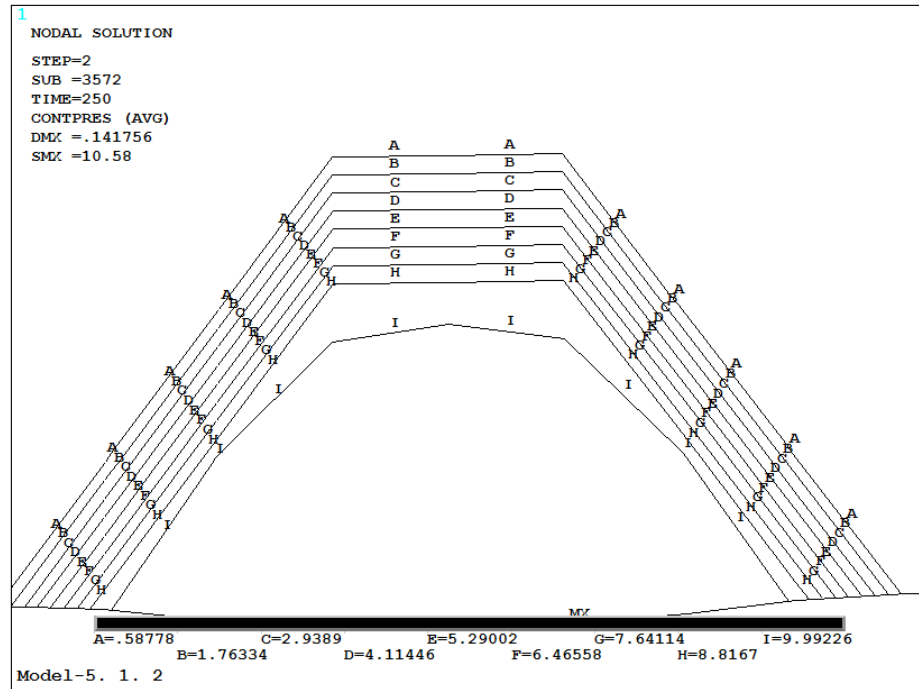
Şekil 4.58'de model-5.1.1'in , eleman aşınma çözümü gösterilmiştir.

Şekil 4.59'da model-5.1.1 analiz sırasında oluşan kontakt basınç verilmiştir. Kontak basınç değeri I bölgesinde 9.99Mpa' ulaşmaktadır.

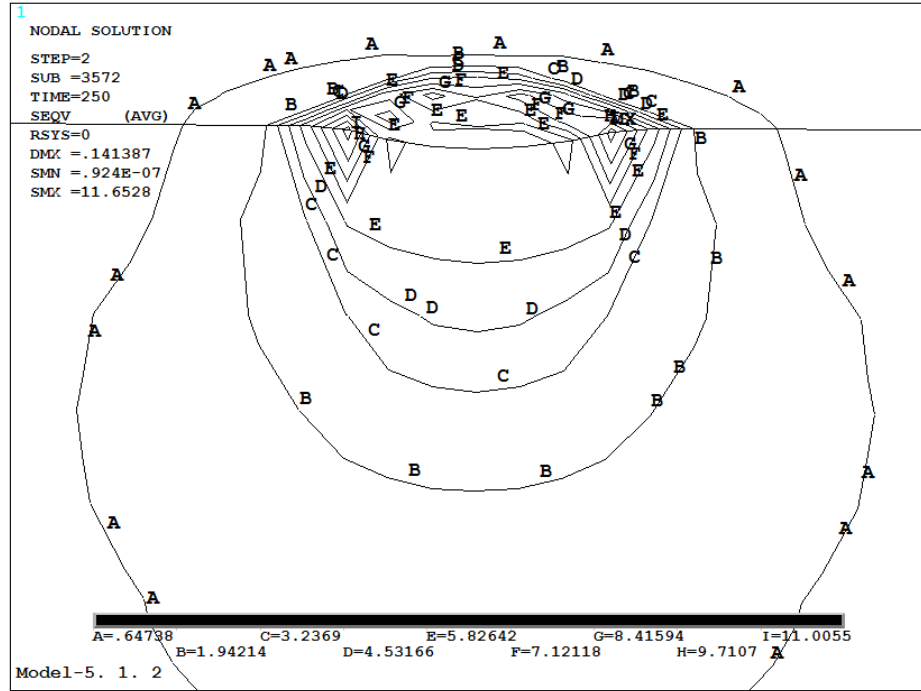
Şekil 4.60'ta ise model-5.1.1 Von Mises gerilmeleri hesaplanmıştır. A bölgesinde I'ya yaklaşıncı gerilme yığılmasında çoğalmaktadır.



Şekil 4.58. Model-5.1.1'in eleman aşınma çözümü



Şekil 4.59. Model-5. 1. 1'deki kontakt basınç



Şekil 4.60. Model-5.1.1'deki Von Mises gerilmeleri

Bu incelemelere göre, 25 N yük analiz sonuçlarına göre, malzemeler A bölgesinde en çok aşınma değerine sahiptirler, sonuçlara bakıldığında Model-1.1.1, 0.012mm, Model-2.1.1, 0.045 mm, Model-3. 1. 1, 0.070 mm, Model-4.1.1, 0.128 mm ve Model-5. 1. 1, 0.132 mm değerlerine ulaşmışlardır.

Kontak basınç değeri açısından bakıldığında, malzemelerin I bölgeleri maksimum değerlere sahiptir. Sırasıyla Model-1.1.1, Model-2.1.1, Model-3.1.1 Model-4.1.1 ve Model-5.1.1, 100.173 MPa, 24.513 MPa, 21.69 MPa, 10.53 MPa ve 10.58 MPa değerlerine elde edilmiştir.

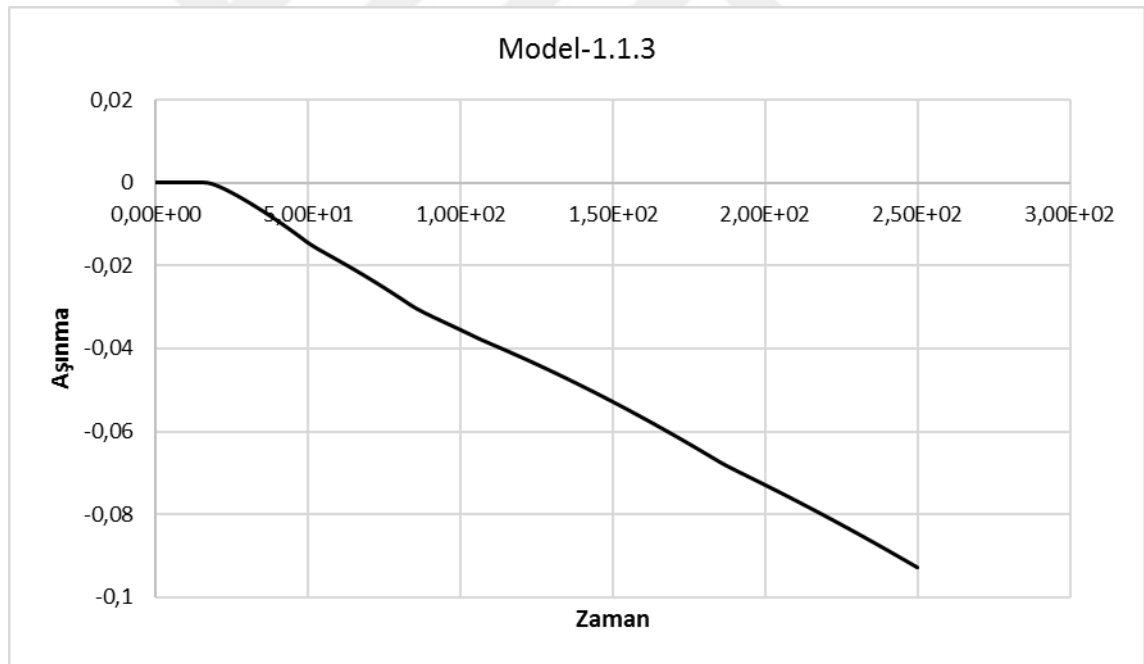
Gerilme değerleri açısından da I bölgesinde maksimum değerler gözlemlenmektedir.

4.5. 75 N Yük Altında Aşınma Davranışı

Modellerin yüksek yükler altında nasıl bir davranış gösterdiklerini incelemek için, farklı alt ve üst malzemelerden oluşan modellere 75N yük uygulanıp ve bu malzemelerin aşınma davranışları incelenmiştir. Bu kapsamda 35 model hazırlanmıştır.

4.5.1. Model-1.1.3, alt malzeme indirek kompozit, üst malzeme zirkonya, 75 N yük

Model-1.1.3'te alt malzeme olarak indirek kompozit ve üst malzeme olarak zirkonya kullanılmıştır. Bu model 75 N yük altında aşındırılmıştır. Aşınma davranışı Şekil 4.61'de verilmiştir.



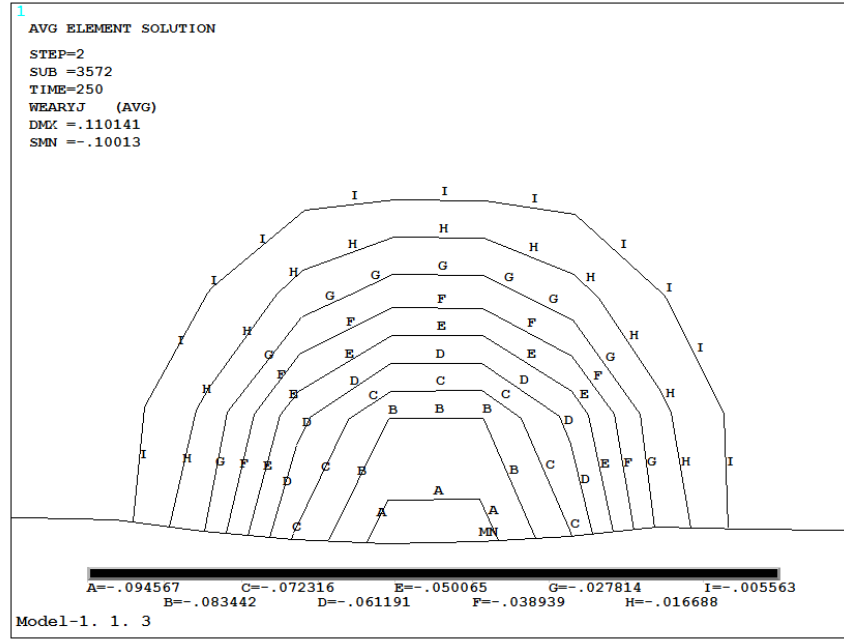
Şekil 4.61. Model-1.1.3'ün aşınma davranışı

İndirek kompozitleri 75 N yükte zirkonya küresi ile aşındırarak, fazla yükün onların aşınmasında etkisi incelenmiştir.

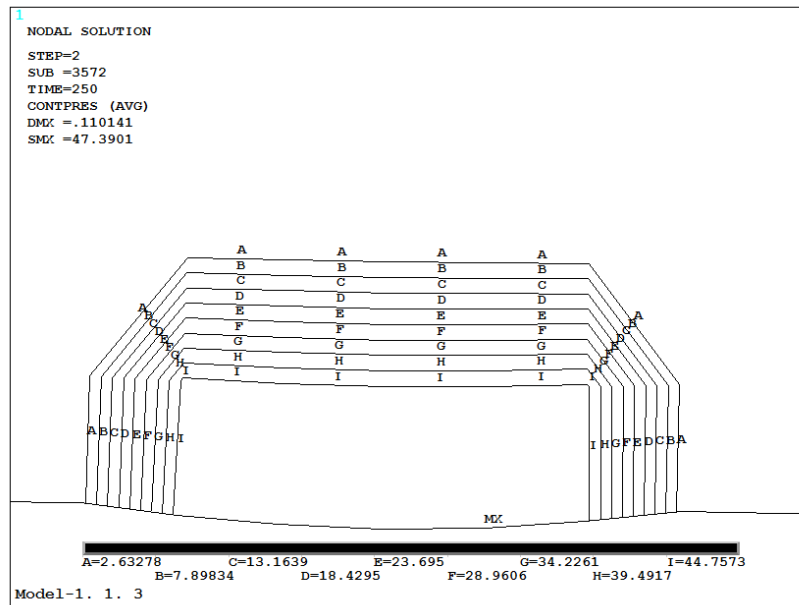
Şekil 4.62'de Model-1.1.3'ün, 75 N yük altındaki eleman aşınma çözümü verilmiştir.

Şekil 4.63'te Model-1.1.3'ün kontak basınç değerleri gösterilmiştir.

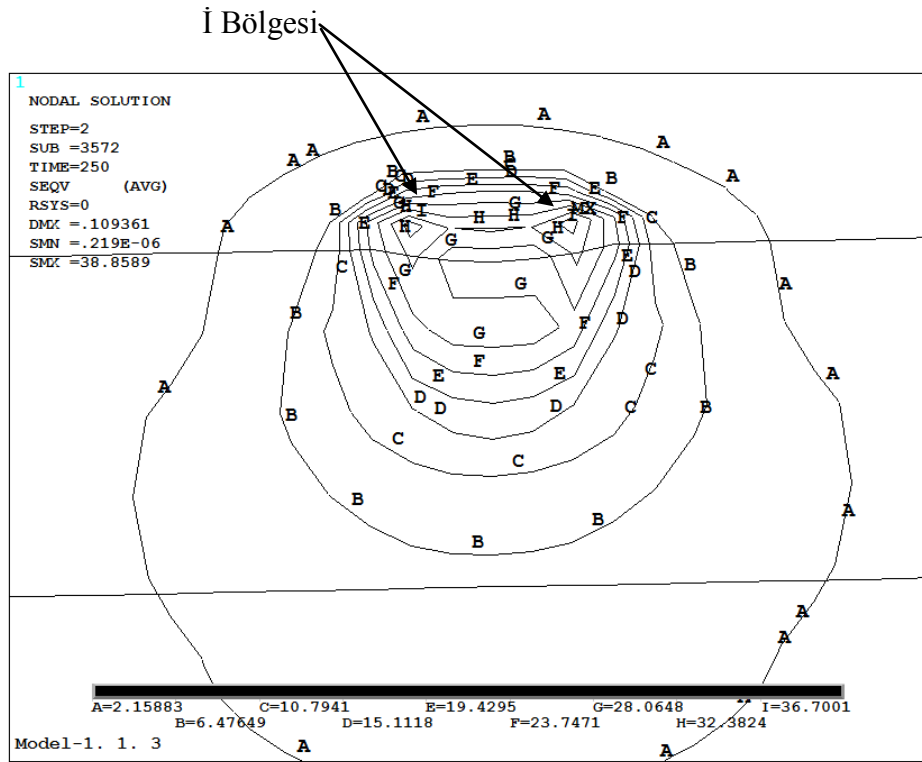
model-1. 1. 3'ün, Von Mises gerilme dağılımı ise Şekil 4.64'te görülmektedir.



Şekil 4.62. Model-1.1.3'ün eleman aşınma çözümü



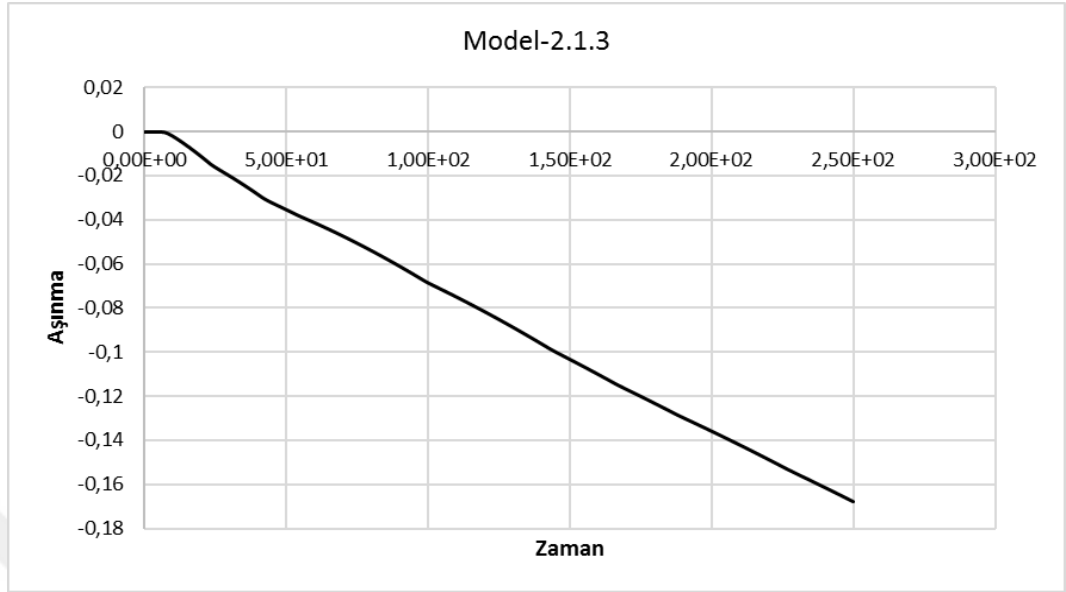
Şekil 4.63. Model-1.1.3'teki kontak basınç



Şekil 4.64. Model-1. 1. 3'teki Von Mises gerilmeleri

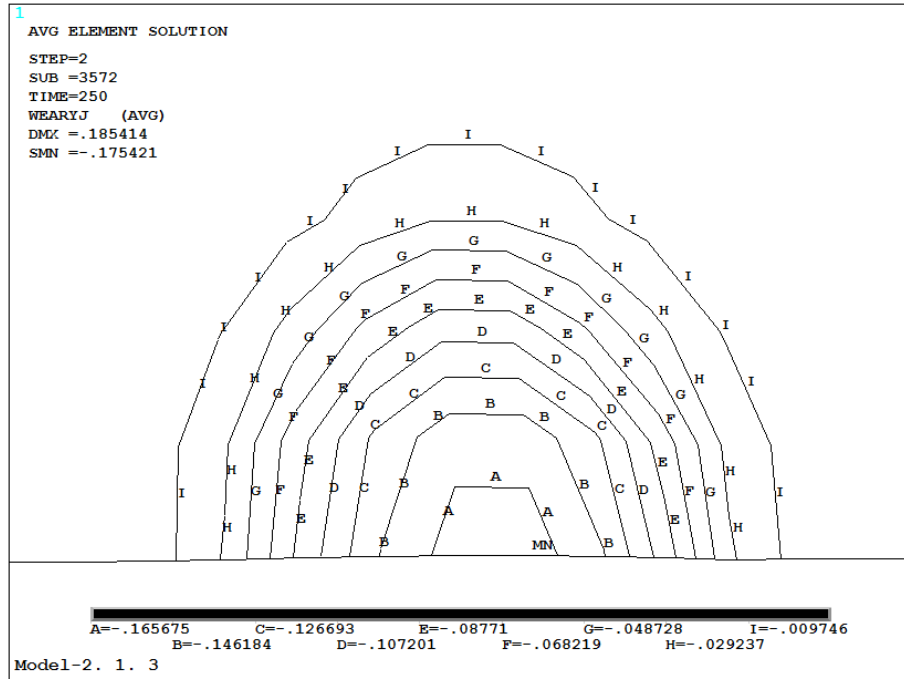
4.5.2. Model-2. 1. 3, alt malzeme nanohibrit

Model-2.1.3'te üst malzeme olarak zirkonya ve alt malzeme olarak Nanohibritler kullanılmıştır bu model 75N yük altında aşınmıştır, aşınma davranışı Şekil 4.65'te gösterilmektedir.

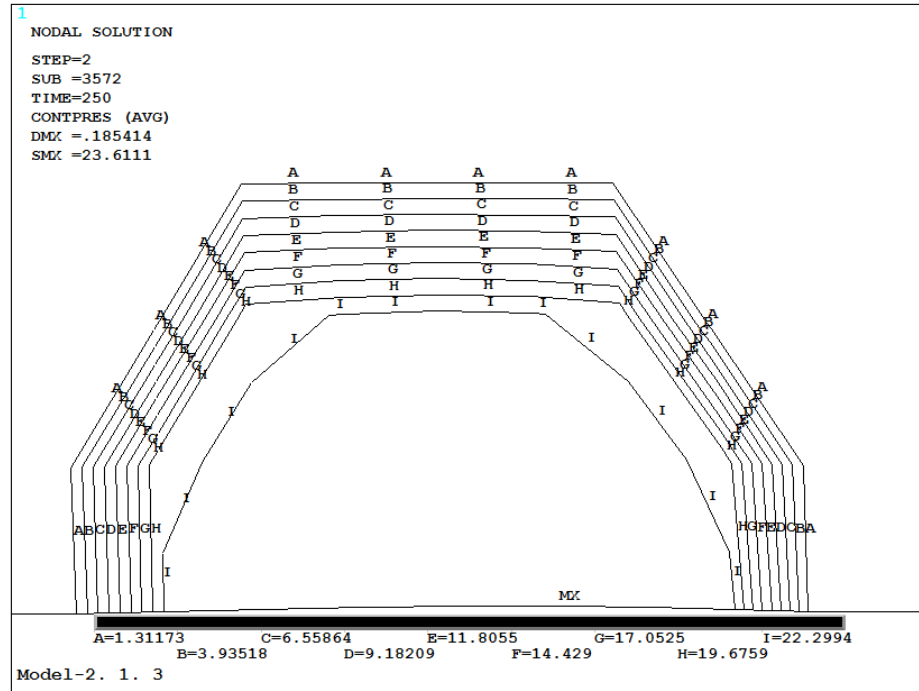


Şekil 4.65. Model-2.1.3'ün aşınma davranışı

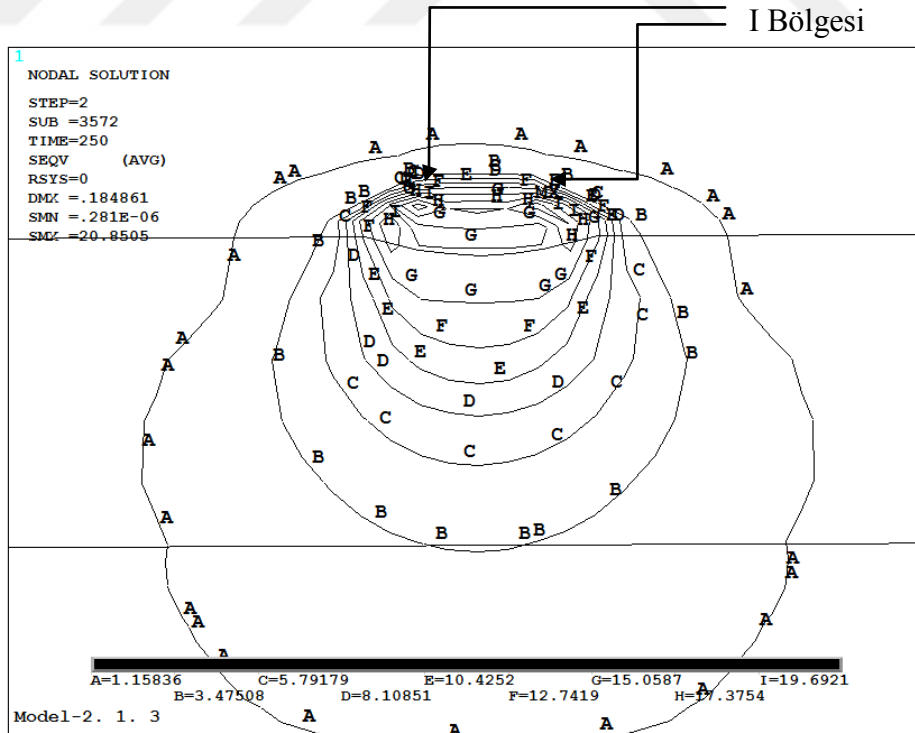
Model-2.1.3'ün, eleman aşınma çözümü Şekil 4.66'da, kontak basıncı Şekil 4.67'de ve Von Mises gerilme dağılımı Şekil 4.68'de gösterilmiştir.



Şekil 4.66. Model-2.1.3'ün eleman aşınma çözümü



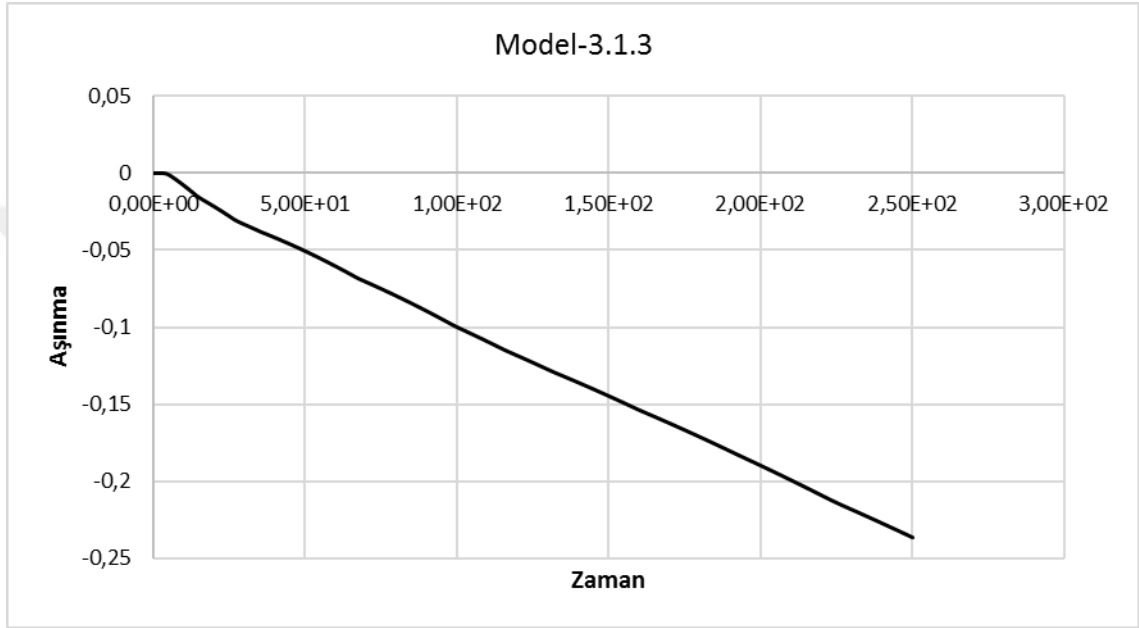
Şekil 4.67. Model-2.1.3'teki kontakt basınç



Şekil 4.68. Model-2.1.3'teki Von Mises gerilmeleri

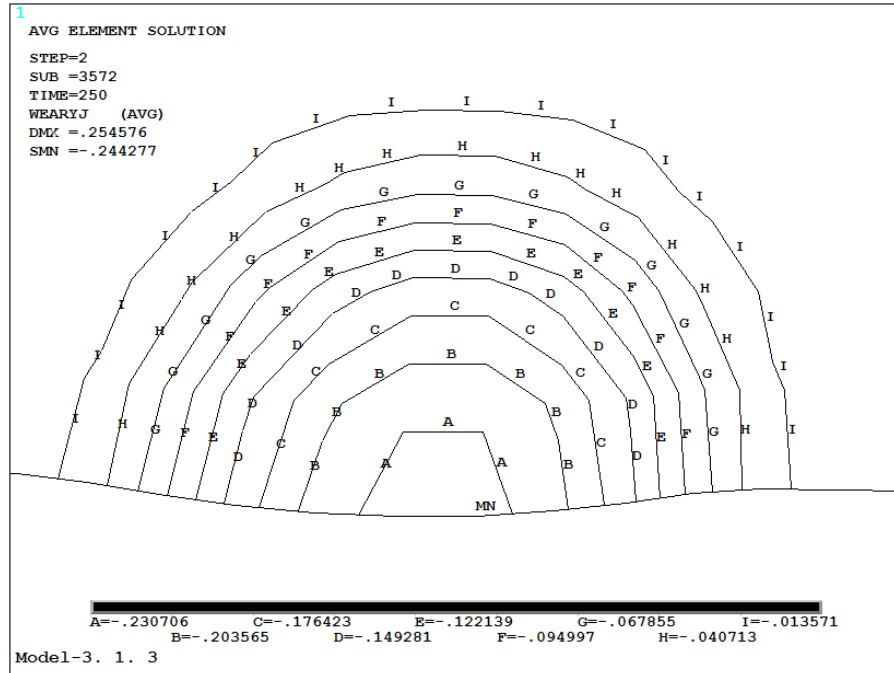
4.5.3. Model-3. 1. 3, alt malzeme mirohibrit

Model-3.1.3 alt malzeme olarak mikrohibritten ve üst malzeme olarak zirkonyadan oluşmuştur. Bu modelin 75 N yükteki aşınma davranışı Şekil 4.69’da sergilenmiştir.

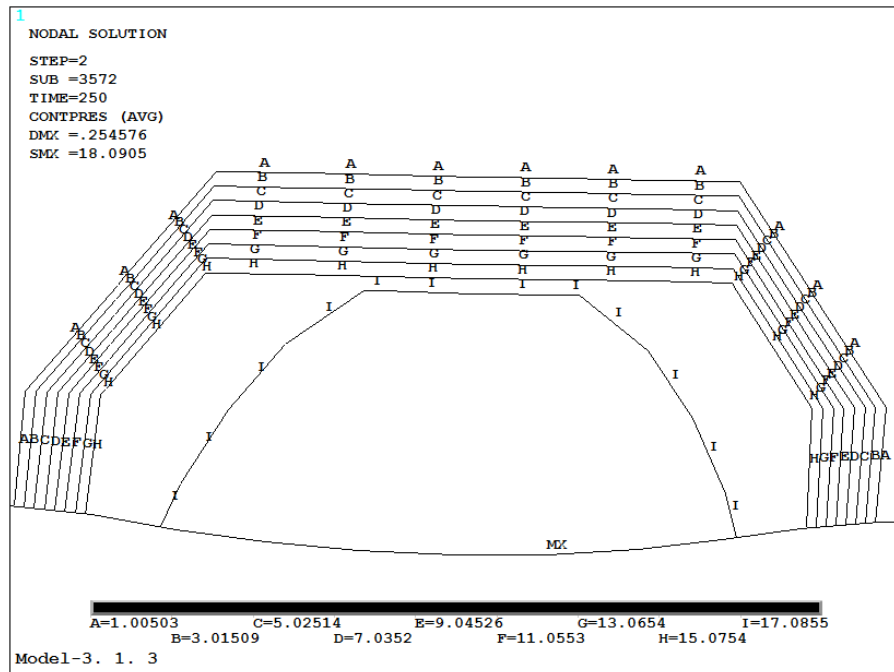


Şekil 4.69. Model-3.1.3’ün aşınma davranışı

Model-3.1.3’ün aşınma çözümü, kontak basıncı ve gerilme dağılımı sırasıyla Şekil 4.70, Şekil 4.71 ve Şekil 4.72’de verilmiştir.

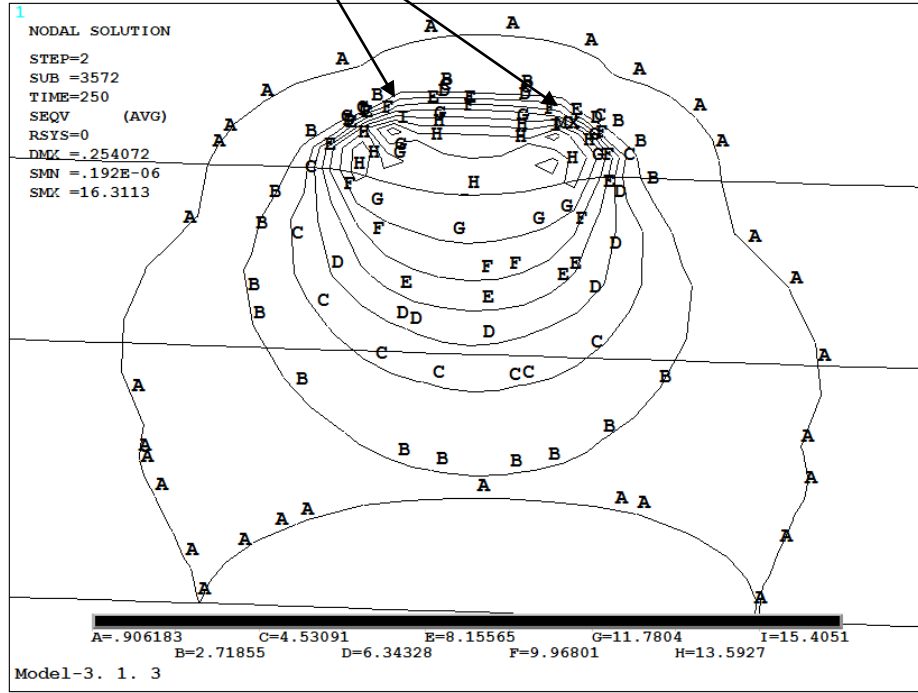


Şekil 4.70. Model-3.1.3'ün eleman aşınma çözümü



Şekil 4.71. Model-3.1.3'teki kontakt basınç

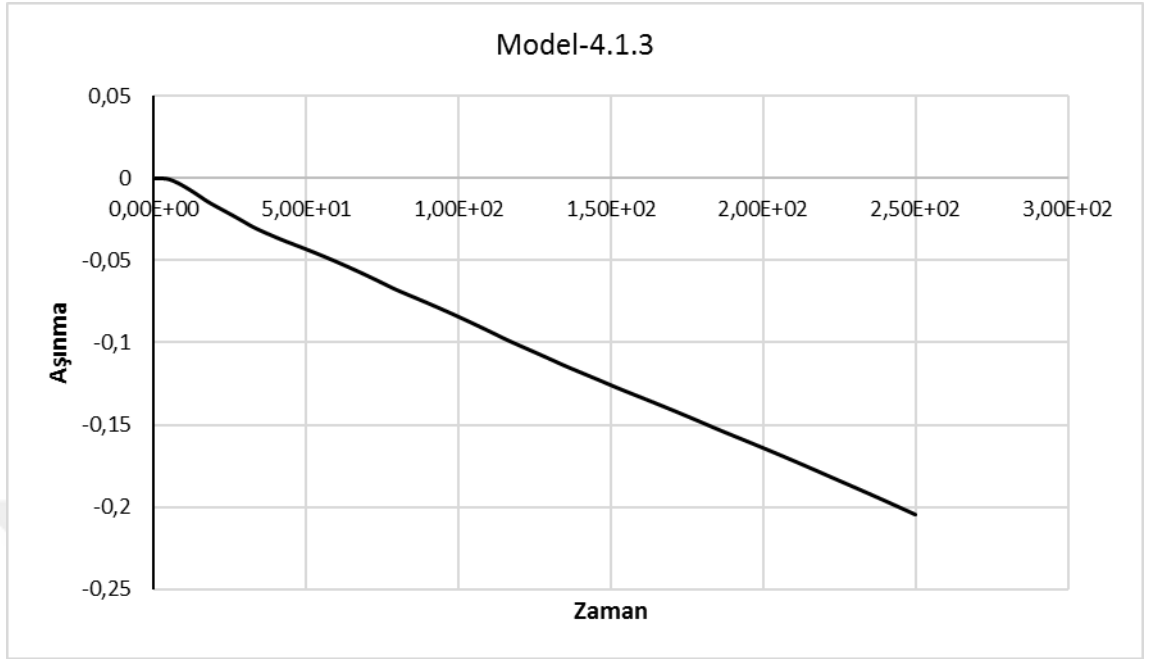
I Bölgesi



Şekil 4.72. Model-3.1.3'teki Von Mises gerilmeleri

4.5.4. Model-4.1.3, alt malzeme feldspatik

Model-4.1.3'te alt malzeme olarak feldspatik ve üst malzeme olarak zirkonya kullanılmıştır bu modelin aşınma davranışı Şekil 4.73'de gösterilmiştir.

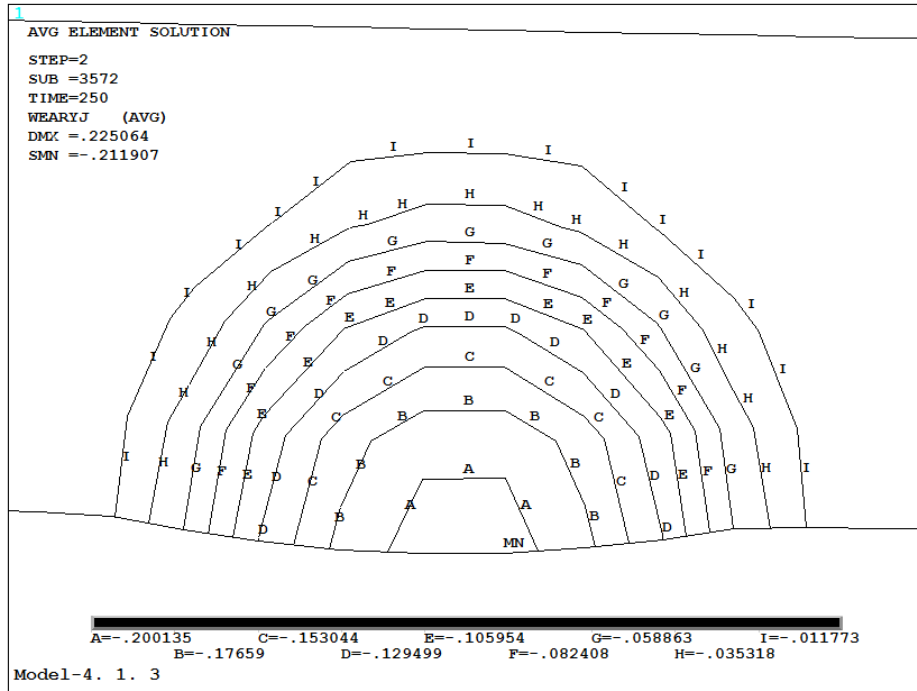


Şekil 4.73. Model-4.1.3'ün aşınma davranışı

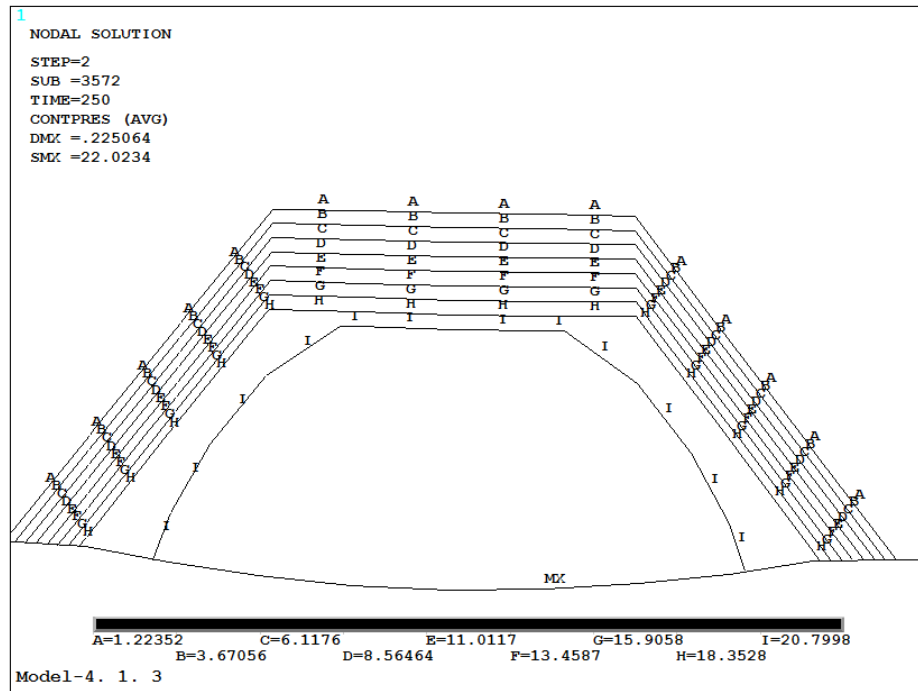
Model-4.1.3'ün aşınma çözümü Şekil 4.74'te verilmiştir. A bölgesinde 0.20mm aşınma ile diğer bölgelere göre en büyük aşınma değeri görülmektedir.

Model-4.1.3'ün kontak basıncı Şekil 4.75'te verilmiştir. I bölgesi haricinde diğer bölgelerde kontakt basınç daha yakın bir şekilde dağılmıştır.

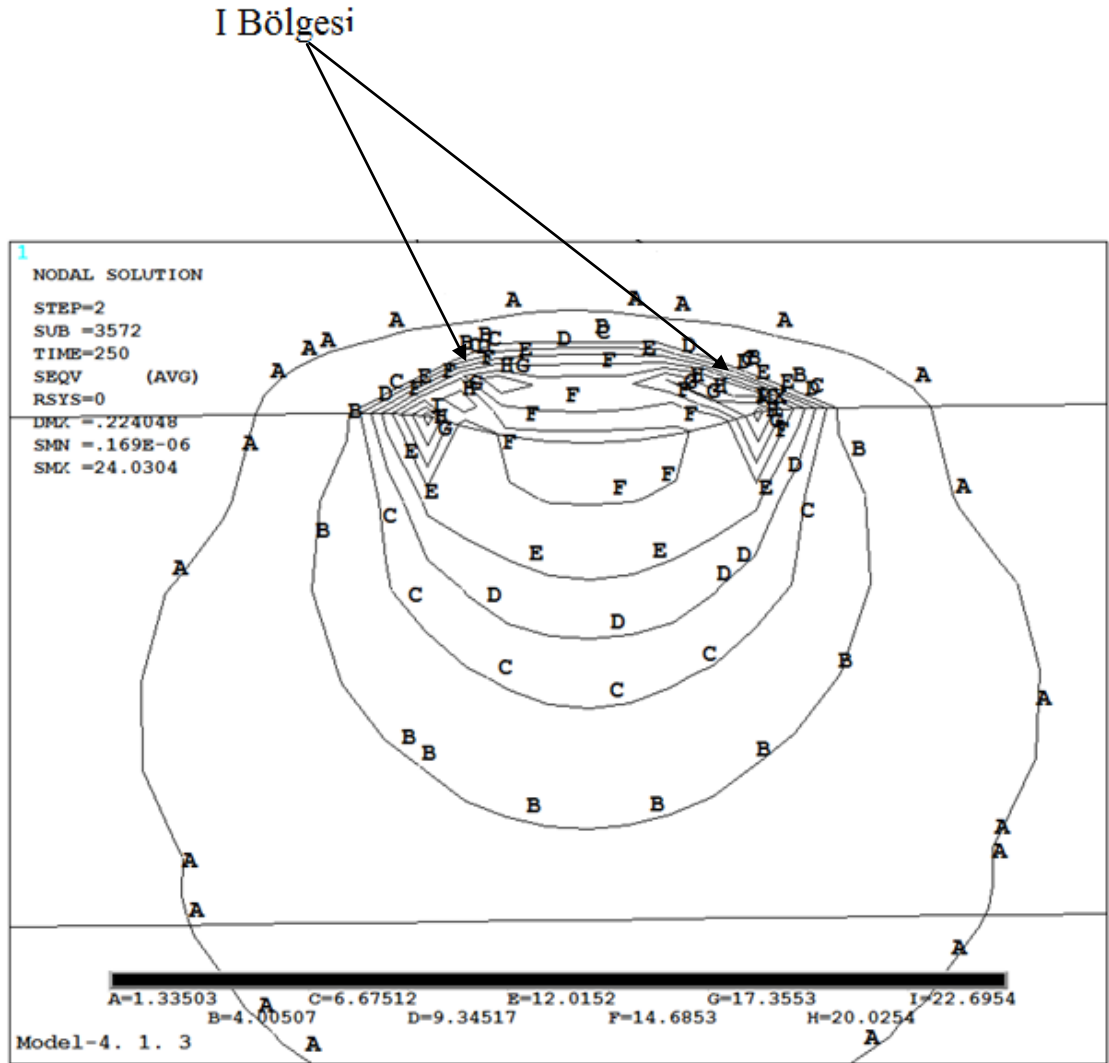
Model-4.1.3'ün Von Mises gerilmesi Şekil 4.76'da açıklanmıştır. I bölgesi gerilmenin en çok yığılan bölgesidir.



Şekil 4.74. Model-4.1.3'ün eleman aşınma çözümü



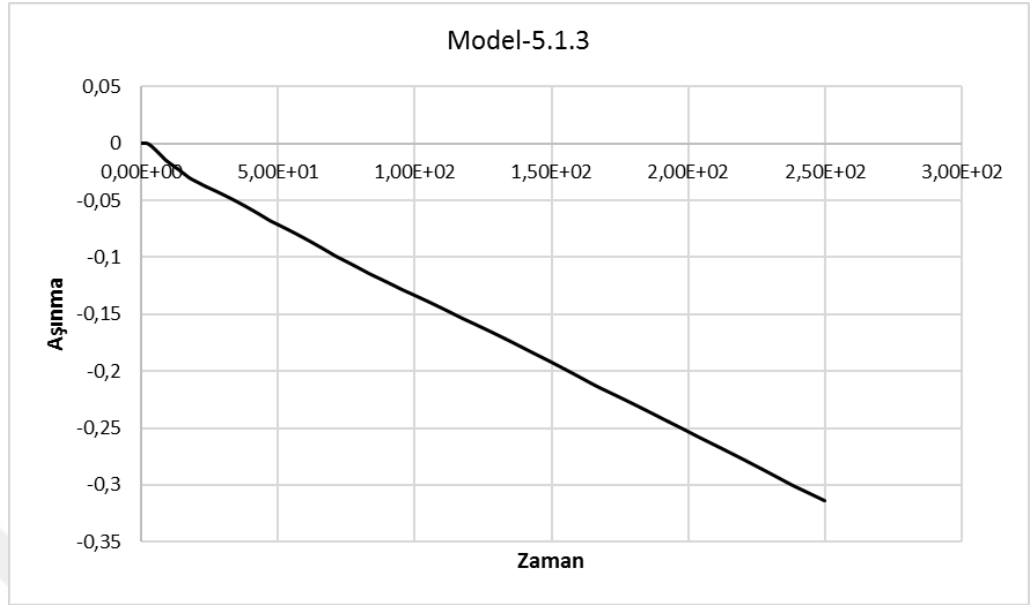
Şekil 4.75. Model-4.1.3'teki kontakt basınç



Şekil 4.76. Model-4. 1. 3'teki Von Mises gerilmeleri

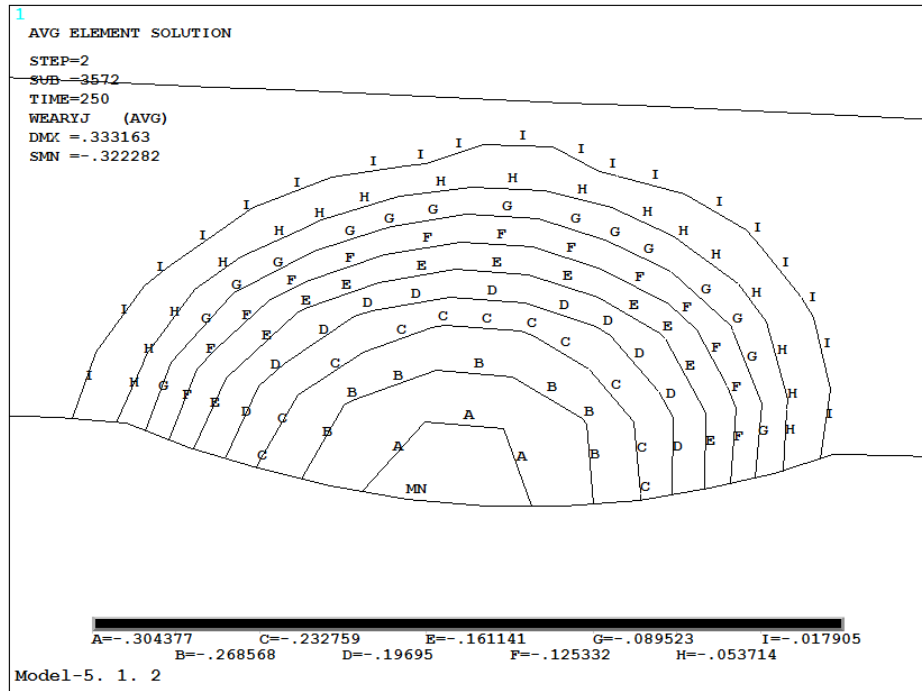
4.5.5. Model-5. 1. 3, alt malzeme rezin nano seramik

Model-5.1.3'te alt malzeme olarak rezin nano seramik ve üst malzeme olarak zirkonya kullanılmıştır bu modelin aşınma davranışı Şekil 4.77'de görülmektedir.

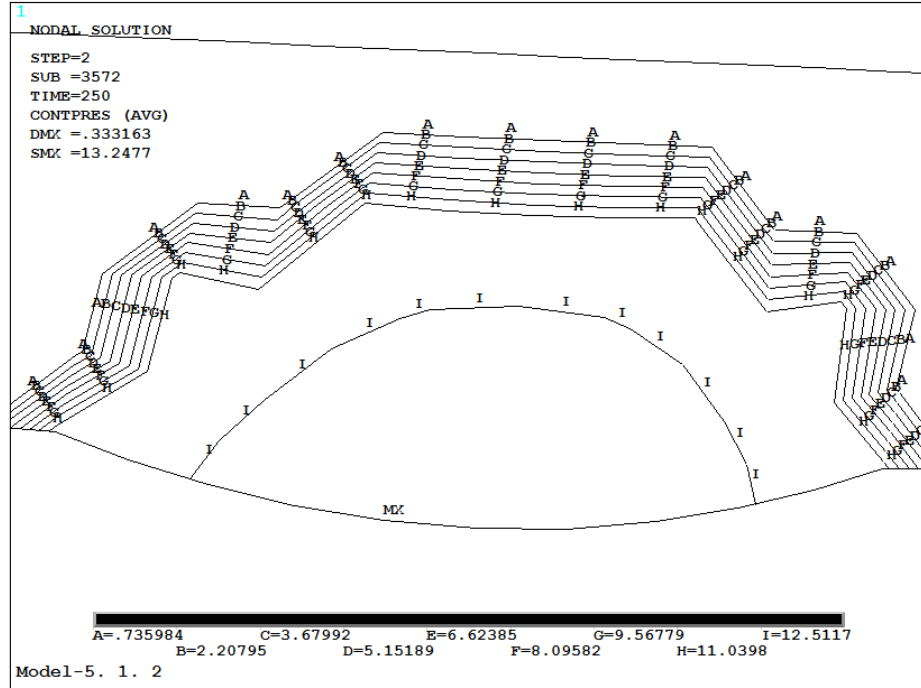


Şekil 4.77. Model-5.1.3'ün aşınma davranışı

Model-5.1.3'ün aşınma çözümü Şekil 4.78, kontak basıncı Şekil 4.79 ve Von Mises gerilme dağılımı 4.80'da verilmiştir.

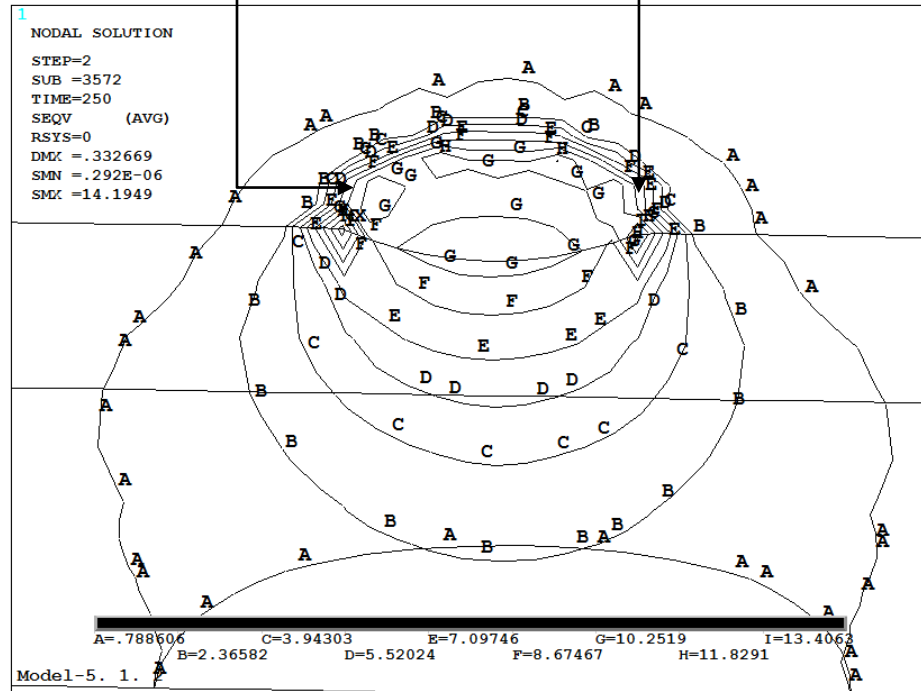


Şekil 4.78. Model-5.1.3'ün eleman aşınma çözümü



Şekil 4.79. Model-5.1.3'teki kontakt basınç

I Bölgesi



Şekil 4.80. Model-5.1.3'teki Von Mises gerilmeleri

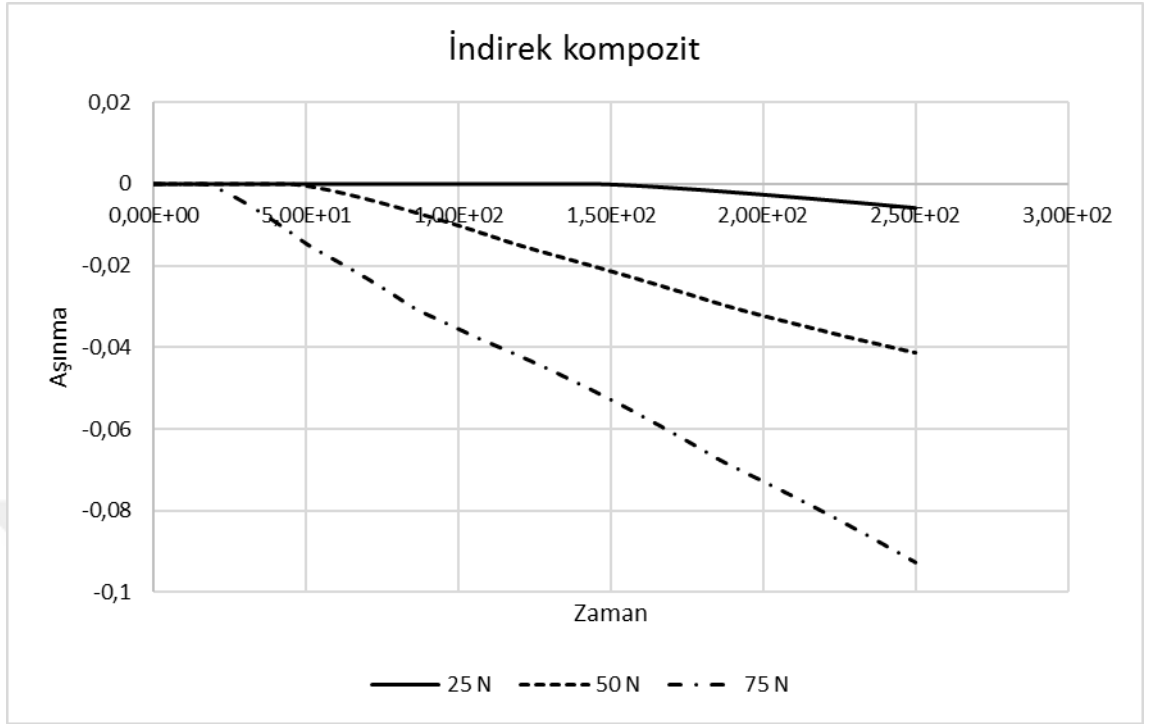
Bu sonuçlara göre 75 N yükte yapılan çözümlerden elde edilen sonuçlara göre, aşınma analizi olarak bakıldığında A bölgelerinde tüm malzemeler en yüksek aşınma değerlerine sahiptir. Ancak bu değer Model-1.1.3 için 0.10 mm iken sırasıyla Model-2.1.3 için 0.17 mm, Model-3.1.3 için 0.24 mm, Model-4.1.3 için 0.21 mm ve Model-5.1.3 için 0.32 mm değerine ulaşmıştır.

I bölgeleri en yüksek kontak basıncının olduğu yer olarak görülmektedir. En büyük kontak basınç, 47.39 MPa değeri ile Model-1.1.3'e aitken, 23.61 MPa Model-2. 1. 3'e, 18,09 MPa Model-3.1.3'e, 22.02 MPa Model-4.1.3'e ve 13.24 MPa Model-5.1.3'e aittir.

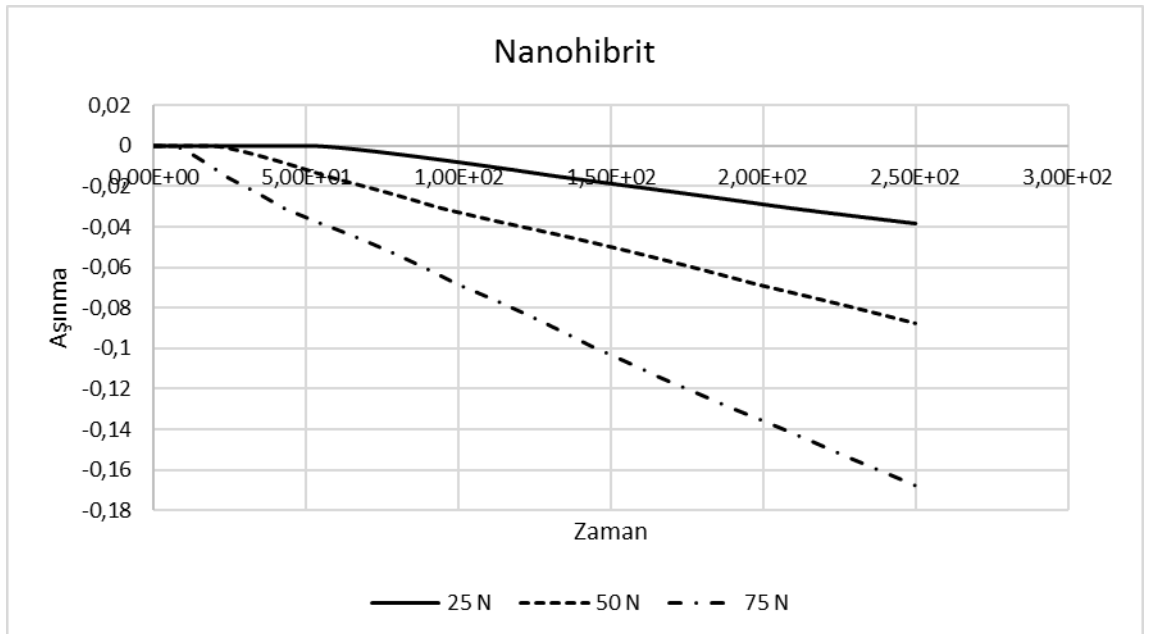
Von Mises gerilme açısından incelendiğinde I bölgeleri yine maksimum değere ulaşan bölgeler olarak görülmektedir. Burada da sırasıyla 38.85 MPa, 20.95 MPa, 16.31 MPa, 24.93 MPa ve 14.19 MPa Model-1.1.3, Model-2.1.3, Model-3.1.3, Model-4.1.3 ve model-5.1.3 aittir.

İndirek kompozitler, Nanohibritler, Mikrohibritler, Feldespatikler ve Rezin nanoseramiklerin, farklı yükler altındaki aşınma davranışları Şekil 4.81 - 4.85'te gösterilmiştir. Yük artışı aşınma artışına sebep olmaktadır.

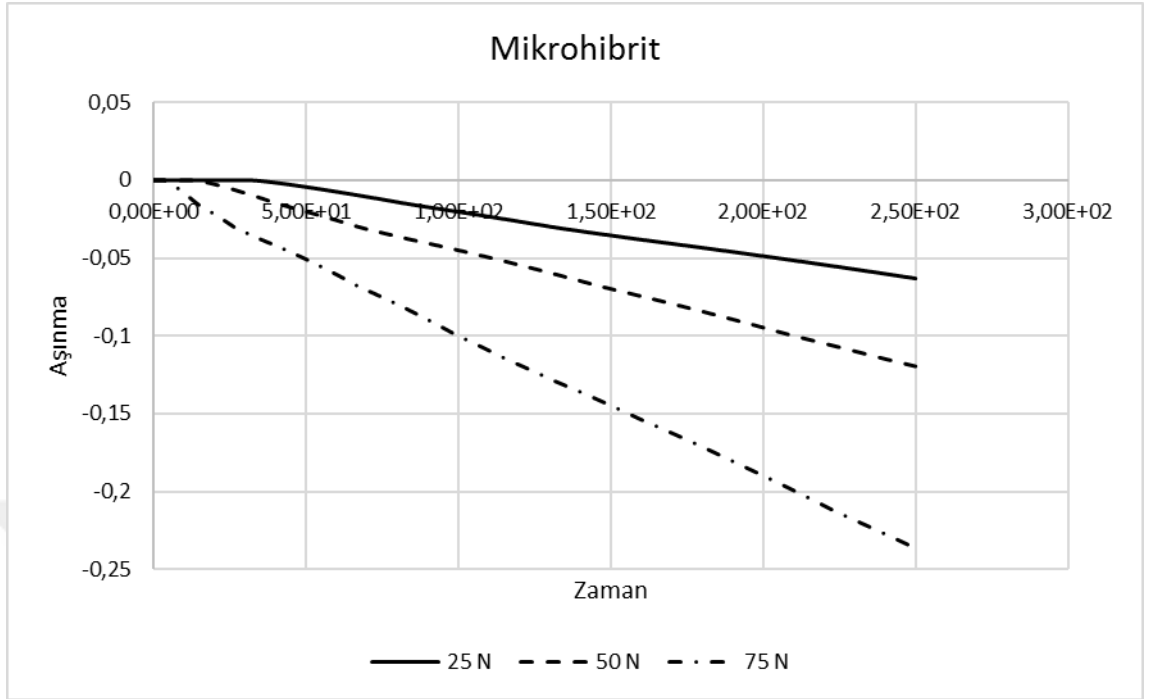
Aşınma sırasında yük artışına bağlı olarak aşınma yüzeylerindeki pürüzlerde meydana gelen plastik deformasyon miktarı da artar. Bu da sürtünmeyi artırıcı yönde etki yapar. Ayrıca yük artışına bağlı olarak aşınma sırasında meydana gelen ısı artışı miktarı, malzemenin yumuşamasına ve dolayısıyla aşınma miktarının artmasına sebep olmaktadır.



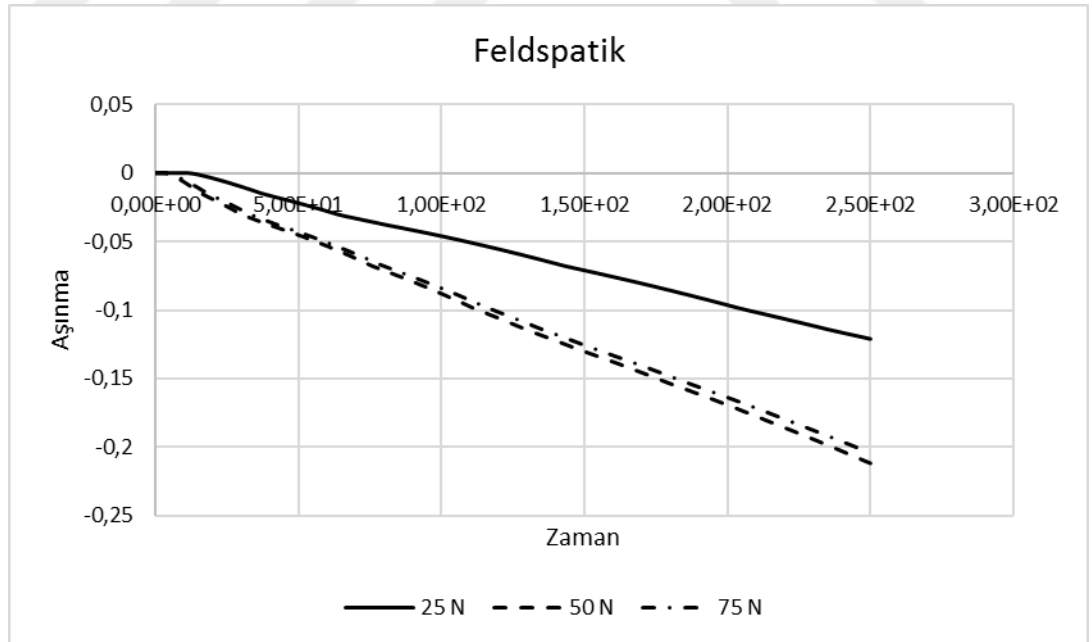
Şekil 4.81. İndirek kompozitlerin; 25 N, 50 N, 75 N yük altındaki aşınma davranışları



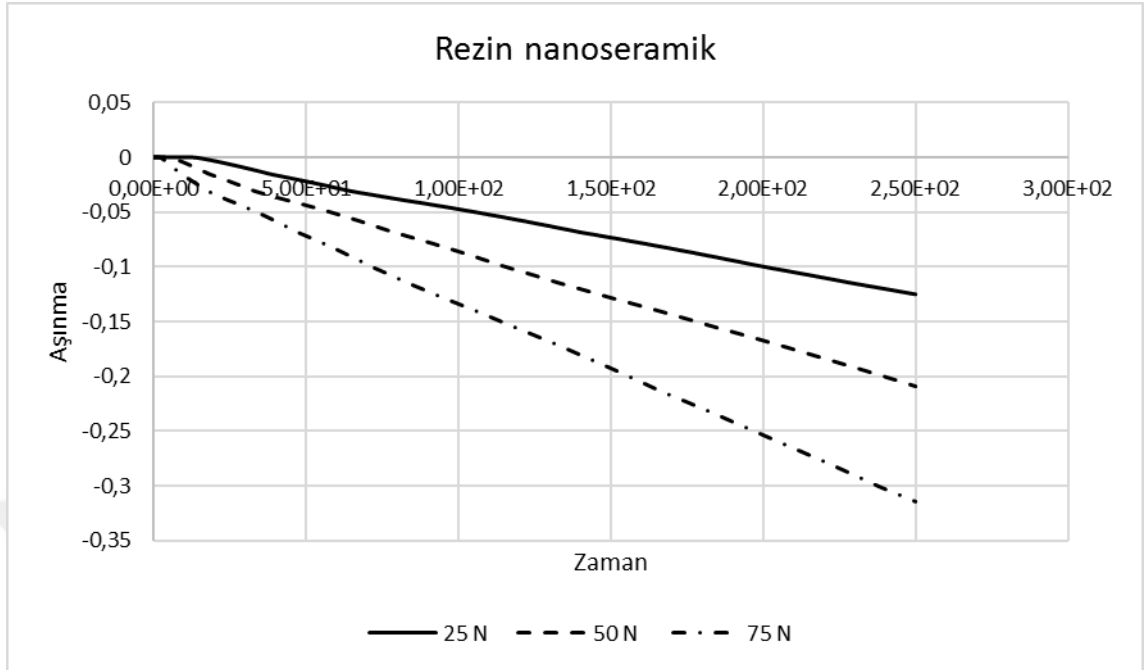
Şekil 4.82. Nanohibritlerin; 25 N, 50 N, 75 N yük altındaki aşınma davranışları



Şekil 4.83. Mikrohibritlerin; 25 N, 50 N, 75 N yük altındaki aşınma davranışları



Şekil 4.84. Feldspatiklerin; 25 N, 50 N, 75 N yük altındaki aşınma davranışları



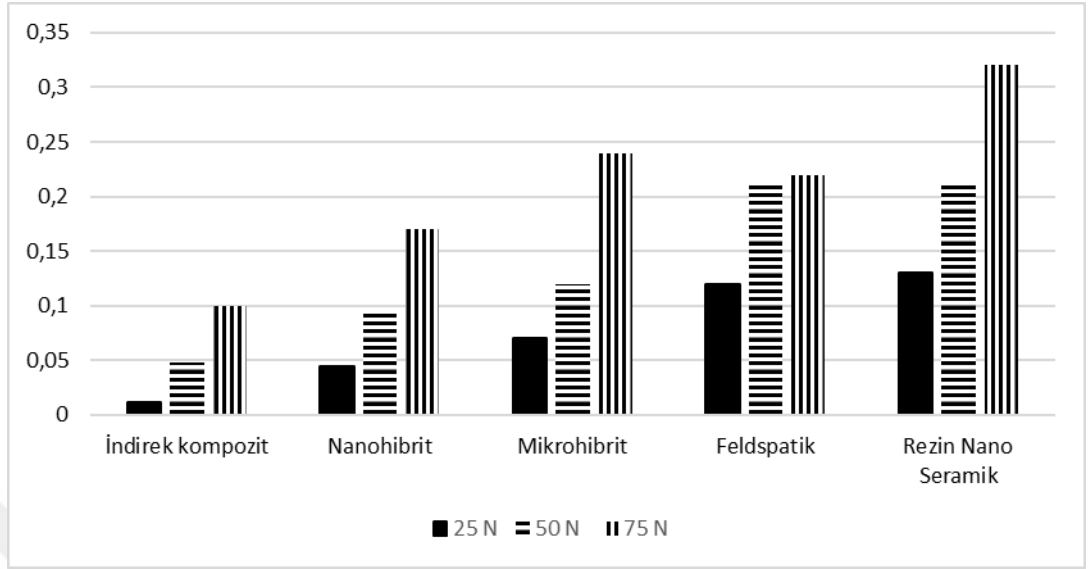
Şekil 4.85. Rezin nanoseramiklerin; 25 N, 50 N, 75 N yük altındaki aşınma davranışları

Şekil 4.86 yükün aşınmaya olan etkisini göstermektedir. Tüm malzemeler yükün artışı ile daha fazla aşınmaya maruz kalmaktadırlar. Ayrıca farklı yükler(25,50,75N) altında İndirek kompozitler, Nanohibritler, Mikrohibritler, Rezin nanoseramikler ve feldespatikler sırasıyla aşınmaya karşı daha iyi bir performans sergilemektedirler.

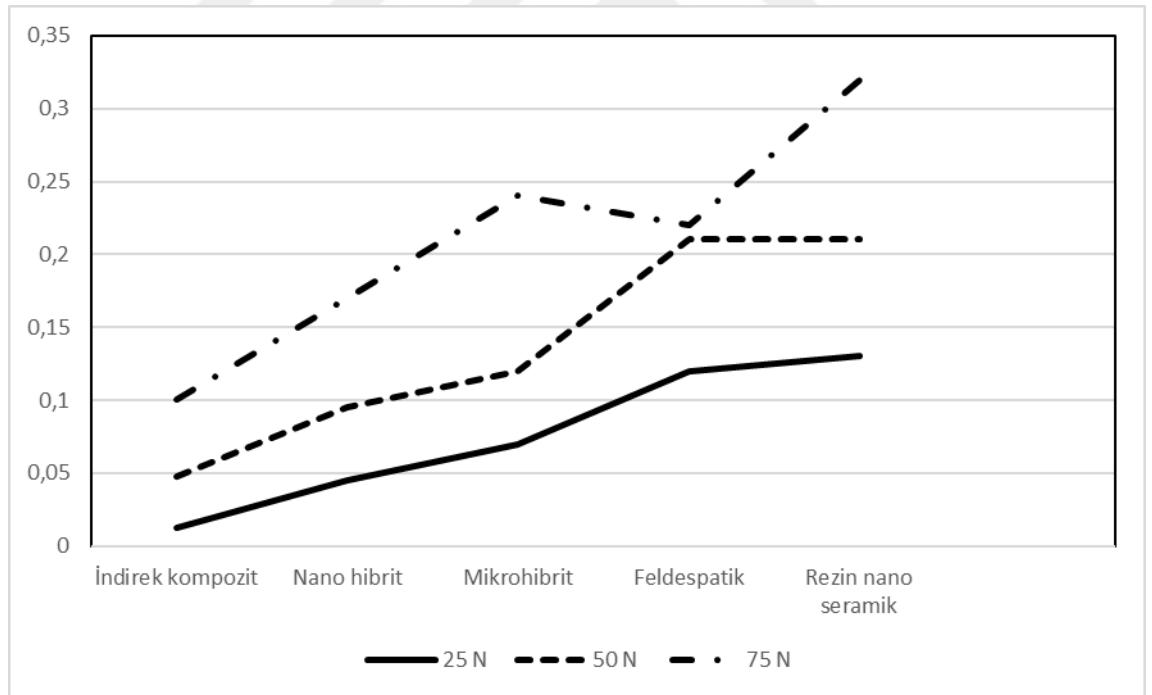
Yük değişimi açısından aşınma oranı, İndirek kompozitler ve Nanohibritler diğer malzemelere göre daha az etki göstermişlerdir (Şekil 4.87).

Şekil 4.88’de malzemelerin 25 N- 50 N’a ve 50 N-75 N’a çıkarıldıktan sonra aşınma oranındaki değişimi gösterilmiştir. Görüldüğü gibi tüm malzemelerde 25 N’dan 50 N’a geçişte malzemeler daha çok aşınmaya maruz kalmışlardır. İndirek kompozitlerin değişim oranları minimumken, Rezin nanoseramiklerin maksimuma ulaştığı gözlenmiştir.

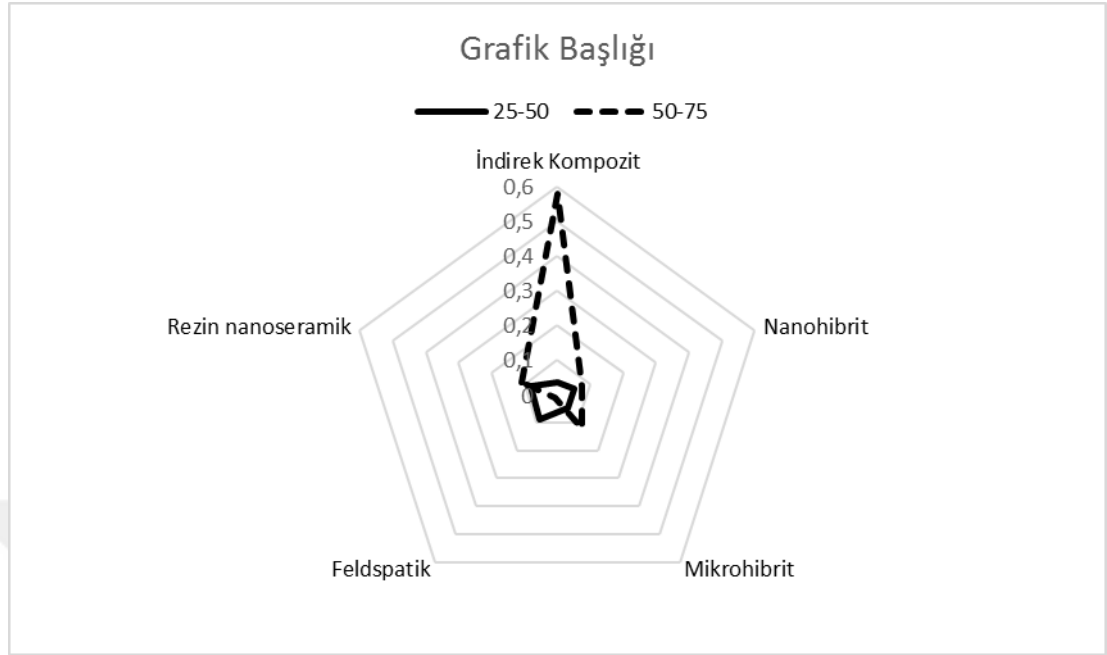
Genel olarak yapılan çalışmalarda yükün artması aşınma direncini azaltmakta ve sürtünme katsayısını artırmaktadır.



Şekil 4.86. Yükün aşınmaya olan etkisi



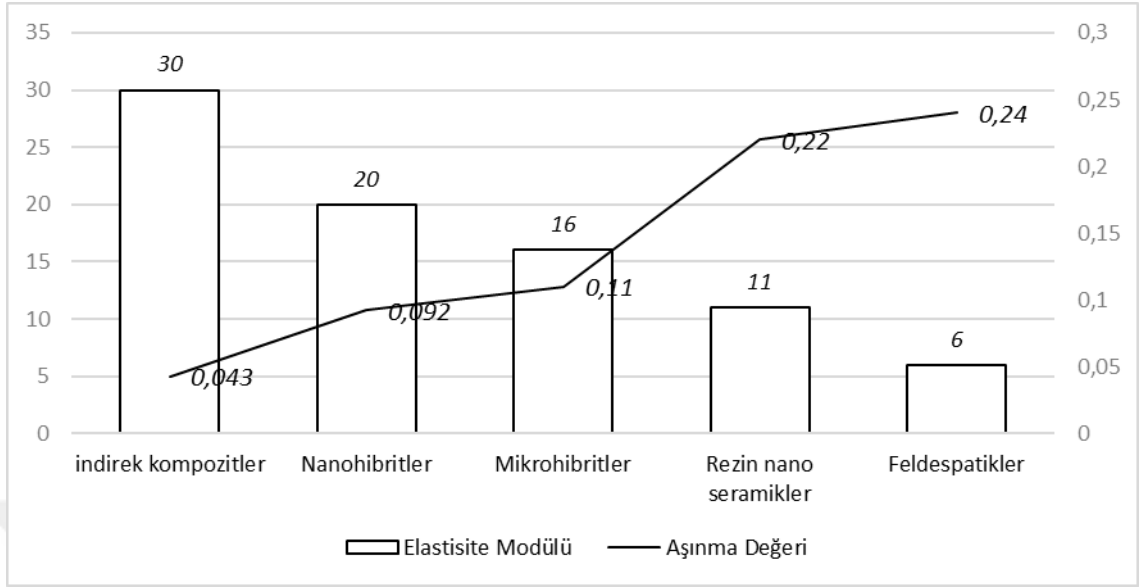
Şekil 4.87. Malzemelerin; 25 N, 50 N, 75 N yükteki aşınma davranışı



Şekil 4.88. Malzemelerin; 25 N- 50 N ve 50 N- 75 N yüklerin artırılmasından sonra aşınma oranlarının değişimi

Şekil 4.89 Elastisite modülü ve aşınma arasındaki ilişkiyi göstermektedir, elastisite modülü yüksek olan malzemelerin aşınma için daha dayanıklı oldukları söylenebilir. Analizlere göre İndirek kompozitler daha yüksek elastisite modülüne sahip olup aşınma dayanımları daha yüksektir. Feldspatikler ise daha düşük elastisite modülü ile daha yüksek aşınmaya maruz kalmışlardır. Literatür araştırmalarında bunun yanısıra aşınmadan sonra elastisite modülünün düşmeside vurgulanmıştır (Pongprueksa 2008).

Elastiklik modülünün, malzemenin aşınma derecesi üzerinde belirgin bir etkisi vardır şöyle ki elastiklik modülünün artışı, eş kopma mukavemetli malzemelerde artışa neden olmaktadır. Elastikiyet modülü ile aşınma derecesi arasında kesin ilişkinin deneysel olarak saptanması zordur zira aşınma sadece elastisite modülü değil bir çok faktöre bağlıdır.

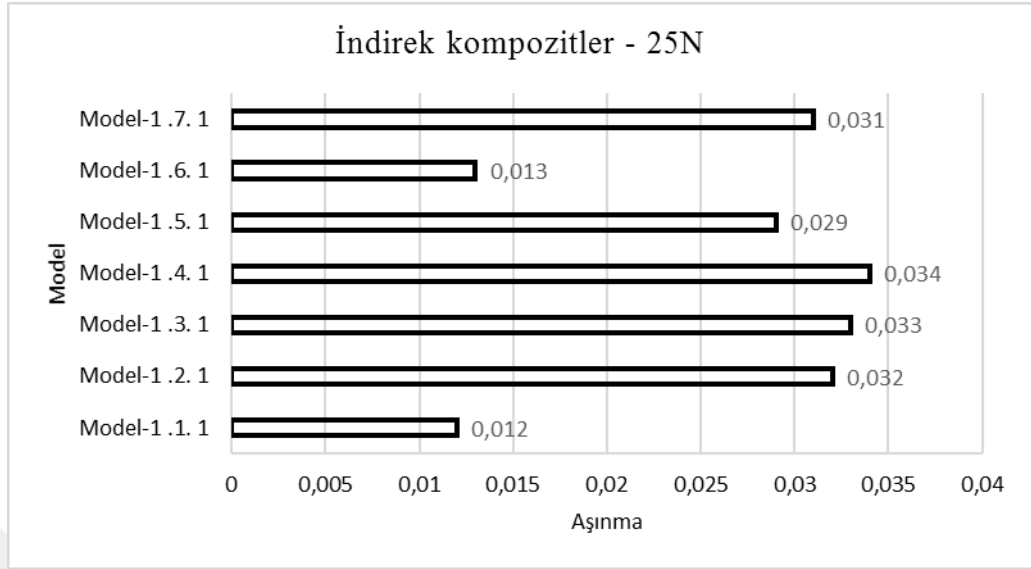


Şekil 4.89. Elastisite modülü ile aşınma arasındaki ilişki

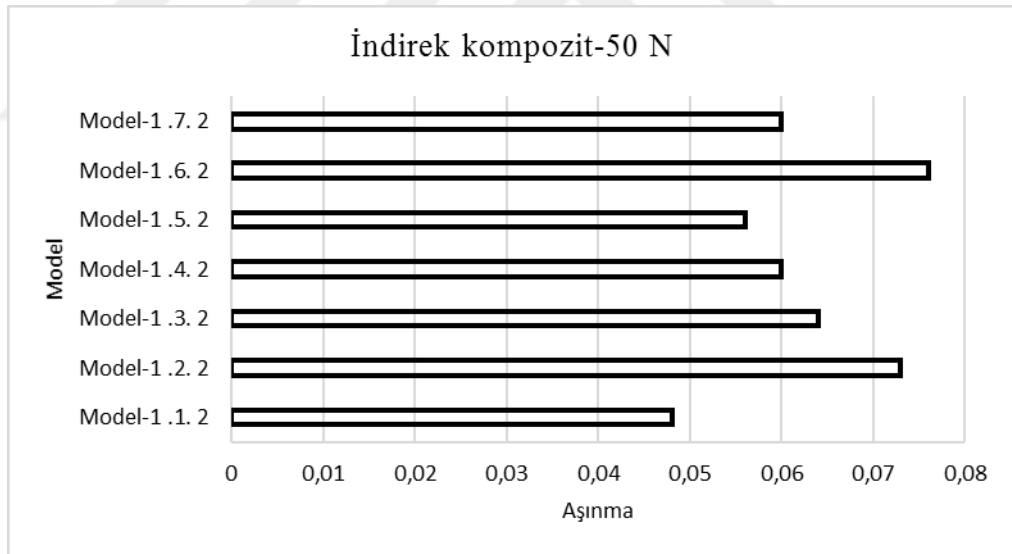
Bölüm 4.4’de belirtildiği gibi, bu çalışma kapsamında toplam 105 model hazırlanmıştır. Modellerde indirek kompozit, nanohibrit, mikrohibrit, feldspatik ve rezin nanoseraamik alt veya taban malzeme olarak kullanılmıştır. Bu modellerde Zirkonya, dentin (insan doğal dişi), indirek kompozitler, nanohibritler, mikrohibritler, feldspatikler ve rezin nano seramikler üst veya aşındırıcı olarak kullanılmıştır. Modellere 3 farklı yük uygulanarak aşınma davranışları incelenmiştir. Başka bir değişle insan diş restorasyonuna uygun alt ve üst diş olarak dolgu – dolgu ve dolgu – doğal diş modelleri hazırlanmıştır.

Şekil 4.90’da alt malzeme olarak İndirek kompozitleri kullananıldığı modellerde 25N yük altında aşınma değerleri verilmiştir. Bu şekile göre Model-1.1.1 en az aşınma değeri ve Model-1.4.1 en yüksek aşınma değerine sahiptir. Başka bir değişle 25 N yük uygulandığında, alt malzemesi indirek kompozit olan modeller sırasıyla üst malzemeleri zirkonya, feldspatik, mikrohibrit, rezin nanoseraamik, dentin, indirek kompozit ve nanohibrit olarak daha iyi bir aşınma performansı göstermektedir.

Şekil 4. 91’de ise indirek kompozitleri alt malzeme olarak kullanan modellerin 50N yük altındaki aşınma değerleri verilmiştir. Görüldüğü gibi aşınma açısından Model-1.1.2 diğerlerine göre daha iyi bir performans göstermiştir.

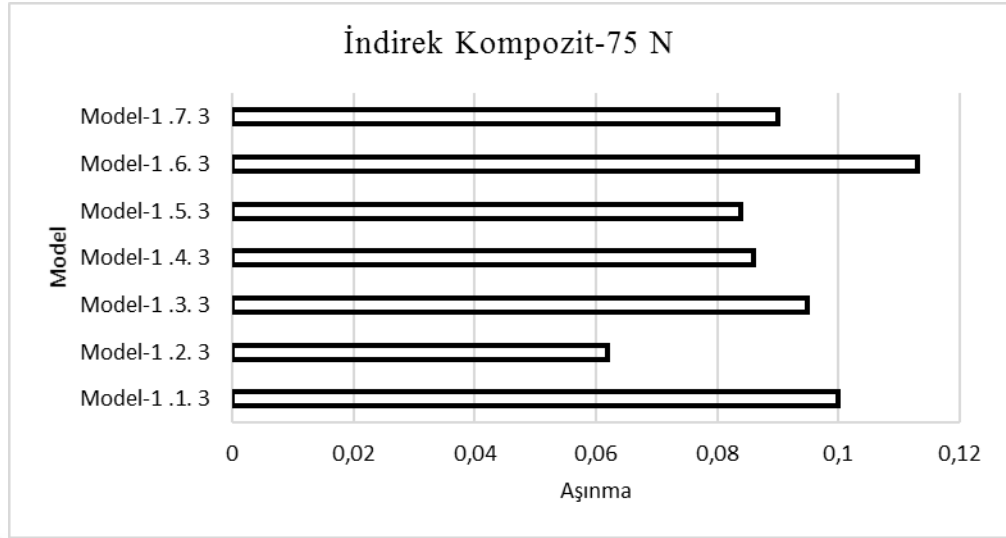


Şekil 4.90. Alt malzeme olarak İndirek kompozitleri kullanıldığı modellerin 25N yük altında aşınma değerleri



Şekil 4.91. Alt malzeme olarak İndirek kompozitlerin kullanıldığı modellerin 50N yük altında aşınma değerleri

Alt restorasyonu indirek komozit olarak kullanırken ve 75N yük uygulanınca en iyi performans Model-1.2.3'e aittir. Başka bir değimle alt dolgu indirek kompozitken yüksek yüklerde dentin veya insan dişi aşınmaya karşı en iyi performansı göstermiştir Şekil 4. 92.

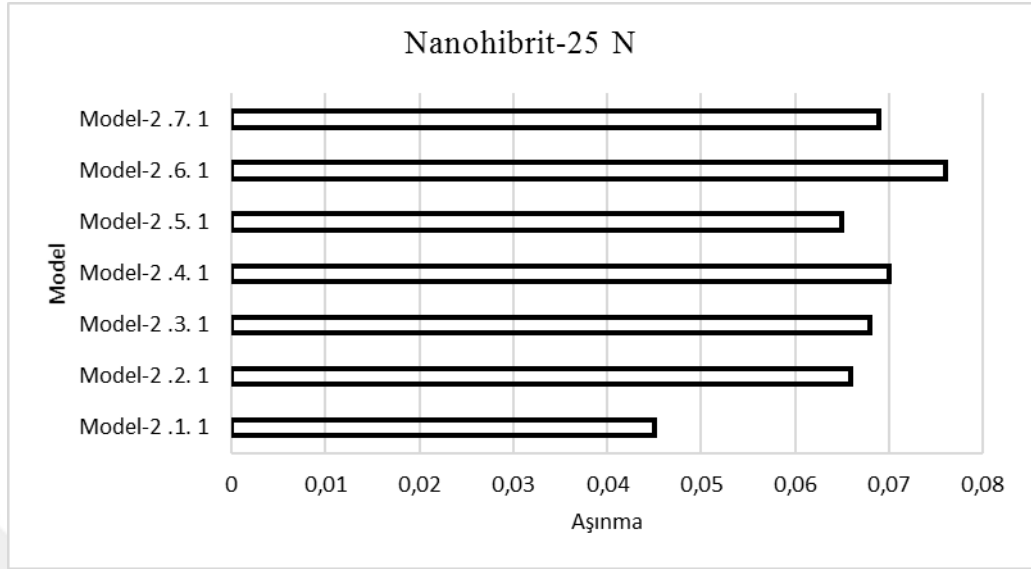


Şekil 4.92. Alt malzeme olarak İndirek kompozitlerin kullanıldığı modellerin 75N yük altında aşınma değerleri

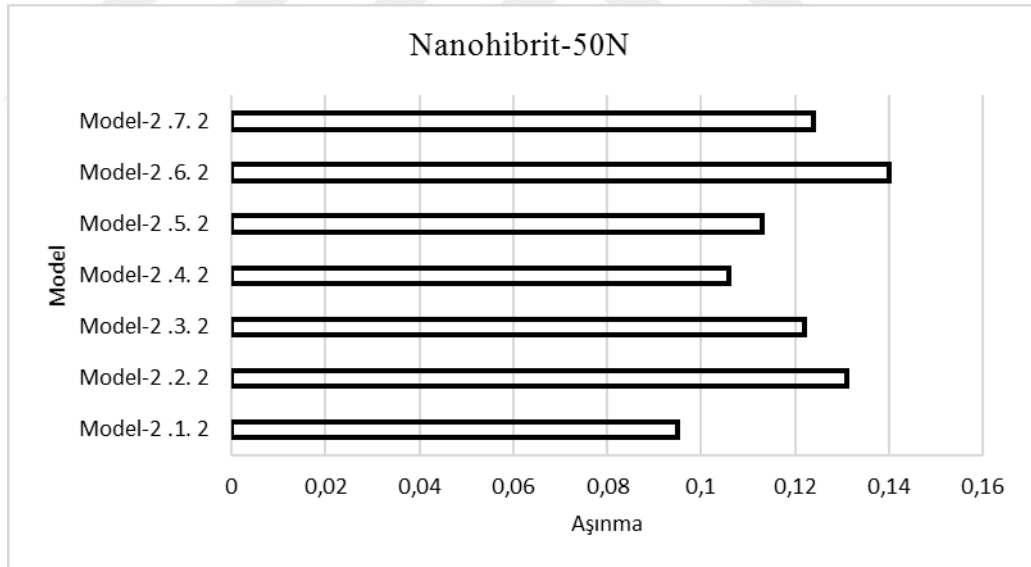
Şekil 4.93'te Nanohibritleri alt malzeme olarak kullanan ve 25N yük uygulanan modellerin aşınma değerleri verilmiştir. Model-2.1.1 en iyi aşınma performansına sahip olmuştur.

Alt restorasyon malzemesini nanohibrit olarak kullanıldığında ve 50N yük uygulandığında Model-2.1.1 diğerlerine göre daha yüksek aşınma dayanımına sahiptir Şekil 4.94.

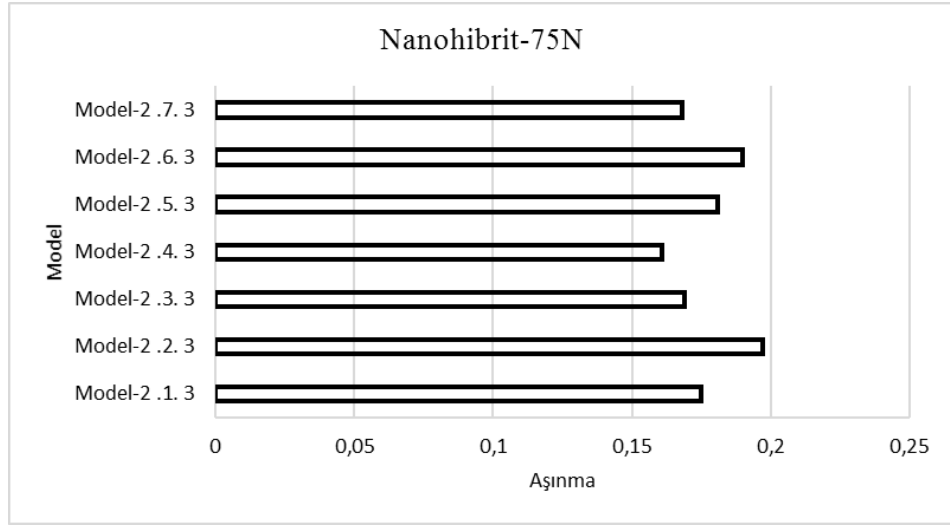
Taban malzemeyi nano hibrit olarak kullandığında ve 75 N yük uygulanınca Model-2.4.3 diğerlerine göre daha az aşınmıştır Şekil 4.95.



Şekil 4.93. Alt malzeme olarak Nano hibritleri kullandığı modellerin 25N yük altında aşınma değerleri



Şekil 4.94. Alt malzeme olarak Nano hibritleri kullandığı modellerin 50N yük altında aşınma değerleri

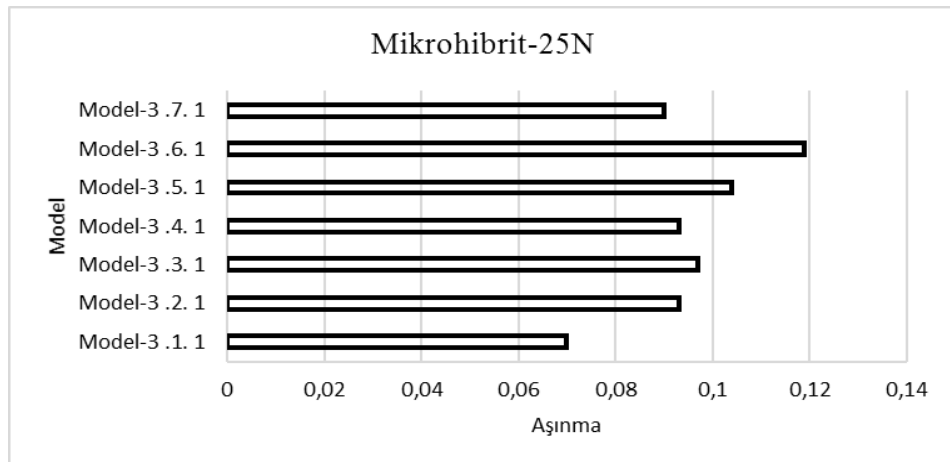


Şekil 4.95. Alt malzeme olarak Nano hibritleri kullandığı modellerin 75N yük altında aşınma değerleri

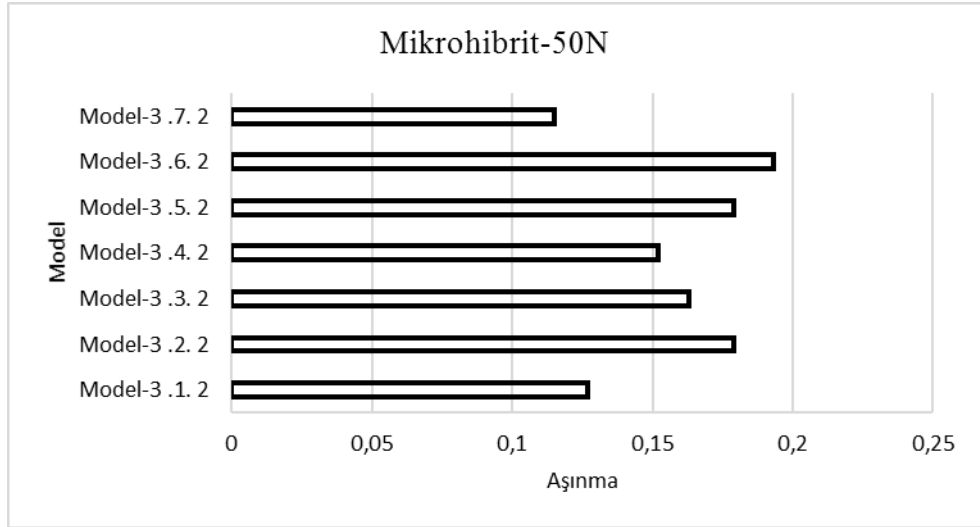
Alt malzeme olarak mikro hibritleri 25 N altında kullanınca Model-3.1.1 en iyi aşınma sonucunu vermiştir Şekil 4.96.

Şekil 4.97’de mikro hibritleri alt malzeme olarak kullanan modellerin 50N yük altında aşınma değerleri verilmiştir. Model-3.7.2 en az aşınan modeldir.

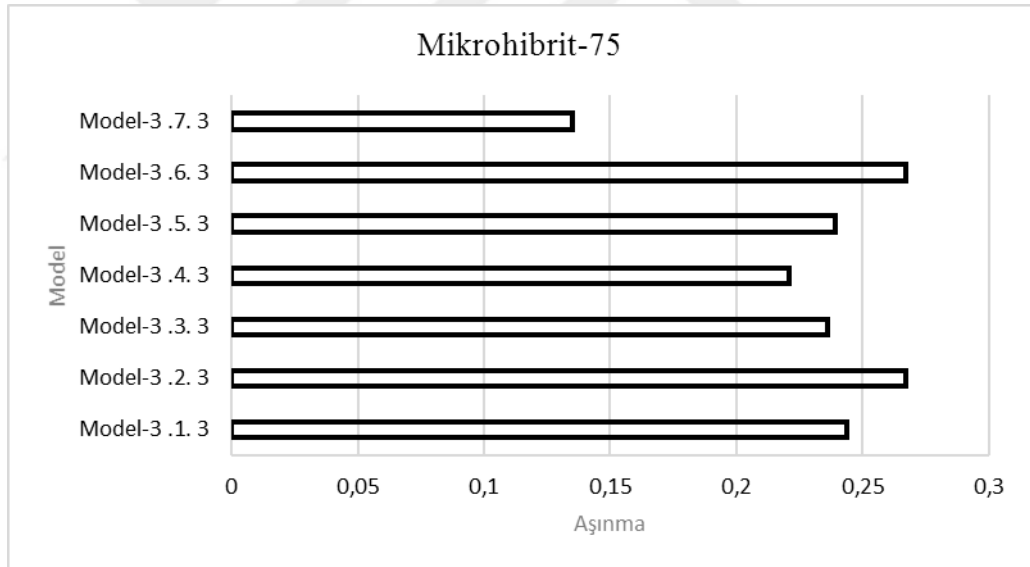
75 N yük uygulanınca Model-3.7.3 en iyi performansı göstermiştir.



Şekil 4.96. Alt malzeme olarak Mikro hibritleri kullandığı modellerin 25N yük altında aşınma değerleri



Şekil 4.97. Alt malzeme olarak Mikro hibritleri kullandığı modellerin 50N yük altında aşınma değerleri

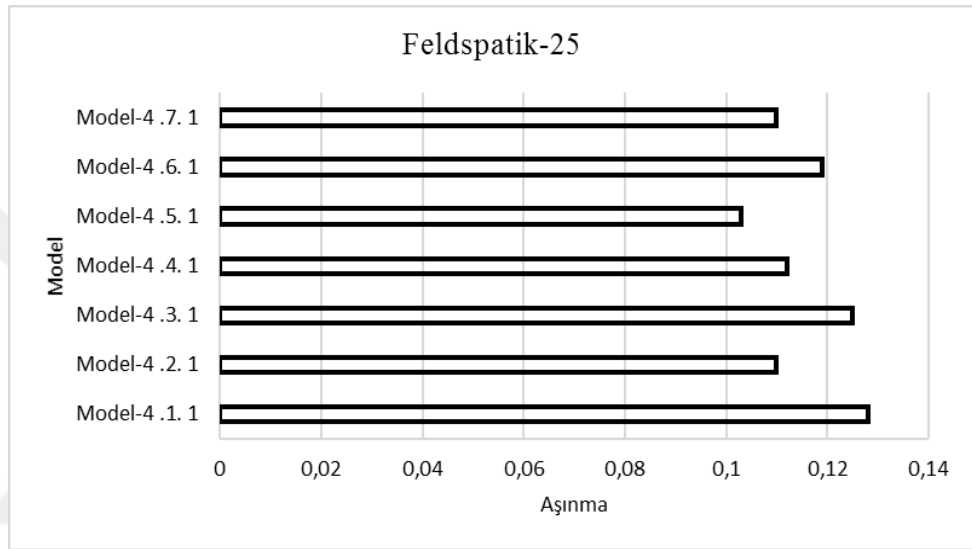


Şekil 4.98. Alt malzeme olarak Mikro hibritleri kullandığı modellerin 75N yük altında aşınma değerleri

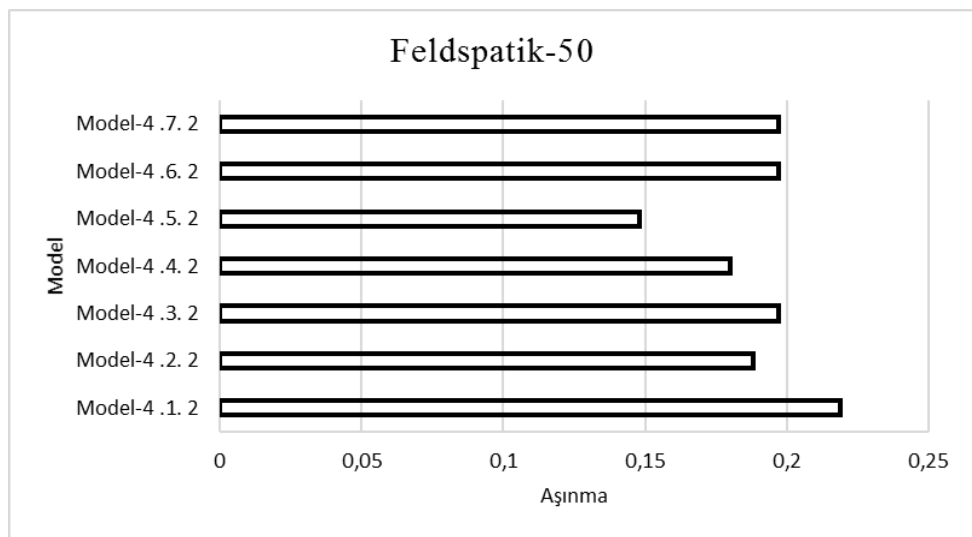
Şekil 4.99’da feldspatikleri alt malzeme olarak kullanan modellerin 25N yük altında aşınma değerleri verilmiştir. Bu şartlarda Model-4.5.1 diğer modellere göre aşınma açısından daha iyi bir performans göstermiştir.

Feldspatik alt restorasyon olarak ve 50 N yük uygulandığında diğer modellere göre Model-4.5.2 daha az aşınma değerini göstermektedir Şekil 4.100.

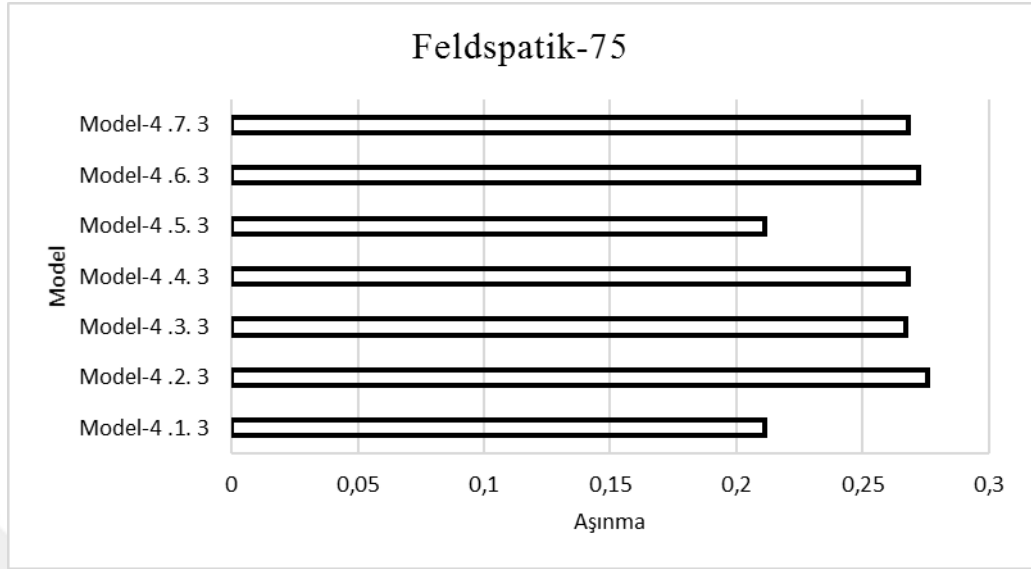
Şekil 4.101’de feldspatlara 75 N yük uygulanıp ve alt restorasyon olarak kullanılmışlar, Burda Model-4.1.3’ün aşınma dayanımı diğer modellere göre daha yüksektir.



Şekil 4.99. Alt malzeme olarak Feldespatikleri kullandığı modellerin 25N yük altında aşınma değerleri



Şekil 4.100. Alt malzeme olarak Feldespatikleri kullandığı modellerin 50N yük altında aşınma değerleri

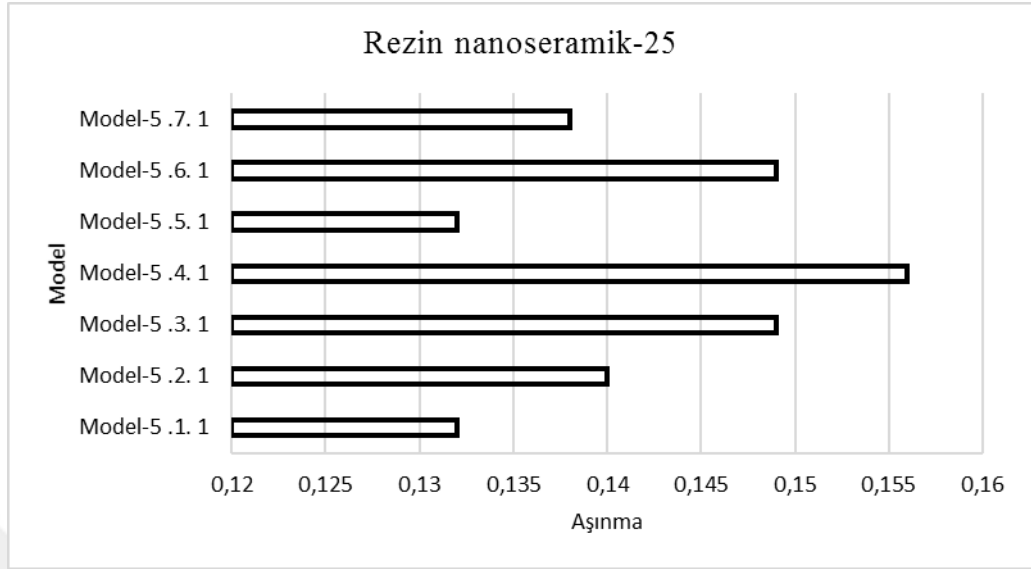


Şekil 4.101. Alt malzeme olarak Feldspatikleri kullandığı modellerin 75N yük altında aşınma değerleri

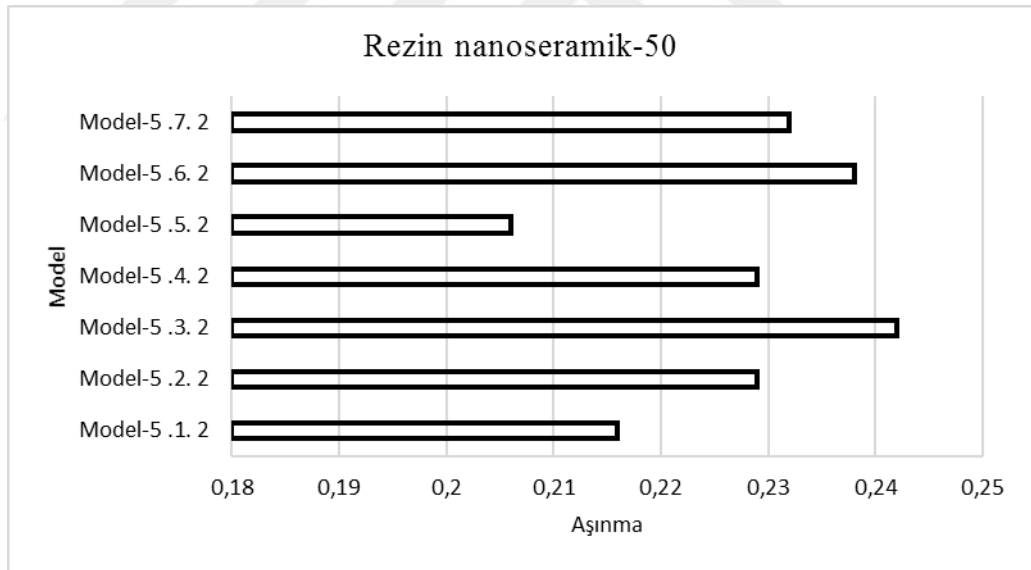
Şekil 4.102’de rezin nanoseraamikler aşınan malzeme olarak modellerde tanımlanmışlar burda 25 N yük uygulanmıştır. Model-5.1.1 en az aşınma değerine ulaşmıştır.

Şekil 4.103’de yine rezin nano seraamikler, 50 N yük altında taban malzeme olarak kullanılmıştır.

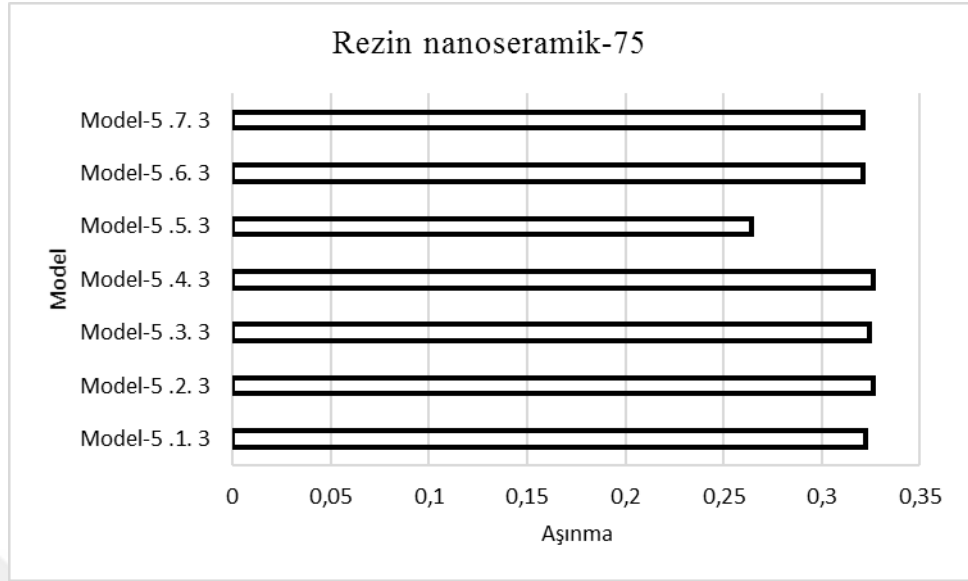
Şekil 4.104’te rezin nanoseraamiklerin 75 N yük altındaki aşınma performansları gösterilmiştir. Burda model-5. 5. 3 daha az aşınma değerine ulaşmıştır.



Şekil 4.102. Alt malzeme olarak Rezin nanoseramikleri kullanıldığı modellerin 25N yük altında aşınma değerleri



Şekil 4.103. Alt malzeme olarak Rezin nanoseramikleri kullandığı modellerin 50N yük altında aşınma değerleri



Şekil 4.104. Alt malzeme olarak Rezin nanoseramikleri kullandığı modellerin 75N yük altında aşınma değerleri

Bu sayısal analizlerden deneysel çalışmaları olanlar bölüm 4.3'te ve ilave olarak 25 ve 50N yük altındaki çalışmalar bölüm 4.4 ve 4.5'te verilmiştir.

Bu çalışmaların yanında 105 modelin tamamının aşınma sonuçları Çizelge 4.8'de verilmiş olup grafiksel olarak da Şekil 4.104-4.106'da gösterilmiştir.

Şekil 4.105'te modellerin 25 N yük altındaki aşınmaları karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi Model-1.1.1(indirek kompozit alt malzeme ve zirkonya üst malzeme) en küçük ve Model-5.4.1(alt malzeme rezin nano seramik ve üst malzeme mikrohibrit) en büyük aşınma değerine sahiptir.

Şekil 4.106'da ise modellerin 50 N yük altında olan davranışları karşılaştırılmıştır.

Modellerin 75N yük altında olan aşınma değerleri şekil 4.107'de verilmiştir. Burda görüldüğü gibi Model-1.2.3(alt malzeme indirek kompozit ve üst malzeme, dentin) en küçük aşınma değerine sahiptir.

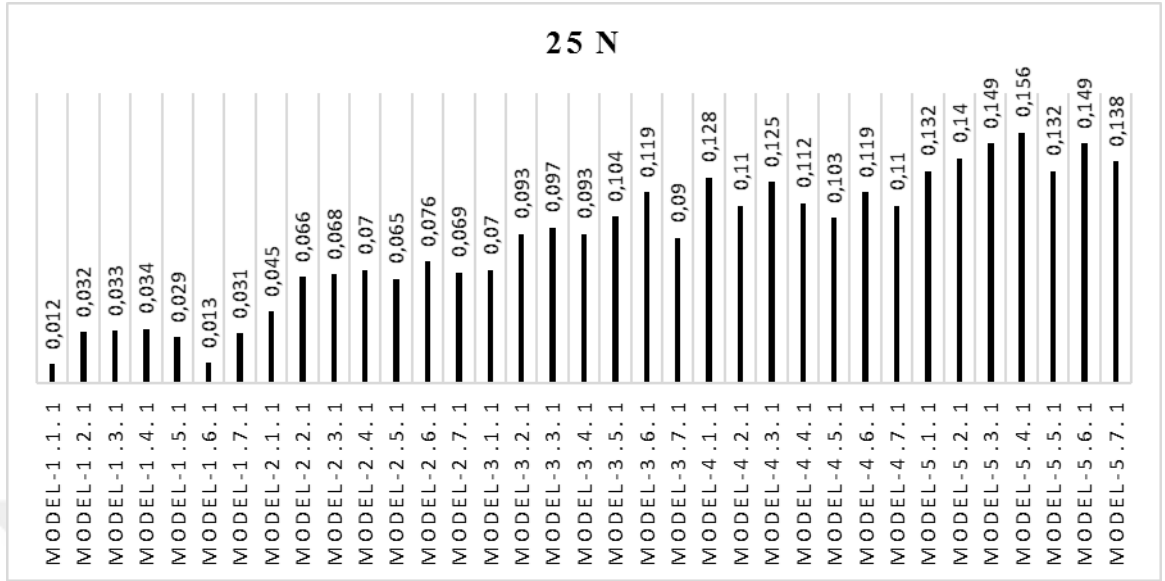
İnsan dişinde yapılan incelemeler şekil 4.108- 110'da verilmiştir. Dentinde sırasıyla indirek kompozitler, nanohibritler, mikrohibritler, feldspatikler ve rezin nanoseramikler aşınma açısından daha iyi bir performans göstermişler.

25 N yükte Model-1.2.1 en az ve Model-5.2.1 en çok aşınan modeldir. 50N yük uygulanınca Model-5.2.2 en az ve Model-5.2.2 en çok aşınmıştır. 75N yükte ise Model-1.2.3 az ve Model-5.2.3 çok aşınmıştır. Bu durumlarda yola çıkarak diş kaplamalarında indirekt kompozitler ve nanohibritler aşınma açısından daha çok dayanıklıdır.

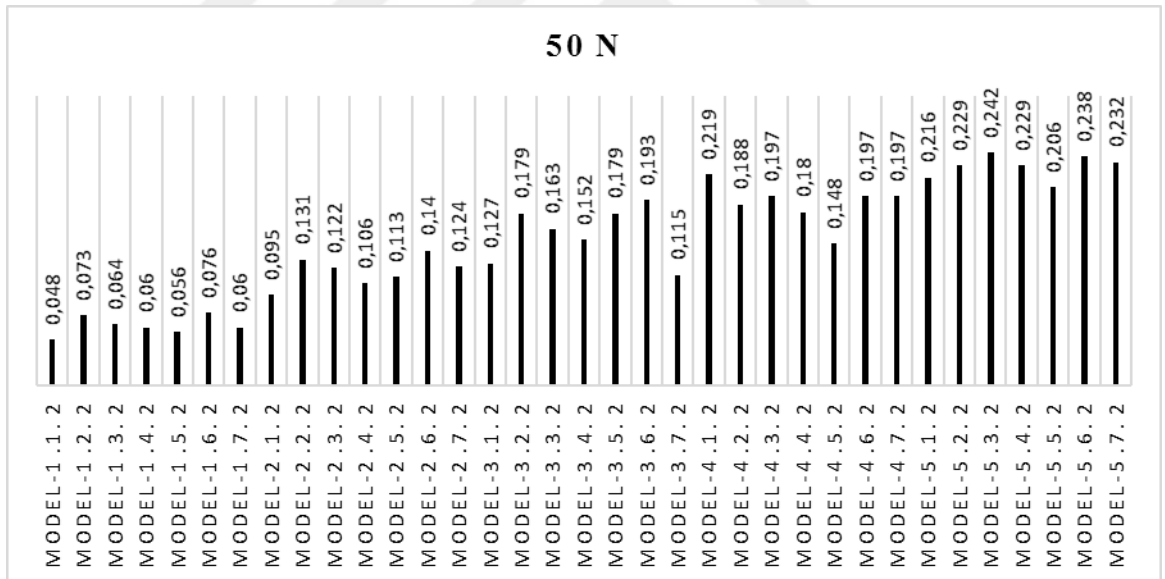


Çizelge 4.8. Modellerin aşınma değerleri

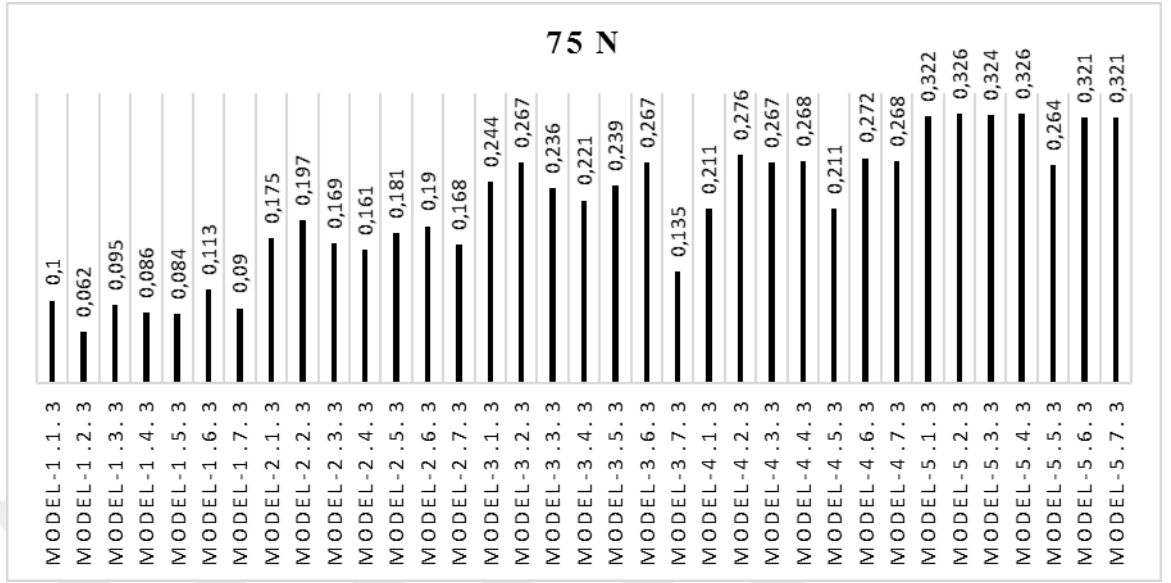
Model-1 .1. 1	0.012mm	Model-2 .1. 1	0.045mm	Model-3 .1. 1	0.070mm	Model-4 .1. 1	0.128mm	Model-5 .1. 1	0.132mm
Model-1 .1. 2	0.048mm	Model-2 .1. 2	0.095mm	Model-3 .1. 2	0.127mm	Model-4 .1. 2	0.219mm	Model-5 .1. 2	0.216mm
Model-1 .1. 3	0.100mm	Model-2 .1. 3	0.175mm	Model-3 .1. 3	0.244mm	Model-4 .1. 3	0.211mm	Model-5 .1. 3	0.322mm
Model-1 .2. 1	0.032mm	Model-2 .2. 1	0.066mm	Model-3 .2. 1	0.093mm	Model-4 .2. 1	0.110mm	Model-5 .2. 1	0.140mm
Model-1 .2. 2	0.073mm	Model-2 .2. 2	0.131mm	Model-3 .2. 2	0.179mm	Model-4 .2. 2	0.188mm	Model-5 .2. 2	0.229mm
Model-1 .2. 3	0.062mm	Model-2 .2. 3	0.197mm	Model-3 .2. 3	0.267mm	Model-4 .2. 3	0.276mm	Model-5 .2. 3	0.326mm
Model-1 .3. 1	0.033mm	Model-2 .3. 1	0.068mm	Model-3 .3. 1	0.097mm	Model-4 .3. 1	0.125mm	Model-5 .3. 1	0.149mm
Model-1 .3. 2	0.064mm	Model-2 .3. 2	0.122mm	Model-3 .3. 2	0.163mm	Model-4 .3. 2	0.197mm	Model-5 .3. 2	0.242mm
Model-1 .3. 3	0.095mm	Model-2 .3. 3	0.169mm	Model-3 .3. 3	0.236mm	Model-4 .3. 3	0.267mm	Model-5 .3. 3	0.324mm
Model-1 .4. 1	0.034mm	Model-2 .4. 1	0.070mm	Model-3 .4. 1	0.093mm	Model-4 .4. 1	0.112mm	Model-5 .4. 1	0.156mm
Model-1 .4. 2	0.060mm	Model-2 .4. 2	0.106mm	Model-3 .4. 2	0.152mm	Model-4 .4. 2	0.180mm	Model-5 .4. 2	0.229mm
Model-1 .4. 3	0.086mm	Model-2 .4. 3	0.161mm	Model-3 .4. 3	0.221mm	Model-4 .4. 3	0.268mm	Model-5 .4. 3	0.326mm
Model-1 .5. 1	0.029mm	Model-2 .5. 1	0.065mm	Model-3 .5. 1	0.104mm	Model-4 .5. 1	0.103mm	Model-5 .5. 1	0.132mm
Model-1 .5. 2	0.056mm	Model-2 .5. 2	0.113mm	Model-3 .5. 2	0.179mm	Model-4 .5. 2	0.148mm	Model-5 .5. 2	0.206mm
Model-1 .5. 3	0.084mm	Model-2 .5. 3	0.181mm	Model-3 .5. 3	0.239mm	Model-4 .5. 3	0.215mm	Model-5 .5. 3	0.264mm
Model-1 .6. 1	0.013mm	Model-2 .6. 1	0.076mm	Model-3 .6. 1	0.119mm	Model-4 .6. 1	0.119mm	Model-5 .6. 1	0.149mm
Model-1 .6. 2	0.076mm	Model-2 .6. 2	0.140mm	Model-3 .6. 2	0.193mm	Model-4 .6. 2	0.197mm	Model-5 .6. 2	0.238mm
Model-1 .6. 3	0.113mm	Model-2 .6. 3	0.190mm	Model-3 .6. 3	0.267mm	Model-4 .6. 3	0.272mm	Model-5 .6. 3	0.321mm
Model-1 .7. 1	0.031mm	Model-2 .7. 1	0.069mm	Model-3 .7. 1	0.090mm	Model-4 .7. 1	0.116mm	Model-5 .7. 1	0.138mm
Model-1 .7. 2	0.060mm	Model-2 .7. 2	0.124mm	Model-3 .7. 2	0.115mm	Model-4 .7. 2	0.197mm	Model-5 .7. 2	0.232mm
Model-1 .7. 3	0.090mm	Model-2 .7. 3	0.168mm	Model-3 .7. 3	0.135mm	Model-4 .7. 3	0.268mm	Model-5 .7. 3	0.321mm



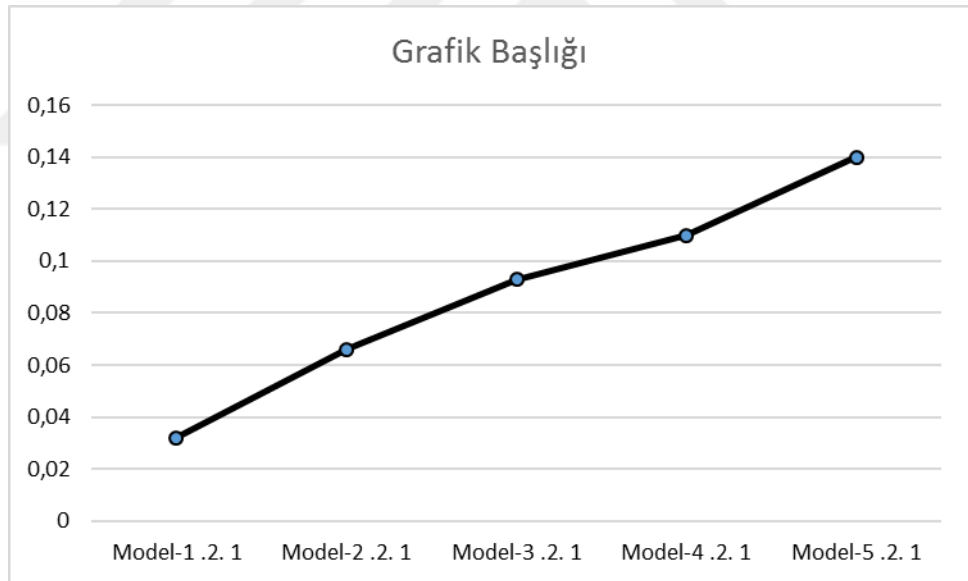
Şekil 4.105. Modellerin 25 N yük altındaki aşınma değerleri



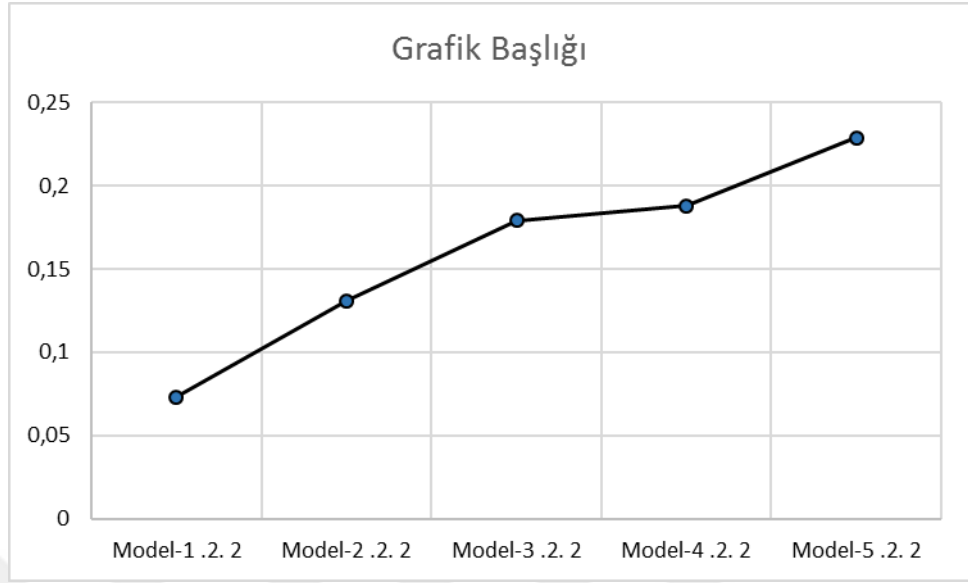
Şekil 4.106. Modellerin 50 N yük altındaki aşınma değerleri



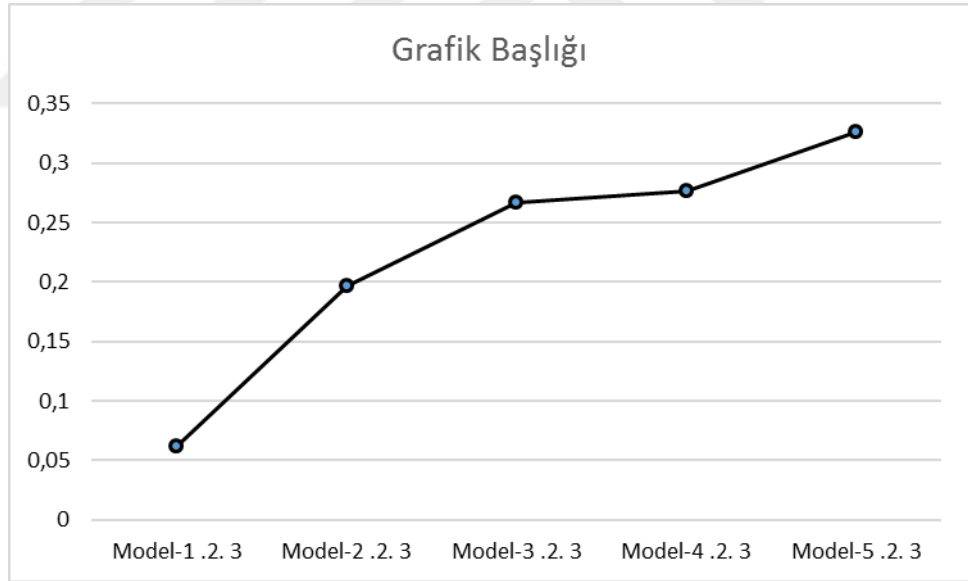
Şekil 4.107. Modellerin 75 N yük altındaki aşınma değerleri



Şekil 4.108. 25N altında, üst malzemesi dış olan modellerin aşınma değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.109. 50N altında, üst malzemesi diş olan modellerin aşınma değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.110. 75N altında, üst malzemesi diş olan modellerin aşınma değerlerinin karşılaştırılması

Çizelge 4.9’da bu tez kapsamında çalışılan aşındırıcı ve aşınan malzeme çiftlerine göre farklı yüklerde aşınma davranışları verilmiştir. Bu çizelgeye göre; İndirek kompozitler, 25 ve 50N’da zirkonya ile ve 75N yükte ise dentinle en iyi performansı sağlamaktalar.

Nanohibritler 25 ve 50N’da zirkonya ve 75N’da nanohibritle iyi bir sonua varmışlar.

Mikrohibritler sırasıyla 25, 50 ve 75N yüklerde zirkonya ve rezin nanoseramiklerle iyi bir uyum sağlamışlar.

Feldespatikler tüm yüklerde kendileriyle aşınma açısından en iyi sonuç elde etmişler.

Rezin nano seramikler için tüm yüklerde en iyi performans mikrohibritlerle elde edilmiştir.

Çizelge 4.9. Farklı yüklerde en iyi uyum gösteren alt ve üst malzemeler

Alt Malzeme	25N yükte en iyi Üst malzeme	50N yükte en iyi Üst malzeme	75N yükte en iyi Üst malzeme
İndirek kompozit	Zirkonya	Zirkonya	Dentin
Nanohibrit	Zirkonya	Zirkonya	Nanohibrit
Mikrohibrit	Zirkonya	Rezin nanoseramik	Rezin nanoseramik
Feldspatik	Feldespatik	Feldespatik	Feldespatik
Rezin nano seramik	Mikrohibrit	Mikrohibrit	Mikrohibrit

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Aşınma, malzeme kaybına ve zaman kayıplarına yol açan ve dolayısıyla ekonomikliği önemli ölçüde etkileyen istenmeyen bir durumdur.

Ağız içerisinde, çürüksüz kronik yıkıcı olayların farklı çeşitleri, dişler ve onlara uygulanan yenileme/onarım(restorasyon) malzemelerini etkilemektedir. Bu yıkımlardan biri olan aşınma ile klinik bir durum olarak karşılaşmaktayız. Aşınma oluşumunda genellikle farklı parametreler etkilidir.

Dişte, yenileme/onarım malzemelerinin aşınma dayanımını artırmak hem ekonomik açıdan hem de diş sağlığı açısından son derece önem taşımaktadır.

Bu tez kapsamında iki ana gruptan oluşan yenileme/onarım malzemelerinin aşınma davranışı üzerine çalışma yapıldı. Kompozitler (direk kompozitler – indirek kompozitler) ve seramik esaslı olan bu malzemeler deneysel yöntemler ve analizlerle incelenmiştir.

Kompozit malzeme olarak direk kompozitler (Mikrohibrit ve Nanohibrit) ve İndirek kompozitlerle ve seramik malzeme olarak Feldespatikler ve Rezin nanoseramiklerle çalışılmıştır.

Bu çalışmada hem birbirleriyle ve hem insan sert diş dokusu ile aşındırılan malzemelerin aşınma sonuçları sayısal yöntemlerle elde edilmiştir.

Çalışmanın deneysel kısmında gel-git aşınma mekanizmasına dayanarak modeller için 5 numune hazırlanıp aşınma deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre İndirek kompozitler 0.043 mm, Nanohibritler 0.092 mm, Mikrohibritler 0.0119 mm, Rezin Nanoseramikler 0.022 mm ve Feldespatikler 0.024 mm değerlerinde aşınmaya maruz kalmışlardır.

Çalışmanın sayısal kısmında numunelere uygulanan Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile deney şartlarına uygun model hazırlanarak çözümler yapıp malzemelerin aşınma davranışları hesaplanmıştır. Çözümlerde farklı yük(25N, 50N, 75N) ve alt –üst malzemelerine(restoratif malzeme ve diş) yönelik toplam 105 model hazırlanmıştır.

Deney şartlarının uygulandığı sayısal çözümlerde, Model-1.1.2, 0.048 mm, Model-2.1.2, 0.095 mm, Model-3.1.2, 0.12 mm, Model-4.1.2, 0.21 mm ve Model-5.1.2, 0.21 mm değerleri elde edilmiştir.

Deney sonuçları ile SEY sonuçlarının uyum içinde olduğu görülmektedir. Bu uyum, SEY modellerinin kabul edilebilirliğini göstermektedir.

Standartlara uygun modeller, parametrelerinin deneysel çalışmalarda yapılmayan değerleri için çözümler yapılarak malzemelerin aşınma davranışları için daha kapsamlı bilgiler elde edilmiştir.

Aşınma esnasında numune ile aşındırıcı disk ara yüzeyinde kayma süresince adhezif ve abraziv aşınma mekanizmalarının etkisiyle toz şeklinde aşınma kalıntıları meydana gelerek sürtünme sonucu oluşan sürtünme ısısı ile birlikte matris malzemesini termal olarak yumuşatırlar. Bu durumun kompozit malzemelerin aşınma davranışına etkide bulunduğu düşünülmektedir (Balagana 2012). Bu olay Rezin Nanoseramikler ve Feldespatiklerde diğer malzemelere göre daha belirgin bir şekilde görünmektedir. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te aşınma sonunda bu malzemelerde ortaya çıkan toz kalıntıları görülmektedir. Bu feldespatik ve rezin nanoseramiklerin daha çok aşınmalarının bir göstergesidir.

Deneyler sonucunda, pitting ve en çok abraziv aşınmanın baskın olduğu ortaya çıkmıştır.

Deney sonucunda yüzeylerde çok küçük çukurcukların oluşması pitting aşınmasının oluşunu göstermektedir. Yüzeylerdeki temas alanının küçük olması ve hertz basıncının etkisi, kayma gerilmelerinin oluşmasına neden olmuştur. Maksimum gerilmelerin olduğu yerlerde dislokasyon ile plastik deformasyona da bağlı olarak küçük boşluklar ortaya çıkarak, zaman içerisinde malzeme yüzeyine hareket etmektedirler. Yükün artışı pitting aşınmasında ani artışlara neden olduğu değerlendirilmiştir. Bu olay en çok Feldespatik ve Rezin Nanoseraimiklerde görülmektedir. En az pitting aşınması ise İndirek kompozitlerde görülmüştür.

Deneyler sonrası oluşan izlere bakıldığında abraziv aşınmanın çok etkin bir rol oynadığı ortaya çıkmıştır. Abraziv aşınma sonucunda ortaya çıkan partiküllerin aşınma hızının yükselişinde etkili olduğu düşünülmektedir.

Aşınma analizlerinin incelemelerde, aşınmaya uğrayan malzemelerde yük parametresinin etkisi daha baskın olarak görünmüştür.

Seraimikler için sertliğin önemli bir faktör olduğu görülmektedir, dolayısıyla bu malzemelerde aşınma hızı oldukça düşüktür.

Seraimiklerin düşük iletkenlikleri sebebiyle yerel ısı birikimleri meydana gelerek malzeme yüzeyleri arasında sıcaklık farkına sebep olmaktadır. Sürtünme sebebiyle sıcaklık farkları artarak, bölgesel gerilmeler ve termal şok, mikro çatlakların oluşmasına neden olmaktadır. Bunun sonucu olarak aşınma ve aşınma hızında artış meydana gelmektedir.

Elastisite modülü yüksek olan malzemelerin aşınma için daha dayanıklı oldukları söylenebilir.

Elastisite modülünün yanı sıra malzemelerde aşınmayı etkileyen birçok farklı faktörlerinde katkısı olması hem bu tez kapsamında hemde literatürden anlaşılmıştır, bu faktörler:

Yüzeylerdeki aşınma, lineer olmayan özgül yükün fonksiyonudur ve yükün etkisi, dalgalı olmayan küçük temas alanlı yüzeylerde çok daha gelişmiştir. Dalgalılık, bu ilişkinin lineer olmayışını iyice azaltır.

Malzemenin mukavemet değerlendiren aşınma dayanımı üzerinde daima faydalı etkisi vardır.

Yüzeylerin dalgalı olması ve pürüzlülüğünün yüzey geometrisi aşınma derecesi üzerinde Bell Bet etkiye sahiptir. Yüzey pürüzlülüğü ve aşınma arasında orantılı bir bağlantı vardır (Akkurt, 1995). Deneylerin başlangıcı esnasında yüzeylerin ilk temas ettiği durumda numunelerinin yüksek yüzey pürüzlülüğünden dolayı şok gerilme oluşmakta ve abraziv aşınma meydana gelmektedir. Bu çalışmada yüzey pürüzlülüğünün etkisi deneylerde direk olarak ve analizlerde basınç üssü'ne olan etkisinden dolayı görülmektedir.

Bu çalışmaya göre diş restorative malzemeler içerisinde aşınma direnci açısından sırayla İndirek kompozitler, Nanohibritler, Mikrohibritler, Rezin nanoseramikler ve Feldespatiklerden daha iyi performans göstermişlerdir.

KAYNAKLAR

- Akkurt, M., 1986. Makina Elemanları ve Konstrüksiyonu Kürsüsü, Cilt 2, İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Akkurt, S., 1995. On the effect of surface roughness on wear of acetal-metal gear pairs *Wear* 184 107–9
- Argyris, J., “Energy Theorems and Structural Analysis”, Aircraft Engineering, 1954 and 1955. In 1960 these papers were consolidated in a book by Butterworths Scientific Publications titled Energy Theorems and Structural Analysis.
- ASM International Handbook, 1992. Alloy Phase Diagrams Volume..
- Bailey, J. Hiatt, 2000. Sphere drag coefficients for a broad range of Mach and Reynolds numbers, AIAA J. 10. 1436–1440
- Balagna C, Spriano S and Faga M G., 2012. Characterization of Co–Cr–Mo alloys after a thermal treatment for high wear resistance *Mater. Sci. Eng. C* 32 1868–77
- Bayati, M. R., Golestani-Fard, F. and Moshfegh, A. Z.. 2010. «The effect of growth parameters on photo-catalytic performance of the MAO-synthesized TiO₂ nanoporous layers.» *Materials Chemistry and Physics*, (120) 582–589.
- Bayer, R.G., 1994. Mechanical Wear Prediction and Prevention, New York: Marcel Dekker Yayınevi.
- Bazochaharbakhsh, E., 2011. *Surface Nitriding and Oxidation of Nitinol Master's Theses*. 1-8. San Jose: The Faculty of the Department of Chemical and Materials Engineering,
- Bhushan, B., 2000. Modern Tribology Handbook, CRC Yayınevi.
- Brantley, William A., ve Theodore E., 2001. *Orthoontic Materials Scientific and Clinical Aspects* içinde, 84-85. New York: Thieme Stuttgart.
- Burwell, J.T., 1957/58. Survey of Possible Wear Mechanisms, *wear*, 1, 119-141.
- Cai, W., ve Sui, J. H., 2007, «Effect of working pressure on the structure and the electrochemical corrosion.» *Surface & Coatings Technology*, (201) 5194–5197.
- Çelik, Ç., 2007. «Diş Aşınmaları.» *Hacettepe Dişhekimliği Fakültesi Dergisi*, 1.
- Chen, Jian-zhi, Yu-long Shi, Lei Wang, Feng-ying Yan, ve Fu-qiang Zhang. 2006. «Preparation and properties hydroxyapatite-containing titania coating by microarc oxidation.» *Materials Letters*.
- Chen, X., ve Schluesener, H. J. 2008. «Nanosilver: A nanoparticle in medical application.» *Toxicology Letters*, no. 176., 1–12.
- Chu, C. L., Wu, S. K. ve Yen, Y. C., 1996. «Oxidation behaviour of aquatomic TiNi alloy in high temperature.» *Materials Science and Engineering*.
- Chu, C. L., 2008. «Effects of anodic oxidation in H₂SO₄ electrolyte on the biocompatibility of NiTi shape.» *Materials Letters*, (62) 3512–3514.
- Clough, R. W., March 1962, “The Stress Distribution of Norfolk Dam”, Institute of Engineering Research, Final Report to the Corps of Engineers, Revised August.
- Conrad, HJ, Seong, WJ, Pesun, IJ., 2007. Current ceramic materials and systems with clinical recommendations: a systematic review. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 98(5), 389-404.
- Curran, J. A., ve Clyne, T W., 2006. «Porosity in plasma electrolytic oxide coatings.» *Acta Materialia*, (54)1985–1993.

- Demet, Ç., 2007. *Posterior Dişlerde*. izmir: Ege Üniversitesi.
- Denry, I.L., Rosenstiel, S.F., 1993, Flexural strength and fracture toughness of Dicor glass-ceramic after embedment modification. *J Dent Res*. 72:572–576v
- Dietenberger, M., 2005. Development of a High Strain-Rate Dependent Vehicle Model, 4th LS-DYNA Forum, Bamberg, Germany 20th - 21st of October 2005.
- Doğan, F., Oktay, İ., ve Saydam, G., 1991. «Baş Boyun Bölgesine Radyoterapi Uygulanan Hastalarda Ağız-Dış Sağlığının Korunması.» *İ.Ü. Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi* 25, no. 1. 45.
- Dong, JK, Luthy, H, Wohlwend, A, Schärer, P., 1992. Heat-pressed ceramics: technology and strength. *International Journal of Prosthodontics*, 5(1), 9-16.
- Feng, Q. L., Wu, J., Chen, G. Q., Cui, F. Z., Kim, T. N. ve Kim, J. O., 2000, «A mechanistic study of the antibacterial effect of silver ions on *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*.» *J Biomed Mater*, (52) 662-668.
- Filho, J. T., Lidizio, L. R., Sena, L. A. ve Da, J. C., 2006. «Titanium Oxide Films Produced By Micro-Arc Oxidation For High Performance Titanium Implants.» *Metrology for a Sustainable Development*, 17-22.
- Frenzel, J., Zhang, Z., Neuking, K. ve Eggeler, G., 2004. «High quality vacuum induction melting of small quantities of NiTi shape memory alloys in graphite crucibles.» *Journal of Alloys and Compounds*, no. 385, 214–223.
- Garleanu G., Popovici, V., Ga ˆrleanu, D., Arsene, D., 2010. Modeling by finite element method Blind Hole Drilling method. In: Proceedings of the 3rd WSEAS Int Conference on finite differences– finite elements–finite volumes—boundary elements, Wisconsin, USA, pp 82–85
- Gu, Y., Sukumar, B., Cheng-fu, C., Yuanjun, G., ve Chengyun, N., 2012. «Effect of oxidation time on the corrosion behavior of micro-arc oxidation produced AZ31 magnesium alloys in simulated body fluid.» *Journal of Alloys and Compounds*, (543) 109–117.
- Guggenbichler, J. P., BOswald, M., Lugauer, S., ve Krall, T., 1999. «A New Technology of Microdispersed Silver in Polyurethane Induces Antimicrobial Activity in Central Venous Catheters.» *Infection Suppl. 1*, (27) 1.
- Habazaki, H., Tsunekawa, S., Tsuji, E. ve Nakayama, T., 2012. *Applied Surface Science*, (259) 711– 718.
- Habijan, T., 2011, «Can human mesenchymal stem cells survive on a NiTi implant material subjected to cyclic loading.» *Acta Biomaterialia*, (7)2733-2739.
- Hillson, S., Bond, S., 1997. Relationship of enamel hypoplasia to the pattern of tooth crown growth: a discussion. *Am J Phys Anthropol* 104:89-103.
- Höhne, G. W. H., Hemminger, W. F. ve Flammersheim, H. -J., 2003. *Differential Scanning Calorimetry* içinde. Springer.
- Hrennikoff, A., 1941. “Solution of problems of elasticity by the framework method”. *Journal of applied mechanics* 8.4: 169–175.
- Huang, P., W., F., Xu, K., ve Yong, H., 2007. «Mechanical properties of titania prepared by plasma electrolytic oxidation at different voltages.» *Surface & Coatings Technology*, (201) 5168–5171.
- Huang, Y., Yingjun, W., Chengyun, N., Kaihui, N., ve Yong, H., 2007. «Hydroxyapatite coatings produced on commercially pure titanium by micro-arc oxidation.» *BIOMEDICAL MATERIALS*, 2007: (2) 196–201.

- Hussein, R. O., ve Northwood, D. O., 2010. «Influence of process parameters on electrolytic plasma discharging behaviour and aluminum oxide coating microstructure.» *Surface & Coatings Technology*, (205) 1659–1667.
- Hutchings, Y., 1996. “Perceptions of Racial Group Competition: Extending Blumer's Theory of Group Position to a Multiracial Social Context,” *American Sociological Review* 61(6): 951-972.
- Hyun, Uzel, İ., B. Alpagut ve S. Kofoğlu, 1988, “Finite element analysis of contact between “Arslantepe (Malatya) Geç Roma Dönemi İskeletlerinde Diş Çürüğü, Aşınmalar ve Periodontal Hastalıklar”.
- Jiang, J., Stott, F.H., Stack, M.M., 2004. A generic model for dry sliding wear of metals at elevated temperatures. *Wear*, 256: 973-985
- Kato, K., 2002, Wear of advanced ceramics *Wear* 253 1097–104
- Kaya, M., Orhan, N., ve Tosun, G., 2010. «The effect of combustion channels on the compressive strength of porous NiTi shape memory alloy fabricated by SHS as implant material.» *Current Opinion in Solid State and Material Science*, 21-25.
- Kildal, K.K., Ruyter, I.E., 1997. How different curing methods affect mechanical properties of composites for inlays when tested in dry and wet conditions. *Eur J Oral Sci*; 105:353-61.
- Kim, Jun Sung, 2007. «Antimicrobial effects of silver nanoparticles.» *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology, and Medicine*, no. 3 95– 101.
- Kokubo, T., H., Kushitani, S., Sakka, T., Kitsugi, ve Yamamuro, T., 1990. «Solutions able to reproduce in vivo surface-structure changes in bioactive glass-ceramic A-W.» *J. Biomed. Mater. Res.*, no. 24, 721-734.
- Kobrick, R.L., 2010. Characterization and Measurement Standardization of Lunar Dust Abrasion for Spacecraft Design and Operations, A thesis submitted to the Faculty of the Graduate School of the University of Colorado in partial Doktora tezi, Uzay bilimler departmanı.
- Lewis, R., Dwyer-Joyce, R.S., 2004. "Wear Mechanisms and Transitions in Railway Wheel Steels", submitted to Proceedings of the IMechE, Part J Journal of Engineering Tribology.
- Li, J. Z., Shao, Z. C., Tian, Y. W., Kang, F. D., ve Zhai, Y. C., 2006. «Application of microarc oxidation for Al, Mg, Ti and their alloys.» *Corrosion Science and Protection Technology*, 16(4)218–221.
- Li, Wen-Ru, ve diğerleri, 2010. «Antibacterial activity and mechanism of silver nanoparticles on Escherichia coli.» *Appl Microbiol Biotechnol*, no. 85., 1115–1122.
- Li, Wen-Ru, Xie, Qing-Shan Shi, Hai-Yan Zeng, You-Sheng OU-Yang, ve Yi-Ben Chen. 2010. «Antibacterial activity and mechanism of silver nanoparticles on Escherichia coli.» *Appl Microbiol Biotechnol*, no. 85., 1115–1122.
- Liang, J., Guo, B., Tian, J., Liu, H., Zhou, J., ve Xu, T., 2005. «Effect of potassium fluoride in electrolytic solution on the structure and properties of microarc oxidation coatings on magnesium alloy.» *Applied Surface Science*, (252) 345–351.
- Liang, J., Hua, L., ve Hao, J., 2007. «Preparation and characterization of oxide films containing crystalline TiO₂ on magnesium alloy by plasma electrolytic oxidation.» *Electrochimica Acta*, (52) 4836–4840.

- Lipson, C., 1967. *Wear Considerations in Design*. Michigan üniversitesi yayınevi. Hall Inc.
- Liu, F., Xu, J. L., Yu, D. Z., Wang, F. P., ve Zhao, L. C., 2010. «Effects of cathodic voltages on the structure and properties of ceramic coatings formed on NiTi alloy by micro-arc oxidation.» *Materials Chemistry and Physics*, (121) 172–177.
- Liu, F., Xu, J. L., Yu, D. Z., Wang, F. P. ve Zhao, L. C., 2009. «Wear resistance of micro-arc oxidation coatings on biomedical NiTi alloy.» *Journal of Alloys and Compounds*, (487) 391–394.
- Ludema, C.K., 1996. *Friction, Wear, Lubrication, A Textbook in Tribology*, 107108
- McKnight-Hanes, C., and Whitford, G. M., 1992. «Fluoride release from three glass ionomer materials and the effects of varnishing with or without finishing.» *Caries research*, no. 26 (5), 345-350.
- McShan, D., Paresh C. Ray, ve Yu, H., 2014. «Molecular toxicity mechanism of nanosilver.» *Journal of Food and Drug Analysis*, no. 22, 2014: 116-127.
- McHenry, D., 1943. “A Lattice Analogy for the Solution of Plane Stress Problems”, *J. Inst. Civil Eng.* 21 (2).
- Mesquita, RV, Axmann, D, Geis-Gerstorfer, J., 2006, Dynamic visco-elastic properties of dental composite resins. *DentMater*, 22:258–67.
- Mihalcz, I., 2001. «Fundamental Characteristics And Design Method For Nickel-Titanium Shape Memory Alloy.» *Periodica Polytechnica Ser. Mech. Eng.*, no. 45, 75-86.
- Miyazaki, S., ve Otsuka, K., 1986. «Deformation and Transition Behavior Associated with the R-Phase in Ti-Ni Alloys.» *Metalurgical Transactions A*, no. 17A, 53-63.
- Miyazaki, S., Yong, K. F., and Huang, W. M., 2009. *Thin Film Shape Memory Alloys* içinde, 1. Cambridge University.
- Moa, A., Liao, J., Xu, J., Xian, S., Li, Y., ve Bai, S., 2008. «Preparation and antibacterial effect of silver–hydroxyapatite/titania nanocomposite thin film on titanium.» *Applied Surface Science*, (255) 435–438.
- Mu, W., ve Han, Y., 2008. «Characterization and properties of the MgF₂/ZrO₂ composite coatings on.» *Surface & Coatings Technology*, (202) 4278–4284.
- Mukras S., Kim, N.H., Mauntler, N.A., Schmitz, T.L., Sawyer, W.G., 2010, Analysis of planar multibody systems with revolute joint wear. *Wear*, 268(56):643–652. doi: 10.1016/j.wear.2009.10.014.
- Oğuz, B., 1993. *Aşınma Sorunları ve Dolgu Kaynakları*. Oerlikon Yayını.
- Ohtsuki, C., Kushitani, H., Kokubo, T., Kotani, S., ve Yamamuro, T., 1991. «Apatite formation on the surface of Ceravital-type glass-ceramic in the body.» *J. Biomed. Mater. Res.*, no. 25, 1363-1370.
- Ortner, D.J., Putschar, W. G. J., 1985. *Identification of Pathological Conditions in Human Skeletal Remains*, Washington: Smithsonian Institution Press.
- Ozen Engineering., 2016 – Contact Surface Wear Simulation. This example problem demonstrates the simulation of wear at a contact surface.
- Özsaraç, U., 1999. *Endüstriyel Yatak Alaşımlarının Aşınma Davranışlarının Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

- Prasad, M., 2004. Influence of Heat Treatment Parameters on the Lubricated Sliding Wear Behaviour of a Zinc-Based Alloy. *Wear*, 257. pp. 1137-1144. ISSN 0043-1648
- Paulin, C., Fouvry, S., Deyber, S., 2005. Wear kinetics of a Ti-6Al-4V alloy under constant and variable fretting sliding conditions. *Wear.*, 259(1-6):292-9.
- Peng, J., Han, B., Li, W., Du, J., Guo, P., and Han, D., 2007. «Study on the miccrustrucutal evaluation of BatiO3 on titanium substrate during MAO.» *Materials Letters*.
- Pongprueksa, P., Kuphasuk, W., 2008. The elastic moduli across various types of resin/dentin interfaces. *Dental Materials*. 2008; 24:1102-1106. PMid:18304626
- Poon, Ray W. Y., 2005. «Improvements of anti-corrosion and mechanical properties.» *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. (237) 411-416.
- Poon, Ray W. Y., 2006. «Improvement on corrosion resistance of NiTi orthopedic materials by carbon plasma immersion ion implantation .» *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, (242) 270-274.
- Qu, J., Shih, A. J., Scattergood, R., 2002. Development of the cylindrical wire electrical discharge machining process, Part II: surface integrity and roundness. *J. Manuf. Sci. Eng.* 124(3):708-714.
- Rafferty, BT., Janal, MN., Zavanelli, RA., Silva, NR., Rekow, ED., Thompson, VP., 2010b. Design features of a three-dimensional molar crown and related maximum principal stress. A finite element model study. *Dent Mater* 26:156-163
- Rondelli, G., 1995. «Corrosion resistance tests on NiTi shape memory alloy.» *Biomaterials*.
- Seguin, J. -L., Bendahan, M., Isalgue, A., Esteve-Cano, V., Carchano, H., ve Torra, V., 1999. «Low temperature crystallised Ti-rich NiTi shape memory alloy films for.» *Sensors and Actuators*, (74) 65-69.
- Shi, X., Wang, Q., Wang, F., ve Ge, S., 2009. «Effects of electrolytic concentration on properties of micro-arc film on Ti6Al4V alloy.» *Mining Science and Technology*, (19) 0220-0224.
- Shin, K. R., Young, G. K., ve Dong, H. S., 2011. «Effect of electrolyte on surface properties of pure titanium coated by plasma electrolytic oxidation.» *Journal of Alloys and Compounds*, (509S) S478-S481.
- Soboyejo, Winston O., ve Srivatsan, T. S., 2006. *Advanced Structurel Materials- Properties, Design, Optimization and Applications* içinde, 158-159. New York: Taylor and Francis Group, LLC.
- Soboyejo, Winston O., ve Srivatsan, T. S., 2006. *Advanced Structurel Materials- Properties, Design, Optimizatiin and Applications* içinde. New York: Taylor and Francis Group, LLC.
- Stachowiak, G.W., Batchelor, A.W., 1993. *Engineering Tribology*, Tribology Series, 24, Elsevier.
- Sui, J. H., ve Cai, W., 2007. «Mechanical and corrosion study of diamond-like carbon.» *Surface & Coatings Technology*, (201) 5121-5123.
- Thomas, T. R., 1981. Characterization of surface roughness. *Precis. Eng.* 3:97-10
- Thompson, M.K., Thompson, J.M., Slocum, A.H., 2004. "The Effect of Surface Roughness on the Pressure Required for Coupler Sealing." In *Proceedings of 2004 International ANSYS Users Conference & Exhibition*, Pittsburgh, PA

- TMMOB., 2003. II. Ulusal Demir-Çelik Sempozyumu ve Sergisi: Bildiriler Kitabı, Yay. No: E/2003/336, Ankara.
- Turner, M., Clough, R. W., Martin H. C. and Topp, L. J., 1956. "Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures", *J. Aeronautical Science* 23 (9), pp. 805-823, Sept. 1956
- Vingsbo, & Hogmark, S., 1981. Wear of Steels, ASM Materials Science Seminar on Fundamentals of Friction and Wear of Materials, 4-5, Pittsburg, Pennsylvania, Metals Park, Ohio, Publ. ASM, 373-408.
- Walsh,, F. C., 2009. «Plasma electrolytic oxidation (PEO) for production of anodised coatings on lightweight metal (Al, Mg, Ti) alloys.» *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 87(3)122-135.
- Wang, H. R., Liu, F., Zhang, Y. P., Yu, D. Z., ve Wang, F. P., 2011. «Preparation and properties of titanium oxide film on NiTi alloy by micro-arc.» *Applied Surface Science*, no. 257, 5576–5580.
- Wang, Y., Lei, T., Jiang, B., ve Guoa, L., 2004. «Growth, microstructure and mechanical properties of microarc oxidation coatings on titanium alloy in phosphate-containing solution.» *Applied Surface Science*, (233) 258–267.
- Wanga, Y., Leia, T., Jiangb, B., ve Guoa, L., 2004. «Growth, microstructure and mechanical properties of microarc oxidation coatings on titanium alloy in phosphate-containing solution.» *Applied Surface Science*, (233) 258–267.
- Wei, C. B., Tian, X. B., Yang, S. Q., Wang, X. B., Ricky K., Fu, Y. ve Paul K. Chu, 2007. «Anode current effects in plasma electrolytic oxidation.» *Surface & Coatings Technology*, (201) 5021–5024.
- Xin, S., Song, L., Zhao, R., ve Hu, X. 2006. «Composition and thermal properties of the coating containing mullite and alumina.» *Materials Chemistry and Physics*, (97) 132–136.
- Xu, J. L., Liu, F., Wang, F. P., Yu, D. Z. ve Zhao, L. C., 2009. «Formation of Al₂O₃ coatings on NiTi alloy by micro-arc oxidation method.» *Current Applied Physics*, (9) 663–666.
- Xu, J. L., Liua, F., Wang, F. P., ve Zhao. L. C., 2008. «Alumina coating formed on medical NiTi alloy by micro-arc oxidation.» *Materials Letters*, (62) 4112–4114.
- Xu, J. L., Liu, F., Wang, F. P., Yuc, D. Z., ve Zhao, L. C., 2009. «The corrosion resistance behavior of Al₂O₃ coating prepared on NiTi alloy by micro-arc oxidation.» *Journal of Alloys and Compounds*, (472) 276–280.
- Yang, Y., ve Wu, H., 2010. «Effects of Current Frequency on the Microstructure and Wear Resistance of Ceramic Coatings Embedded with SiC Nano-particles Produced by Micro-arc Oxidation on AZ91D Magnesium Alloy.» *J. Mater. Sci. Technol.*, 26(10) 865-871.
- Yerokhin, A. L., A. Leyland, C. Tsotsos, A. D. Wilson, X. Nie, ve A. Matthews. «Duplex surface treatments combining plasma electrolytic nitrocarburising and plasma-immersion ion-assisted deposition.» *Surface and Coatings Technology*, 2001: (14-144) 1129-1136.
- Yerokhin, A. L., Snizhko, L. O., Gurevina, N. L., Leyland, A., Pilkington, A., ve Matthews, A., 2003. «Discharge characterization in plasma electrolytic oxidation of aluminium.» *Journal Of Physcis D: Applied Physics*, (36) 2110–2120.

- Yerokhin, A. L., Nie, X., Leyland, A., Matthews, A. ve Dowey, S. J., 1999. «Plasma electrolysis for surface engineering.» *Surface and Coatings Technology*, 122: 73–93.
- Yerokhin, A. L., Nie, X., Leyland, A., Matthews, A., ve Dowey, S. J., 1999. «Plasma electrolysis for surface engineering.» *Surface and Coatings Technology*, (122)73–93.
- Yerokhin, A. L., Nie, X., Leyland, A., ve Matthews, A., 2000. «Characterisation of oxide films produced by plasma electrolytic oxidation of a Ti-6Al-4V alloy.» *Surface and Coatings Technology*, (130)195-206.
- Yoneyama, T., ve Shuichi, M., 2009. *Shape Memory Alloys For Biomedical Applications* içinde. Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, 2009.
- Zhang, Y., Kim, J.W., 2010. Graded zirconia glass for resistance to veneer fracture. *J Dent Res* 89:1057-1062
- Zheng, J., and Zhou, Z. R., 2007. Study of in vitro wear of human tooth enamel *Tribol. Lett*
- Zienkiewicz, O. C., and Cheung, Y. K., 1965. “Finite Element Solution of Field Problems”, *The Engineer*, pp. 507-510, September.
- Zou, B., Yan, H., Kawasaki, F., Ordway, R.W., 2008. MAP1 structural organization in *Drosophila*: in vivo analysis of FUTSCH reveals heavy- and light-chain subunits generated by proteolytic processing at a conserved cleavage site.

ÖZGEÇMİŞ

1987 yılında İran’da doğdu. İlk, orta ve lise tahsilini Khoy’da tamamladı. Tıp eğitiminden vaz geçerek, 2006 yılında girdiği Azad Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü’nden 2009 yılında mezun oldu. 2009 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans öğrenimine başlayıp 2011’de bitirdi ve aynı yılda Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine mühendisliği bölümünde doktora eğitimine başladı.

