BROŞ KESİCİ TAKIMLARIN DİZAYNI İÇİN DİŞLİ AÇMA SİMÜLASYONU

SIMULATION OF GEAR CUTTING FOR DESIGN OF BROACH CUTTING TOOLS

METİN KORAY YALÇIN

Prof. Dr. BORA YILDIRIM
Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2018

METİN KORAY YALÇIN' ın hazırladığı "**BROŞ KESİCİ TAKIMLARIN DİZAYNI İÇİN DİŞLİ AÇMA SİMÜLASYONU**" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI 'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. BORA YILDIRIM

Başkan, Danışman .....

Doç. Dr. Bora MAVİŞ

Üye .....

Yrd. Doç. Dr. Can Ulaş DOĞRUER

Üye .....

Yrd. Doç. Dr. Okan GÖRTAN

Üye .....

Yrd. Doç. Dr. Hasan Basri ULAŞ

Üye .....

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

☐ **Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.**
(Bu seçenekle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etseniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)

☒ **Tezimin/Raporumun 01.06.2020 tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.**
(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım taktirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı ve ya tamamının fotokopisi alınabilir)

☐ **Tezimin/Raporumun …….. tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.**

☐ **Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi**

29/06/2018

Metin Koray YALÇIN

Babama…

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

30/04/2018

METİN KORAY YALÇIN

ÖZET

BROŞ KESİCİ TAKIMLARIN DİZAYNI İÇİN DİŞLİ AÇMA SİMÜLASYONU

Metin Koray YALÇIN

Yüksek Lisans, Makina Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bora YILDIRIM

Nisan 2018, 151 sayfa

Bu tez çalışmasında; broşlama yöntemi ile dişli açma simülasyonlarını ANSYS ve LS-DYNA yazılımları (Sonlu Elemanlar Analizi ile) kullanılarak yapılmış, böylelikle broş kesici takımların tasarlanması ve imalatı hedeflenmiştir.

Broşlama; parçaların iç ve dış yüzeylerinden talaş kaldırarak şekillendirmede kullanılan talaşlı imalatta ucuz, hızlı, ölçü hassasiyeti ve yüzey değerlerini sürekli aynı tutabilen seri üretim teknolojilerinden bir tanesidir.

Broşlama işlemi; işin özelliğine göre dizayn edilerek yapılmış broş tığlarının, yatay veya dikey broş tezgâhlarında malzemenin içerisinden çekilmesi veya itilmesi ile gerçekleşir.

Broşlamanın faydaları:

Broşlama teknolojisi ile yapılan üretimlerin, diğer üretim tekniklerine göre üstünlükler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- İşleme zamanı oldukça kısadır,
- Yüksek yüzey kalitesi sağlar,
- İkinci bir operasyona gerek kalmaz,
- Ölçü standardı sağlar,
- Karmaşık profillerin yapılabilmesini sağlar,
- Kolay ve ucuz işçilik sağlar,
- Diğer tekniklere göre yatırım maliyeti düşüktür,
- Kalifiye eleman ihtiyacı gerektirmez.

Broşlama teknolojisinin kullanım alanları ise;

- Otomotiv endüstrisinde çok sayıda dişli ve parçanın imalatında,
- Uçak ve uzay endüstrisindeki pek çok parçanın imalatında,
- Silah sanayinde silah parçalarının üretiminde,
- Elektrik motoru ve türbin parçaları imalatında,
- Kremayer dişlilerden kilit imalatına kadar çok geniş bir alanda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Tezin ana hedefi; henüz ülkemizde üretilmeyen ve dünyada birkaç firmanın tekelinde bulunan özellikteki broşlama işlemini yapabilecek tezgâhın tasarlanması ve prototipinin üretilmesi için gerekli Ar-Ge faaliyetini sağlamaktır.

Bu tezin çıktıları sayesinde otomotiv sanayinde üretilen traktör, yükleyici, ekskavatör gibi iş makinaları ile otomatik şanzımanlı otomobillerde kullanılmakta olan dâhili çember dişlilerin seri üretimleri ülkemizde yerli tezgâh ve tığları ile gerçekleşecektir. Ülkemizde üretimde kullanılmayan bir teknoloji ile daha verimli şekilde dişli üretim yapan bir sektör oluşturulacaktır.

Bu üretim teknolojisi ile ülkemizin iç ve dış pazarlarda büyük ihtiyaç duyulan dişli üretiminde söz sahibi olması mümkün olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Broş tığı, Broş Tezgâhı, Dişli, Çember Dişli, Düşük üretim maliyeti, Yüksek üretim kapasitesi, Standart kalite, Hassas ölçüler,

ABSTRACT

SIMULATION OF GEAR CUTTING FOR DESIGN OF BROACH CUTTING TOOLS

Metin Koray YALÇIN

Master of Science, Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Bora YILDIRIM

April 2018, 151 pages

In this thesis study; it aims at broaching cutting tool design and manufacturing, which simulate of gear cutting with ANSYS and LS-DYNA software (with Finite Element Analysis) used broaching method.

Broaching, is the serial production technology, which is used for shaping the pieces by removing shavings from their internal and external surface, this technology has maximum impact on cost reduction, provides high production rate and also can keep the surface quality at same level.

In broaching process; broach tools, which are designed according to the properties of the pieces, is pulled or pushed from inside of the pieces by using vertical or horizontal broaching machines.

Benefits of the broaching;

The production by using broaching technology has a lot of benefits compared to the other techniques. Some of them;

- Processing time is very short,
- Provide high surface quality,
- There is no need a second operation,
- Provides measurement accuracy,

- Allows for complex profiles,
- Requires easy and cheap labor,
- The investment cost is very low compared with the other technology,
- Does not require qualified personnel.

Usage area of the broaching technology;

- A large number of the parts and gears production in automotive industry,
- Manufacturing many parts in aircraft and aerospace technology,
- The production of the weapon component in the weapon industry,
- The production of the electric motors and turbine parts,
- From the production of rack gears to the production of the lock, widely using in manufacturing.

The main aim of this is R&D for the manufacturing of the broaching tools that are used for the internal gears manufacturing are used for the production of construction machinery such as tractor, loader, excavator and the cars with automatic transmission, and in this way meeting the increasing demands of internal and external market.

In our country, these broaching tools have not been produced yet, in the world, just a few company produce and they become monopoly.

Keywords: Broach Tool, Broach Machine, Gear, Internal Gear, Low production cost, High manufacturing capacity, Standard quality, Sensitive tolerances

TEŞEKKÜR

Lisans eğitimim sırasında, mekanik ve mekanik tasarım konularına olan ilgi ve becerimin farkına varmamı sağlayan, bu konularda yüksek lisans eğitimime başlamam için beni cesaretlendiren, teşvik eden ve yardımlarını esirgemeyen, lisans üstü eğitimim sırasında, iş hayatıyla birlikte eğitimimi sürdürebilmem konusunda beni motive eden, tez çalışmamı San-Tez Bursu kapsamında yürütmemi sağlayarak, bana güvenen ve güven veren, dolayısıyla çalışmalarımın her aşamasında yüksek bilgi ve tecrübeleriyle bana destek olan, değerli katkı ve eleştirileriyle bana yol gösteren, sabırla beni her zaman çalışmaya teşvik eden ve çalışmalarımı kolaylaştırmak için her türlü imkanı sağlayarak, her zaman manevi desteğini üzerimde hissettiğim, çalışmalarım sırasında benden daha çok yorulan değerli danışmanım, meslek üstadım; Sayın Prof. Dr. Bora YILDIRIM hocama en içten dileklerimle teşekkürü bir borç bilirim.

Değerli katkılarını bizden esirgemeyerek, savunma jürimi oluşturan değerli hocalarım; Sayın Doç. Dr. Bora MAVİŞ hocama, Sayın Yrd. Doç. Dr. Can Ulaş DOĞRUER hocama, Sayın Yrd. Doç. Dr. Okan GÖRTAN hocama ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Hasan Basri ULAŞ hocama, tek tek ve en içten dileklerimle teşekkürlerimi sunarım.

Son ana kadar her dakika, tezimi yazmam için beni teşvik eden, motivasyonumu hep yukarıda tutan, sıcaklığını, maddi ve manevi desteğini hiç esirgemeyen değerli Gamze İLHAN' a ve bazı dönemler içerisinde çok sık görüşme imkanı bulamasak da, manevi desteklerini esirgemeyen, beni motive eden, sürekli iyi temennilerini ileten çok değerli dost ve arkadaşlarıma en samimi duygularımla teşekkür ederim.

Sadece bu çalışmamda değil, hayata gözlerimi açtığım andan beri, giriştiğim her işte, başarılarımda ve hayal kırıklıklarımda, her daim beni ayakta tutan, maddi ve manevi yönden içtenlikleri ve sıcaklıklarıyla destekleyen, üzerimde çok emekleri olan değerli annem Hatice YALÇIN, biricik kardeşim Aslı YALÇIN' a ve tezimi ithaf ettiğim, bu ithafın heyecanı ile tezime konsantre olduğum, merhum babam Rıza YALÇIN' a şimdiye kadar olan ve bundan sonra olacak olan her şey için sonsuz şükranlarımı sunar, teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT iv
TEŞEKKÜR vi
İÇİNDEKİLER vii
TABLOLAR ix
ŞEKİLLER x
SİMGELER VE KISALTMALAR xiv
1. GİRİŞ 1
2. LİTERATÜR ÖZETİ 3
2.1. Genel 3
2.2. Dişliler 5
2.2.1. Dişli Çeşitleri 6
2.2.2. Dişli Ana Kanunu 10
2.2.3. Dişli Çark Mekanizmaları 12
2.3. Dişli Çark Üretim Metotları 15
2.3.1. Döküm Metodu 15
2.3.2. Modül Frezeleri İle Dişli Üretim Metodu 16
2.3.3. Zımbalama (Punch) Metodu 16
2.3.4. Sinterleme Metodu 16
2.3.5. Lazer Kesim Metodu 17
2.3.6. Enjeksiyon (Püskürtme) Metodu 17
2.3.7. Haddeleme veya Ovalama Metodu 17
2.3.8. Şablona Göre Dişli Üretim Metodu 17
2.3.9. Yuvarlama Metodu 17
2.3.9.1. MAAG Sistemi 18
2.3.9.2. FELLOW Sistemi 20
2.3.9.3. Azdırma Metodu 22
2.3.10. Broşlama Metodu İle Dişli Üretimi 23
2.3.10.1. Broşlama Tekniği 24
2.3.10.2. Broş Tezgâhları 26
2.3.10.3. Broşlanan Malzemeler 30
2.3.10.4. Broşlar (Tığlar) 31
2.3.10.5. Broş Malzemeler 32
2.3.10.6. Broşların Tasarımı 33
2.3.10.7. Broş Tasarımında Kullanılan Teknik Hesaplamalar 40
2.3.10.8. Broşlamada Dikkat Edilecek Konular 43
2.3.10.9. Broşlamada Kesme Sıvıları 44
2.3.10.10. Broşların Çeşitleri 44
2.3.10.11. Broşlama Ve Broşlama Tekniğinin Avantajları Ve Dezavantajları 46
3. TALAŞLI İMALATTA TALAŞ KALDIRMA MEKANİĞİ 48
3.1. Talaşlı İmalatın Tarihçesi 48
3.2. Malzemelerin Karakteristik Mekanik Özellikleri 49

3.2.1. Gerilme ve Gerinim Kavramı 49
3.2.2. Elastisite Modülü 50
3.2.3. Poisson Oranı 51
3.2.4. Akma, Nihai Ve Kopma (Kırılma) Gerilmeleri Kavramları ve Diyagramı 52
3.3. Talaş Kaldırma Operasyonun Mekaniği 53
3.3.1. Talaş Kaldırma Teorileri 54
3.3.1.1. Ernst, Merchant ve Pispaen Yaklaşımı 54
3.3.1.2. Lee ve Shaffer Yaklaşımı 59
3.3.1.3. Oxley Yaklaşımı 62
3.4. Talaş Oluşumuna Etki Eden Faktörler 63
3.5. Ortogonal (Dik) ve Meyilli (Eğik) Kesme İşlemi 64
3.6. Kayma Düzlemi ve Kayma Açısı 66
3.7. Takım-Talaş Temas Boyu 67
3.8. Kesme Kuvvetleri ve Gerilmeler 68
3.8.1. Talaş Kaldırmada Oluşan Kesme Kuvvetleri 68
3.8.2. Talaş Kaldırmada Gerilme Dağılımı 70
3.8.2.1. İş Parçasında Gerilme 70
3.8.2.2. Takım-Talaş Ara Yüzeyindeki Gerilme 71
3.9. Takım-Talaş Ara Yüzeyindeki Sürtünme 72
3.10. Talaş Kaldırmada Isı Oluşumu 74
3.10.1. Kesme Sıcaklığı 75
4. SONLU ELEMANLAR METODU İLE ANALİZ 78
4.1. Giriş 78
4.2. Sonlu Elemanlar Metodunda Kullanılan Elemanlar 82
4.3. Sonlu Elemanlar Metodu ile Problem Çözümü 84
4.3.1. İki Boyutlu (2D) Modelleme 84
4.3.2. Üç Boyutlu (3D) Modelleme 86
4.4. Sonlu Elemanlar Metodu ile Analizde Malzeme Özellikleri Tayini 87
4.4.1. Johnson & Cook Malzeme Modeli 87
4.5. Eksplisit (Explicit) (Açık) Dinamik Analiz Teorisi 90
4.6. Eşdeğer (von-Mises) Gerilme 91
4.7. Hourglass Modları ve Hourglass Enerji 92
4.8. Sonlu Elemanlar Metodunun Avantajları ve Dezavantajları 95
5. ANALİZLER, SİMÜLASYONLAR VE DEĞERLENDİRMELER.....97
5.1. Temas – Çarpışma Analizi ve Simülasyonu 101
5.2. Parça Koparma Analizi ve Simülasyonu 106
5.3. Talaş Kaldırma Analizi ve Simülasyonu 109
5.4. İç Yüzey Broşlama ile Çember Dişli Açma Analizi ve Simülasyonu 116
5.5. Dış Yüzey Broşlama ile Güneş Dişli Açma Analizi ve Simülasyonu..... 129
6. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÖNERİLER 140
KAYNAKLAR.....143
EKLER 147
ÖZGEÇMİŞ 151

TABLOLAR

Sayfa

Tablo 2.1. Broş malzemeler ve kesme hızları [10].....30
Tablo 2.2. Broş malzemeleri [10].....32
Tablo 2.3. Broş dişinin açıları [10] 36
Tablo 2.4 Broş dişinin ölçüleri [10].....37
Tablo 2.5. Dış broş takımının ilerleme (h) değerleri [10].....38
Tablo 2.6. İç broş takımının ilerleme (h) değerleri [10] 39
Tablo 2.7. Broşlamada kesme sıvıları [10] 44
Tablo 4.1. Malzemelere ait Johnson & Cook malzeme modeli parametreleri [54] .89

ŞEKİLLER

Sayfa
Şekil 1.1. Basit planet dişli mekanizmasının ana kısımları 2
Şekil 2.1. Broş kesici takım ve broşlama tezgâhı [2] 3
Şekil 2.2. Dişliler.....5
Şekil 2.3. Silindirik düz ve helisel dişliler 6
Şekil 2.4. Çavuş (ok) dişli 7
Şekil 2.5. Kremayer dişli.....7
Şekil 2.6. Silindirik sabit çevresel dişli ve güneş dişi 7
Şekil 2.7. Konik dişli 7
Şekil 2.8. Sonsuz dişli 8
Şekil 2.9. Silindirik dişli çarklar 8
Şekil 2.10. Salyangoz dişli.....9
Şekil 2.11. Konik dişli dişli 9
Şekil 2.13. Çevre hızları [4] 11
Şekil 2.14. Düz ve Helisel alın dişli Pinyon ve Çark çifti [7] 13
Şekil 2.15. Döküm dişli savaş topu mekanizması (19.yy.).....15
Şekil 2.16. Modül freze dişli ile dişli açma 16
Şekil 2.17. Modül freze dişli ile dişli açma [9] 18
Şekil 2.18. MAAG Sistemi şematik gösterimi [9].....19
Şekil 2.19. FELLOW Sistemi ile çalışan makinanın şematik anlatımı [9].....20
Şekil 2.20. FELLOW dişli çark üretim yöntemleri ile düz dişli ve helis dişli açma sistemleri [9] 21
Şekil 2.21. FELLOW Sistemi kesici bıçakları [9].....21
Şekil 2.22. Azdırma Metodu ile diş açma çalışma prensibi [9].....22
Şekil 2.23. Broş tığı [1] 23
Şekil 2.24. Yatay broş tezgâhlarda piston silindir sistemi [10] 24
Şekil 2.25. Dikey broş tezgâhlarında dişli açma operasyonu [11].....25
Şekil 2.26. Broş takım tezgâhı [2].....27
Şekil 2.27. Çalışma özellikleri bakımından broş tezgâh çeşitleri 28
Şekil 2.28. Zincir broş tezgâhı 28
Şekil 2.29. Yatay broşlama tezgâhı 29
Şekil 2.30. Çeşitli broşlar.....31
Şekil 2.31. San –Tez projesi kapsamında üretilen broşlar (broş tığlar) [11] 31
Şekil 2.32. Broş tığı tasarımları 33
Şekil 2.33. Broş dişleri [10].....34
Şekil 2.34. Broş dişinin açıları ve talaş kırıcısı.....35
Şekil 2.35. Broş dişlerin talaş kaldırması.....35
Şekil 2.36. Broş diş açıları ve broş takımı 37
Şekil 2.37. Broş dişi.....38
Şekil 2.38. Broşlama operasyonu.....41
Şekil 2.39. Broş (tığ), broş tezgâhı ve broşlama.....42
Şekil 2.40. Kesme sıvısının broşlama operasyonuna uygulanması.....44
Şekil 2.41. Dış yüzey ve iç yüzey broşları [11] 45
Şekil 2.42. Deliğe broşlama ile dört taraflı kama kanalı açma 46

Şekil 3.1. Talaşlı imalat makineleri [12] 48
Şekil 3.2. Gerilme çeşitleri 49
Şekil 3.3. Normal ve kesme geriniminin oluşumu 50
Şekil 3.4. Elastisite modülü.....51
Şekil 3.5. Poisson oranı 51
Şekil 3.6. Akma, nihai gerilme ve kopma gerilmeleri diyagramı [14].....52
Şekil 3.7. Talaş oluşumu [15] 53
Şekil 3.8. Merchant'ın ideal talaş oluşum modeli [16]. 54
Şekil 3.9. Ortogonal kesmede kuvvet diyagramı [16] 55
Şekil 3.10. Piispanen talaş oluşum modeli [16] 59
Şekil 3.11. Ortogonal kesme için Lee ve Shaffer'ın kayma hattı alanı teorisi [19] .60
Şekil 3.12. Farklı teorilerin ve deneysel sonuçların karşılaştırılması 62
Şekil 3.13. Kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi.....64
Şekil 3.14. Kesme yöntemlerinin şematik gösterimi a) Dik (Ortogonal) kesme, b) Eğik (Meyilli) kesme [20].....65
Şekil 3.15. Dik (Ortogonal) kesmede kayma düzlemi ve takım üzerindeki kuvvetler [21]. 65
Şekil 3.16. Dik (ortogonal) kesme modeli [21]. 66
Şekil 3.17. Ortogonal kesme şartlarında takım talaş yüzeyinde oluşan normal ve teğetsel gerilmelerin değişimi [23]. 67
Şekil 3.18. Tornalamada oluşan kesme kuvvetleri [28]. 69
Şekil 3.19. İş parçasında gerilmeler [16]. 70
Şekil 3.20. Kesme esnasında takım-talaş üzerindeki gerilme dağılımları [29].....71
Şekil 3.21. Kesme esnasında takım-talaş üzerindeki gerilme dağılımları [29]. 74
Şekil 3.22. Dik kesmede ısının meydana gelişi [16]. 76
Şekil 4.1. Bir sonlu eleman paket programında (ANSYS) modelin düğüm noktaları ve elemanlar.....78
Şekil 4.2. Ortogonal kesme işleminin modellenmesindeki Eulerian yaklaşımı [46]80
Şekil 4.3. Ortogonal kesme işleminin modellenmesindeki Lagrangian yaklaşımı [46] 81
Şekil 4.4. Tek boyutlu bir sonlu eleman [48].....82
Şekil 4.5. Üçgen sonlu eleman 83
Şekil 4.6. İki Boyutlu (a) Dikdörtgen, (b) İki Üçgenli Dikdörtgen, (c) Dörtgen, (d) Dört Üçgenli Dörtgen Sonlu Elemanlar [48].....83
Şekil 4.7. İki boyutlu katı geometrisi 84
Şekil 4.8. Sonlu elemanlar metodunda kullanılan bazı 3D elemanlar.....87
Şekil 4.9. 8 düğüm noktalı eleman için houglass modları [57].....93
Şekil 4.10. Saf bükülmeye maruz kalmış malzeme içerisindeki eleman.....93
Şekil 4.11. Sonlu elemanlar oluşturulmuş parça üzerinde hourglass görünümü [57]94
Şekil 5.1. Sabit bir alüminyum (AISI AL 6061-T6) dikdörtgenler prizmasına, hareketli levhanın çarpma analizi 97
Şekil 5.2. Sabit bir alüminyum (AISI AL 6061-T6) levhaya, hareketli küre malzemenin çarpıp malzeme koparma analizi.....98
Şekil 5.3. Sabit çelik bir malzemeden (AISI 1006 STEEL), hareketli kesici bir kama ile talaş kaldırma operasyonu.....99
Şekil 5.4. İç broşlama operasyonunun LS-DYNA ile modellenmesi 100
Şekil 5.5. Dış broşlama operasyonunun LS-DYNA ile modellenmesi.....100
Şekil 5.6. ANSYS Workbench paket programı içinde malzeme seçilmesi.....101

Şekil 5.7. ANSYS Workbench paket programı içinde geometrilerin oluşturulması101
Şekil 5.8. ANSYS Workbench paket programı içerisinde sonlu elemanlar (Mesh) oluşturulmuş yüzeyler.....102
Şekil 5.9. ANSYS Workbench paket programı içerisinde tanımlanmış hız ve sabit yüzeylerin gösterimi.....103
Şekil 5.10. Alüminyum şaft üzerinde meydana gelen gerilmelerin dağılımı.....103
Şekil 5.11. Şaftın (AISI AL 6061-T6) üzerinde meydana gelen maksimum eşdeğer gerilmenin (von-Mises) zamana bağlı değişimi.....104
Şekil 5.12. Şaftın (AISI AL 6061-T6) üzerinde meydana gelen maksimum eşdeğer gerinimin zamana bağlı değişimi 105
Şekil 5.13. Alüminyum şaft üzerinde meydana gelen eşdeğer gerinimlerin dağılımı105
Şekil 5.14. Alüminyum (AISI AL 6061-T6) levha ve çelik küre malzeme üzerinde oluşturulmuş sonlu elemanlar (Mesh).....106
Şekil 5.15. Alüminyum (AISI AL 6061-T6) plaka üzerinde meydana gelen eşdeğer von-Mises gerilmeler 107
Şekil 5.16. Alüminyum plakada meydana gelen (AISI AL 6061-T6) maksimum eşdeğer (von-Mises) gerilmenin zamana bağlı değişimi.....107
Şekil 5.17. Alüminyum plakada (AISI AL 6061-T6) meydana gelen maksimum eşdeğer gerinimin zamana bağlı değişimi 108
Şekil 5.18. Talaş kaldırma operasyonunun ANSYS Workbench içindeki kurgusu109
Şekil 5.19. Sabit plaka ve kesici bıçak üzerinde oluşturulmuş sonlu elemanlar...110
Şekil 5.20. Talaş kaldırma operasyonu modeli üzerinde tanımlanan durumlar ...110
Şekil 5.21. Talaş kaldırılan parçada (AISI 1006 STEEL) X – Ekseni boyunca meydana gelen doğrusal deformasyonlar 111
Şekil 5.22. Talaş kaldırılan parçada (AISI 1006 STEEL) X – Ekseni boyunca meydana gelen doğrusal deformasyonların zamana bağlı değişimi.....111
Şekil 5.23. Talaş kaldırılan parça (AISI 1006 STEEL) üzerinde meydana gelen eşdeğer gerilmelerin (von-Mises) dağılımı 112
Şekil 5.24. Talaş kaldırılan parça (AISI 1006 STEEL) üzerinde meydana gelen maksimum eşdeğer gerilmenin (von-Mises) zamana bağlı değişimi 113
Şekil 5.25. Talaş kaldırılan parça (AISI 1006 STEEL) üzerinde meydana gelen eşdeğer plastik gerinimlerin dağılımı 114
Şekil 5.26. Talaş kaldırılan parça (AISI 1006 STEEL) üzerinde meydana gelen maksimum eşdeğer gerinimin zamana bağlı değişimi 114
Şekil 5.27. San-Tez Projesi (01042.STZ-2011-2) kapsamında tasarlanan ilk broş tığ (AISI M2 HSS).....116
Şekil 5.28. ANSYS Workbench LS-DYNA modülü içerisine Johnson & Cook malzeme özelliklerinin tanımlanması.....117
Şekil 5.29. Broş ve çember dişli üzerinde oluşturulmuş sonlu elemanlar 118
Şekil 5.30. Broş (AISI M2 HSS) ve çember dişlinin (AISI 1006 STEEL) analiz için ANYSY Workbench LS-DYNA modülü içinde tanımlanmış durumları 118
Şekil 5.31. LS-PrePost keyword manager içinde kontak tanımlama 119
Şekil 5.32. Johnson & Cook malzeme modelinin LS-PrePost içinde tanımlanması119
Şekil 5.33. LS-PrePost içerisindeki değişkenlerin denetimi 120
Şekil 5.34. Çember dişli (AISI 1006 STEEL) üzerinde meydan gelen etkin von-Mises gerilmeleri (Pa).....121
Şekil 5.35. Çember dişlide (AISI 1006 STEEL) seçilen elemanlar üzerinde meydana gelen etkin gerilmelerin (von-Mises) zamana bağlı değişimi.....122

Şekil 5.36. Çember dişli üzerinde meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimin incelendiği elemanlar.....122
Şekil 5.37. Çember dişli (AISI 1006 STEEL) üzerinde meydana gelen etkin plastik gerinimler (mm/mm) 124
Şekil 5.38. Çember dişli (AISI 1006 STEEL) üzerinde meydana gelen plastik gerinimlerin zamana bağlı değişimi 125
Şekil 5.39. Çember dişli üzerinde meydana gelen gerinimlerin zamanla değişimin incelendiği elemanlar.....125
Şekil 5.40. Çember dişli (AISI 1006 STEEL) ve broş tığ arasında X - Yönünde oluşan kontak kuvvetlerin zamana bağlı değişimi.....126
Şekil 5.41. Çember dişli açma analizinde sistem iç enerjisinin ve hourglass enerjinin zamana göre değişimi.....127
Şekil 5.42. İmalatı yapılan prototip takım tezgâhı ile çember dişli açma operasyonu ve açılan çember dişli [11].....128
Şekil 5.43. San-Tez Projesi (01042.STZ-2011-2) kapsamında tasarlanan ikinci broş tığ (AISI M2 HSS).....129
Şekil 5.44. Johnson & Cook malzeme modelinin LS-PrePost içinde malzemeler için tanımlanması 130
Şekil 5.45. Broş tığ (AISI M2 HSS) ve açılacak güneş dişli (AISI 1006 STEEL) üzerinde oluşturulmuş sonlu elemanlar 131
Şekil 5.46. Güneş dişli (AISI 1006 STEEL) üzerinde oluşan gerilmeler (von-Mises) (Pa) 132
Şekil 5.47. Güneş dişli (AISI 1006 STEEL) üzerinde meydana gerilmelerin (von-Mises) zamana bağlı değişimi 133
Şekil 5.48. Güneş dişli üzerinde meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimin incelendiği elemanlar.....133
Şekil 5.49. Güneş dişli (AISI 1006 STEEL) üzerinde oluşan plastik gerinimler....135
Şekil 5.50. Güneş dişli (AISI 1006 STEEL) üzerinde oluşan gerinimlerin zamana bağlı değişimi 136
Şekil 5.51 Güneş dişli üzerinde meydana gelen gerinimlerin zamanla değişimin incelendiği elemanlar.....136
Şekil 5.52. Güneş dişli (AISI 1006 STEEL) ve broş tığ arasında X - Yönünde oluşan kontak kuvvetlerin zamana bağlı değişimi.....137
Şekil 5.53. Güneş dişli açma analizinde sistem iç enerjisinin ve hourglass enerjinin zamana göre değişimi.....138
Şekil 5.54. İmalatı yapılan prototip takım tezgâhı ile güneş dişli açma operasyonu ve güneş dişli [11].....139

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

α	Sürtünme açısı (°)
β	Talaş açısı, (°)
ϕ, γ	Kayma açısı, (°)
τ	Kayma Gerilmesi, (Pa)
σ	Normal Gerilme, (Pa)
ε	Normal Gerinim, (Pa)
ν	Poisson oranı
E	Elastisite Modülü, (Pa)
G	Kayma Modülü, (Pa)
$F_{T\,/\,n}$	Takım yüzeyi üzerindeki sürtünme / normal kuvvet(i) (N)
ω	Açısal hız,
N_c	Takım yüzeyine etki eden normal kuvvet (N)
R	Takım kuvveti sonucu oluşan bileşke kuvveti (N)
N_s	Kayama düzlemine etki eden normal kuvvet (N)
Fa	İlerleme kuvveti (N)
F_s	Kayma düzlemine etki eden sürtünme kuvveti (N)
L	İşleme boyu (mm)
n	Takım ömrü üssü
Vc	Kesme hızı (m/dk.)
l_c	Talaş takım temas boyu (mm)
$t_{1/2}$	Deforme olmamış / olmuş talaş kalınlığı (mm)
$F_{p\,/\,t}$	Takıma etki eden asıl / pasif kesme kuvveti (N)
A_s	Kayma bölgesindeki talaş kesiti (mm^2)
r	Talaş oranı
K	İş parçasının ısıl yayınım katsayısı
μ	Sürtünme katsayısı
C	Özgül ısı kapasitesi
K	Global rijitlik matrisi

Kısaltmalar

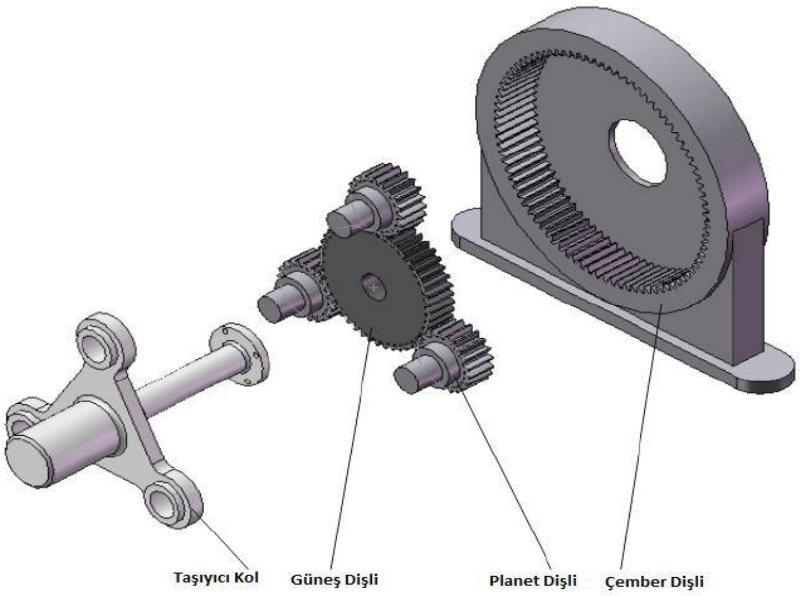
AISI	American Iron and Steel Institute – Amerikan Demir Çelik Enstitüsü (Amerikan Çelik Standardı)
CAD	Computer Aided Design – Bilgisayar Destekli Tasarım
CNC	Computer Numerical Control – Bilgisayarlı Sayısal Denetim
DIN	Deutsches Institut für Normung - Alman Standardizasyon Enstitüsü
FEA	Finite Element Analysis – Sonlu Elemanlar Analizi
FEM	Finite Element Method – Sonlu Elemanlar Metodu
ISO	International Organization for Standardization - Uluslararası Standardizasyon Örgütü
PLC	Programmable Logic Controller - Programlanabilir Mantık Denetleyici

1. GİRİŞ

Gelişen teknolojik yaklaşımlar ve çözümler ile keşif ve icatlar günümüzde hızla artmakta ve dur durak bilmeksizin ilerlemektedir. Teknolojik gelişimlerin hızlanması, günlük hayatı kolaylaştırmakta ve hızlı çözümler sunmaktadır. Bu gelişmeler ışığında, hızlı ve düşük maliyetli üretim yöntemleri, rekabet ve gelişen teknolojiye ayak uydurmak için vazgeçilmez hale gelmiştir. Özelikle ülkemizde ve dünyada iş makinalarının nitelik ve niceliklerinin artması, otomatik şanzımanlı otomobil teknolojisinin endüstriye neredeyse tamamen hâkim olması dişlilerin, özellikle çember dişli ve sistemlerinin önemini ortaya koymuştur.

Dişli ihtiyacının çok büyük boyutlara ulaştığı globalleşen dünyamızda; otomotiv sektörü, iş makinaları ve tarım makinaları gibi yüksek miktarlarda dişli ihtiyacı olan sektörlerle rahat çalışma olanağı sağlayabilmek, ancak; ucuz, kaliteli ve yüksek üretim miktarlarına cevap verebilmekle mümkün olmaktadır. Ülkemizde üretilen otomobil, traktör, yükleyici, ekskavatör gibi çeşitli iş makinalarının yıllık üretim miktarları çok hızlı artışlar göstermekte ve sayıları yüzbinlerce adedi bulmaktadır. Her araçta “4x2” ve “4x4” olma durumlarına göre 2 ila 4 adet planet gruba ait çember dişli kullanılmaktadır. Planet dişli grubu araçlara yüksek tork sağlayan bir sistem olduğundan, burada çalışan dişlilere gelen büyük yükler dişli ömürlerini negatif yönde etkilemektedir. Çember dişliler bu araçlarda en fazla yedek parça değişimi gerektiren dişlilerdir.

Bu makinaların, gerek fabrikadaki montajında gerekse piyasada çalışmakta olanlar için yedek parça ihtiyacı göz önüne alındığında milyonları aşan çember dişli ihtiyacı ile karşılaşılmaktadır. Bu ihtiyaçlar yerli üretimle karşılanamadığından, büyük oranda ithalat yoluyla temin edilmektedir. Bu da her yıl ülkemizden milyonlarca doların çıkmasına neden olmaktadır.



Şekil 1.1. Basit planet dişli mekanizmasının ana kısımları

Ülkemizdeki mevcut teknoloji ile bu dişliler Fellow dişli tezgâhlarında kazıma tekniğiyle açılmaktadır. Bu yöntemle açılan dişliler, broşlamaya oranla çok daha pahalı ve daha zahmetli olduğu gibi, aynı zamanda dişlilerin ölçü hassasiyeti ve yüzey kalitesinin sağlanması oldukça zordur. Örneğin, Fellow dişli tezgâhlarında bir buçuk saatte açılan bir dişli, broşlama ile iki - üç dakika gibi kısa bir sürede açılmaktadır.

Her makinada kullanılmakta olan çember dişli farklı olduğundan, broş tığı ihtiyacı da bu oranda fazladır ve imalatçı sayısı arttıkça bu sayı daha da artacaktır. Yurtdışında broşlama işlemi için gerekli olan broş tezgâhlar firmaların isteklerine göre üretilmesi talep edildiğinde, hem çok uzun temin süreleri hem de çok yüksek fiyatlar söz konusu olmaktadır.

Tez çalışması ve beraberinde yürüyen San-Tez (01042.STZ-2011-2 Broş Kesici Takımları ve Broş Tezgâhı Tasarımı ve Prototip Üretimi) projesi ile broş kesici takım ve tezgâhı dizaynı ve dişli açma operasyonu analizleri ve simülasyonları, sonlu elemanlar metodu temelli programlar ile yapıldı ve elde edilen (broş tığları, çember ve güneş dişliler üzerinde oluşan gerilmeler – gerinimler ve takım için gerekli kuvvetler…) veriler prototip üretimi öncesi proje ortağı firma ile paylaşıldı.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Genel

Broş tezgâhlarının üretimini yapmakta olan yabancı firmalar, her geçen gün makina – elektronik mühendisliği başta olmak üzere diğer mühendislik disiplinlerinde de geliştirmekte olan teknoloji ve ürünleri tasarım ve üretimlerinde kullanmaktadır. Bu sayede; zaman, maliyet ve insan gücü açısından daha verimli çözümler sunabilmektedirler. Günümüzde, PLC yazılımlarının gelişmesi, dokunmatik ekranların kullanılması ve motor teknolojilerinin ilerlemeleri ile broşlama tezgâhları CNC makinalar haline gelmiştir [1]. Ayrıca bu firmalar, broşlama tezgâhlarında kullanılabilecek tığ ebatlarının çeşidi arttırarak, kullanıcılarına tek bir makina ile daha geniş bir yelpazede ürün üretimi sağlamayı hedeflemektedirler.

Şekil 2.1. Broş kesici takım ve broşlama tezgâhı [2]

Yurtdışında, yerli üreticimizin rakiplerinin yaptıkları çalışmalar ve hedefleri, piyasada var oluş stratejileri, bu konuda yapılacak Ar-Ge çalışmasının temellerini oluşturmaktadır. Bu temellerin üzerine Türkiye'de ihtiyaç duyulan ve yerli olarak üretimi bulunmayan dişlilerde göz önüne alındığında büyük çap ve diş sayılarında imal edilecek olan broş tığlarını çekecek-itecek kapasitede olan tezgâh ihtiyacı net olarak ortaya çıkmaktadır.

Federal Almanya Cumhuriyeti'nde yer alan Stenhoj Hydraulik firması yeni tasarım broşlama tezgâhı ile yazıcı kadar sessiz, filtreler sayesinde oldukça temiz çalışan üretim kapasitesini geliştirdiği köprüleme sistemi ile tek bir tığla 2500 parçadan 7500 parçaya çıkarmıştır. Bu çalışmada 'çekme-itme' olarak adlandırılan bir yöntem kullanmıştır [3].

Her broş tığının imalatı, diş açacağı malzemeye, diş sayısına, diş modülüne, açacağı dişin boyuna, kalınlığına göre değişkenlik göstermekte olup, ayrı tasarım ve Ar-Ge çalışması gerektirmektedir.

Broş tığı üretimi; oldukça hassasiyet ve bilgi birikimi isteyen çok operasyonlu bir imalat türüdür. Bu üretimde, broş tığlarının kesme açıları, dişlerin istikamet ve profil hassasiyetleri ve kiriş ölçüleri gibi değerler büyük önem arz etmektedir.

Broşlar operasyon metoduna, operasyon tipine, fonksiyonlarına göre sınıflandırılmaktadır;

a) Operasyon metoduna göre;

- Basma tipi broşlar
- Çekme tipi broşlar

b) Operasyon tipine göre;

- Dış yüzey broşları
- İç yüzey broşları

c) Fonksiyonlarına göre;

- Helisel broşlar
- Kama açma broşları
- Yuvarlak broşlar
- Kare, altıgen, köşeli broşlar
- Evolvent broşlar
- Çap kalibre broşları

Broş tığların üretimi için belirlenen DIN 5480, DIN 5482, DIN 5481, DIN 5462, DIN 5463, DIN 5460, DIN 5471, DIN 5472, SAE 9611 normları çalışmalarda yol gösterici oldu. Prototipi üretilen tığlar bu standartların belirlediği özellikleri karşılamaktadır.

2.2. Dişliler

Dişliler; muhtemelen cıvatalar dan daha eski makina elemanlarındandır. Dişlilerin, günümüzden binlerce sene evvel Mezopotamya'da sulama tesislerinde kullanıldıkları düşünülmektedir. Milattan önce ve daha sonraki zamanlarda da kum saatleri için de kullanılmışlardır. Romalılar tarafında iyice geliştirilen, tahrik pim profilli dişlileri, un değirmenlerinde de kullanılmış ve birçok alana uygulanmışlardır. Romalılar, üretilen dişlilerin demirden veya bronzdan yapılmasının dayanım süresini arttırdıklarının farkına varmış ve dişlileri bu malzemelerden üretmişlerdir.

Şekil 2.2. Dişliler

Buhar makinalarının icadı ve sanayi devriminin gelişmesiyle, dişli çarklarda da önemli gelişmeler olmuştur. Az kayıp ile güç iletebilmek için, redüktörlerin ve dişli mekanizmalarının, daha verimli imalatları gereksinimi doğmuştur. Dolayısıyla, metal ve sikloid profilli dişliler imal edilmeye başlanmıştır. 18.yy. ortalarında, ilk kez dişlilerin standartlaştırılması fikri ortaya çıktı. 1840 senesinde Willis tarafından yayımlanan ilk dişli standardizasyon kataloğunda; daire çapları standartlaştırılırken, dairesel diş açıklığı kavramı yerini, daha avantajlı olduğu

görülen çapsal adım kavramı geliştirildi. Hemen hemen aynı zamanlarda, evolvent profiller ortaya çıktı. 1874 senesinde Brown ve Sharpe işletmesi tarafından yirmi üç parçadan meydana gelen tüm çapsal adım ölçülerinde kullanım sağlayan freze takımı piyasaya sürüldü [4].

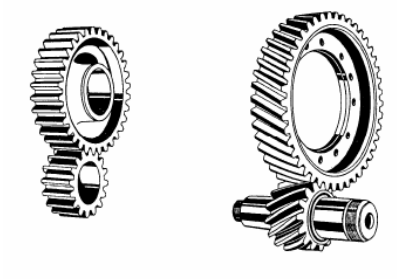
1856 senesinde Schiele tarafından ilk yuvarlama metodu ile üretim yapan takım ve 1899 senesinde de Fellow tipi dişli çark açama bıçağı geliştirildi. Bu yıllarda henüz diş dibi alt kesimi bilinmemekteydi ve ilk kez 20.yy. başlarında pratik olarak keşfedildi ve tüm teorisi daha sonradan tamamlandı.

Sanayii devrimin hızla yükselişi, otomobil sanayinin, 20.yy. başlarında seri imalata geçmesi, dişli çarkların gelişmesinin önünü açtı. 1908 senesinde Sunderland işletmesi tarak biçiminde dişli açma takımını geliştirdi. 1909 senesine gelindiğinde, MAAG firması kurucusu Max MAAG, günümüzdeki diş açma sistemini geliştirdi [5].

Günümüze gelene kadar dişli açma operasyonları bütününde (biçim, bıçak takım vs.) birçok gelişme oldu. Günümüzde sadece birkaç firma bütün işlemleri yapabilen, elektronik kumanda tertibatlı, üniversal makinaların imalatını yapmaktadır.

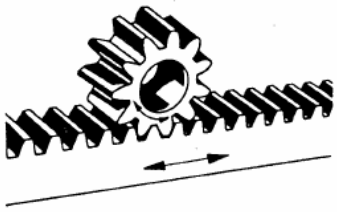
2.2.1. Dişli Çeşitleri

Dişli çark sistemleri çok büyük moment ve kuvvetleri farklı yönlerde iletebilirler. Çeşitli dişli çark sistemleri aşağıda bulunan resimlerden (Şekil 2.3-4-5-6-7-8) incelenebilir. Sistemlerde; dış alın çiftlerinin hareket yönleri birbirine zıttır, ancak bir tanesi iç dişli olan çiftlerinin hareket yönleri ise aynıdır.

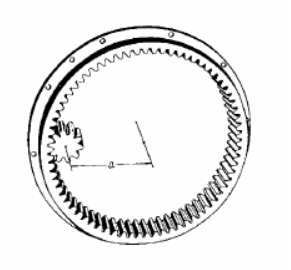


Şekil 2.3. Silindirik düz ve helisel dişliler

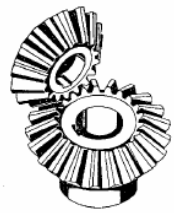
Şekil 2.4. Çavuş (ok) dişli



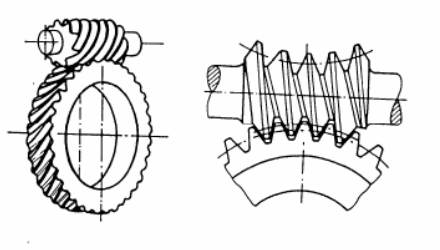
Şekil 2.5. Kremayer dişli



Şekil 2.6. Silindirik sabit çevresel dişli ve güneş dişi



Şekil 2.7. Konik dişli



Şekil 2.8. Sonsuz dişli

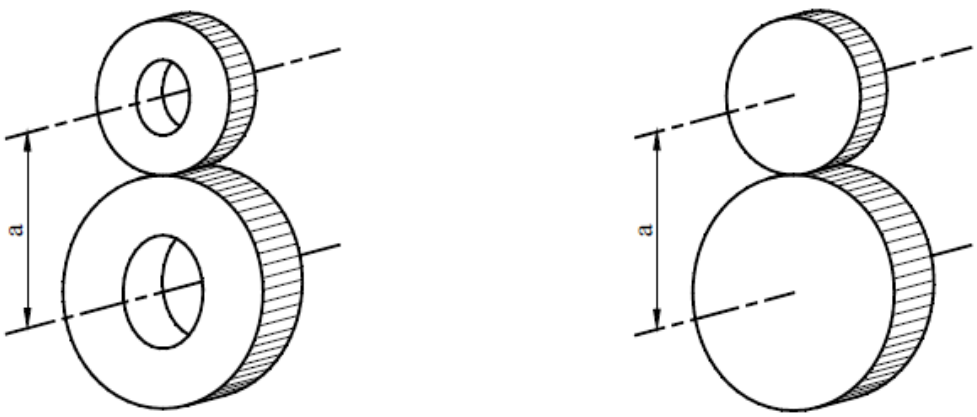
Dişli çiftlerini eksen koşullarına göre aşağıdaki biçimde tanımlayabiliriz;

- Eksenleri paralel dişliler;

a) Silindir çarklı (içi dolu veya boş), doğru, çavuş veya helis dişliler ile silindirik dişli çiftleri,

b) Düz veya helis dişli, iç dişli çiftleri,

c) Genellikle alın dişli redüktörler sistemde tercih edilirler. Çevirme oranı ise yaklaşık olarak i ≤ 8 veya özel biçimde i_{max} ≈ 10 seçilebilir.



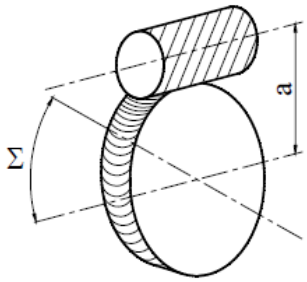
Şekil 2.9. Silindirik dişli çarklar

- Çapraz eksenli kesişmeyen dişliler;

a) Silindirik,

b) Sonsuz vida ve karşılıklı dişli,

c) Genellikle salyangoz redüktör sistemlerde tercih edilirler. Yaklaşık olarak i = 5 – 60 arasında veya özel biçimlerde i_{max} ≈ 100 seçilmesi önerilir.



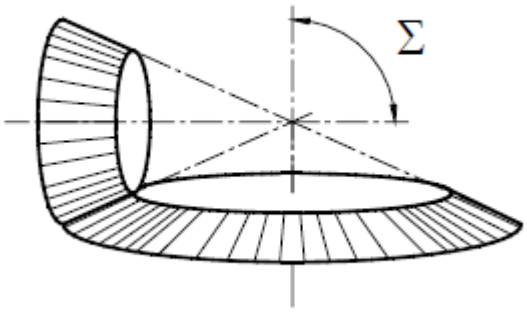
Şekil 2.10. Salyangoz dişli

- Çapraz eksenli kesişen dişliler;

a) Konik,

b) Dış dişli, helis ve düz dişli ya da yay dişli (evolvent veya daire profilli).

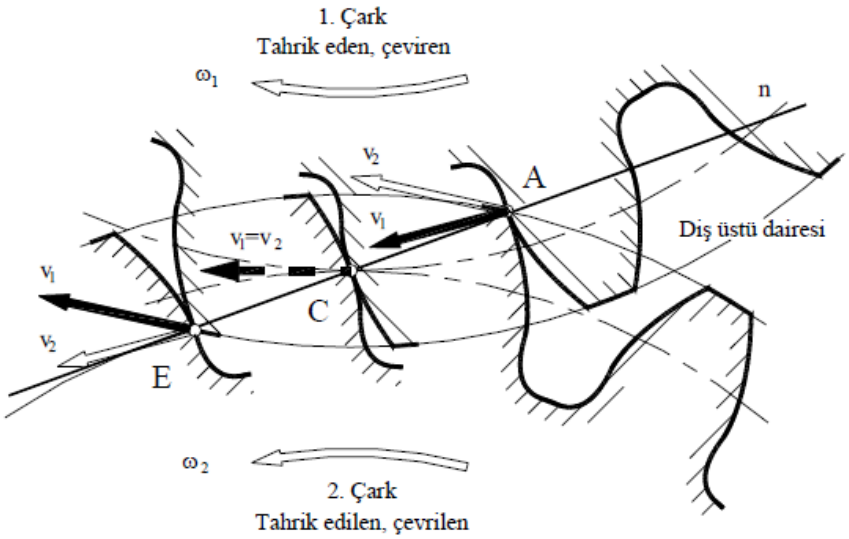
c) Genellikle konik dişli redüktör sistemlerde tercih edilir. Çevirme oranı i_{max}≈ 10 şeklinde seçilebilmektedir [4].



Şekil 2.11. Konik dişli dişli

2.2.2. Dişli Ana Kanunu

Dişli çarkların birlikte çalışabilmeleri için, diş profilleri uyumlu olmalıdır. İki diş profilin karşılıklı uyumu, birbiriyle aynı oldukları anlamına gelmez. Örneğin; göz kararı bir dişli profili çizip, iki adet imal ederek, bu dişlileri birlikte çalıştırırsak, bazı koşullarda birbirini ezdiklerini veya bazı koşullarda birbirlerinden ayrıldıklarını hatta çok zor döndüklerini, ya da hiç dönmediklerini gözlemleyebiliriz. Dişli çiftlerin, sistemdeki gücü, bir milden diğerine normal bir şekilde iletebilmesi için, her bir dişlerin açısal hızlarının ($\omega_1 ve\ \omega_2$) eşit (her durumda) ve de sabit olmalıdır [6].



A Noktası: Temasın başlangıcı

C Noktası: Yuvarlanma noktası

E Noktası: Temas noktası

Şekil 2.12. Dişli çalışma prensibi [6]

Dişli çiftlerde diş yanakların temas halinde düzenli hareketi yalnızca, hareket noktası C noktasında hareketi oluşturan dişli yanağının teğetsel hızı ile hareket ettirilen dişli yanağının teğetsel hızı eşit olmalıdır. Bununla birlikte, temas noktalarındaki çevre hızının yarıçapa oranı eşit olmalıdır.

Bu koşullar altında iletim oranı;

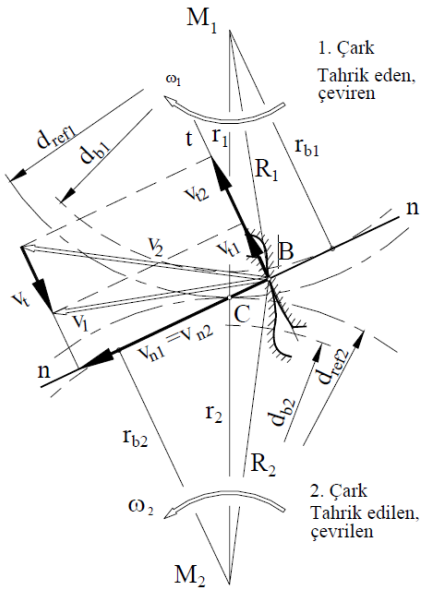
$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{v_1/R_1}{v_2/R_2} = \frac{v_1}{R_1}\,\frac{R_2}{v_2} \tag{2.1}$$

Temas sadece, yuvarlanma noktası C de mevcut ise, $v_1 = v_2$ olur;

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{d_2}{d_1} \tag{2.2}$$

Eğer, temas sadece yuvarlanma noktası olan C noktasında değil ise, temas başlangıç noktası olan A noktası ile temasın en son noktası E noktası arasında birçok bölgede oluşur.

Şekil 2.13'de birlikte çalışan ve merkezleri M1 ve M2 noktalarında olan iki dişli çark için dişli profilleri mevcuttur. İl dişli çark için B noktasındaki o anda mevcut olan teğetsel hız, M_1B doğrusuna dik ve de v_1 büyüklüğündedir. İkinci dişli çark için B noktasının aynı zamandaki hızı da M_2B doğrusuna dik ve v_2 büyüklüğündedir. B noktasında ki iki dişli profiline de müşterek teğet çizerek, aynı nokta üzerinden çizilen teğete bir dik çizelim. Çizilen dik çizgi normal doğru (n-n) olarak adlandırılır (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. Çevre hızları [4]

Daha sonra sistemdeki v_1 ve v_2 teğetsel hızları, normal doğru ve yanak teğet doğrultularında bileşenlerine ayrılarak, hızların normal doğrultusundaki bileşenlerine v_{n1}, v_{n1} ve teğet doğrultusundaki bileşenlerine v_{t1}, v_{t1} diyelim. Müşterek normal n-n hareket noktası C noktasından geçiyor ise, dişlilerin normalde ki hızları v_{n1} ve v_{n1} aynı yönde ve de eşittir. Fakat bu durum sağlanamıyor ve de $v_{n1} < v_{n1}$ durumu söz konusu ise, yanaklar birbirine baskı uygular, $v_{n1} > v_{n1}$ durumundaysa yanaklar birbirlerinden uzaklaşırlar.

$$v_{n1} = \omega_1 . r_{n1} \tag{2.3}$$

$$v_{n2} = \omega_2 . r_{n2} \tag{2.4}$$

Bu burunda hızlar eşittir;

$$v_{n1} = v_{n2} \tag{2.5}$$

Dişli ana kanunu;

Eğer birlikte çalışan dişlilerin, temas noktasının B noktasındaki normalleri n-n, hareket noktası C noktasından geçiyor ise, dönme hareketi değişmeyen çevirme oranıyla fonksiyon yapar.

Karşılıklı iki yanak profil, müşterek kavrama doğrusuna haiz ve de doğru dişli ana - kanununun şartlarını sağlıyorsa, birlikte çalışırlar [6].

2.2.3. Dişli Çark Mekanizmaları

Dişli çark mekanizmaları; kullanım alanı çok geniş, hem güç iletimi, hem de erişilebilen çevre hızları açından mekanizmalar içinde özel bir yere sahiptir.

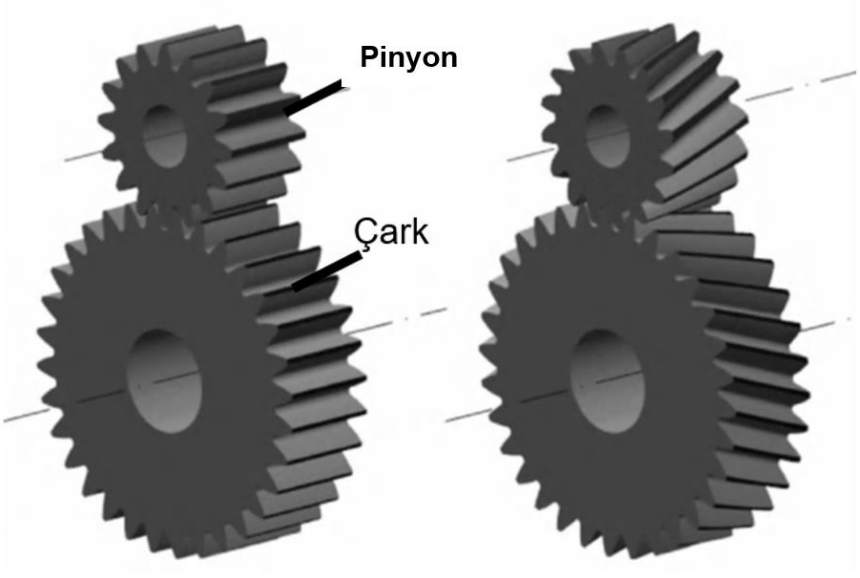
Dişli çark mekanizmasını meydana getiren her bir elemana, dişli çark ya da dişli denir. İki adet dişli çarktan meydana gelen mekanizmada, küçük olan dişli (yani diş sayısı az olan) pinyon, büyük olan dişli ise çark olarak adlandırılır [7].

Bu mekanizmaların en sık kullanıldığı yerler hareket ve güç iletme işleridir ve en az iki adet dişli çarktan meydana gelen sistemlerdir. Gücün iletmesi bakımından, mekanizmada döndüren ve döndürülen elemanlar vardır.

Güç formülünü incelediğimizde;

$$P = M_d . \omega \tag{2.6}$$

sisteme sağlanan güç sabit olduğundan dolayı hız ve moment sistemde değiştirilebilir. Örnek olarak; araçta motorun sağladığı güç sabit olduğu için hız arttırmak gerektiğinde moment azalır. Bu durum çeşitli diş sayılarında dişliler ile sağlanır. Şekil 2.14'de görülen dişli çark mekanizmasında, döndüren (pinyon) dişli ω_1 açısal hızı hareket ederken dişli çarkı ise ω_2 açısal hızıyla hareket eder (Şekil 2.14).



Şekil 2.14. Düz ve Helisel alın dişli Pinyon ve Çark çifti [7]

Bu mekanizmadaki dişli çiftin hızları oranı, çevrim oranı veya hız oranı olarak tanımlanır ve aşağıdaki biçimde ifade edilir;

$$i_{1,2} = \pm \frac{\omega_1}{\omega_2} = \pm \frac{n_1}{n_2} \tag{2.7}$$

Eşitlik 2.7'de $i_{1,2} > 1$ olduğu zaman, sistem hız düşürücü yani redüktör, $i_{1,2} < 1$ olduğunda ise hız arttırıcı olur.

Mekanizma için verim ifadesi inceleyecek olursak,

$$\eta = \frac{\text{Alınan Güç}}{\text{Verilen Güç}} \tag{2.8}$$

Sitemde; pinyondaki güç P_1 olarak ve çarktaki güç P_2 olarak ifade edilirse, dişli sistemi için verim ifadesi,

$$\eta = \frac{P_1}{P_2} \tag{2.9}$$

biçiminde yazılır. Dişli çarklar sistemlerinin verimi, η = 0,98 olarak kabul edilerek kullanılır.

Çark ve pinyon için dönme momentlerini ifade edecek olursak;

$$M_{d1} = 9550.\frac{P_1}{n_1} \tag{2.10}$$

$$M_{d2} = 9550.\frac{P_2}{n_2} \tag{2.11}$$

Eşitliklerde; gücün birimi kW ve de n, d/d olarak alındığı zaman, eşitliğin sonucu N.m olacaktır. Eşitlik 2.10 ve 2.11'i oranlarsak,

$$M_{d2} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)\left(\frac{n_2}{n_1}\right) M_{d1} \tag{2.12}$$

$$M_{d2} = \eta_{1,2}\, i_{1,2} M_{d1} \tag{2.13}$$

eşitliklerine ulaşırız [7].

2.3. Dişli Çark Üretim Metotları

Dişli çarklar (dişliler) imalatında kullanılan malzeme, geometrik büyüklük ve de kullanım amaçları doğrultusunda farklı biçimlerde üretilirler. Dişlilerin üretimi; talaşsız imalat yöntemi (cürufluma, döküm ve pres vs.) ya da talaşlı imalat yöntemi (freze, dik ve silindirik planya vs.) ile iki farklı şekilde yapılmaktadır. Fakat yüksek kalite dişli talepleri, en iyi talaşlı imalat metodu ile karşılanır [8] [9].

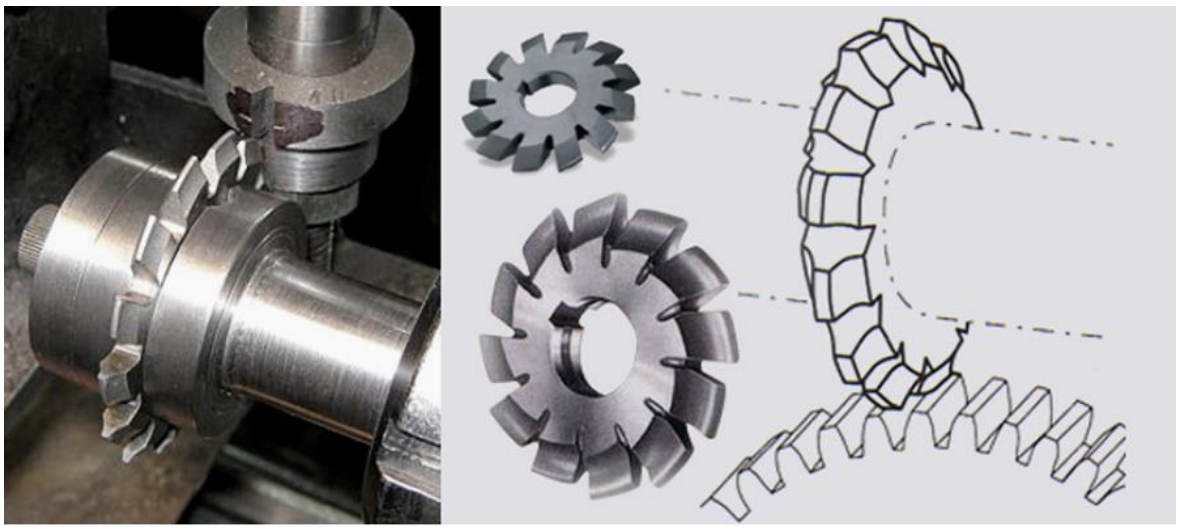
2.3.1. Döküm Metodu

Dönüşü yavaş ($v \leq 2$ m/s) olan dişlilerde ve çok kaba işlerde (el vinçleri, tuğla makinaları vs.) kullanılan dişli çarklarda dökme dişliler işlenmeden kullanılabilirler. Paslanmaya dayanıklı olmalarından dolayı açık alanlarda ve de deniz veya deniz kenarı bölgelerde kullanımlarını yaygınlaştırır.

Şekil 2.15. Döküm dişli savaş topu mekanizması (19.yy.)

2.3.2. Modül Frezeleri İle Dişli Üretim Metodu

Karşılıklı olarak çalışan iki adet dişli çark ile diş profillerinin resimleri çizilerek, bu resimlere göre disk biçimde form frezeleri üretilip, bu frezeler ile dişler açılabilir. Bu metot ile diş açma operasyonu, üniversal freze tezgâhları ile yapılır. Bu operasyon ile bir diş açıldıktan sonra, divizör ile çark bir diş adımı kadar ileri çevrilir, daha sonra ikinci diş açılır. Günümüzde, divizörden kaynaklanacak hatalara karşı CNC tezgâhları kullanılmaktadır.



Şekil 2.16. Modül freze dişli ile dişli açma

2.3.3. Zımbalama (Punch) Metodu

Zımbalama (punch) tekniği, sac malzemelerinden dişli üretim metodudur. Sayaç, küçük modüler aparatlar ve saat gibi çok küçük güçleri ileten dişli çarkların imalatında kullanılır. İnce saclardan kesilerek imalatı yapılan bu dişliler, kesici aparatların hassasiyetine göre oldukça hassas imal edilebilmektedir.

2.3.4. Sinterleme Metodu

Sinterleme metoduyla dişli çark üretiminde; özel presler kullanılarak istenilen geometrik ölçüdeki dişli kalıplarında malzeme preslenerek sinterlenirler. Üretilen bu dişliler bir miktar gözenek bulundurabilirler.

2.3.5. Lazer Kesim Metodu

Kalınlığı çok fazla olmayan, ince bir et kalınlığına sahip olan dişliler (en çok 12 mm) bu metot ile üretilir. Hassasiyetin çok elzem olmadığı ve düşük hızlı sistemlerde tercih edilir.

2.3.6. Enjeksiyon (Püskürtme) Metodu

Enjeksiyon metodu ile dişli üretimi düşük güçler aktaran ve adetli üretilen aparatlar için kullanılır. Bu metotla imal edilen dişli çarklar; ısıtma işlemi ardından, madeni kalıplara yüksek basınç ile püskürtülürler ve çok kısa sürede soğutulurlar. Soğuma esnasında meydana gelecek büzülme de hesaplanarak, kalıplar buna uygun boyutta seçilmelidir. Plastik dişli çarklar genellikle bu metot ile üretilir.

2.3.7. Haddeleme veya Ovalama Metodu

Ovalama yöntemi ile çeşitli cıvata ve vida üretiminden elde edilmiş sonuçlar, bu yöntem ile dişli üretilmesinin önünü açmıştır. Haddelemeyle üretim metodu ilk olarak, çok sayıda üretilen otomobil dişlilerinin üretiminde başlamıştır. Metot, civata üretim metodunun aynısıdır.

2.3.8. Şablona Göre Dişli Üretim Metodu

Bu tezgâhlar; genel olarak özellikli konik dişlilerin üretiminde tercih edilir. Yuvarlanma yöntemi ile diş açan tezgâhların gelişmesiyle birlikte, bu metot önemini büyük ölçüde kaybetmiştir. Bu metoda göre üretim oldukça basit olduğundan ve yerel biçimde üniversal tezgâhlar ile konik dişli imali problemleri yaşayan küçük ve orta büyüklükteki üreticiler tarafından tercih edilir. Çalışma biçimi, kopya freze metodudur.

2.3.9. Yuvarlama Metodu

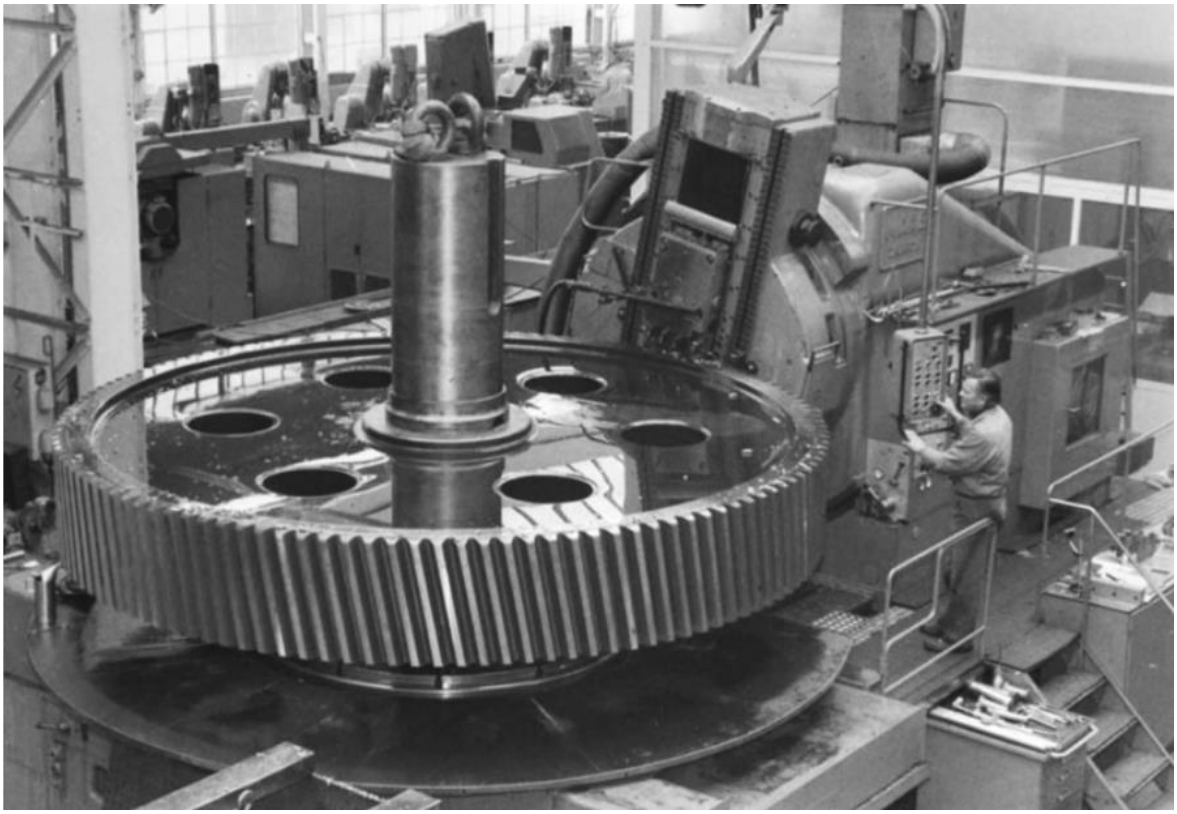
Yuvarlama metodu ile dişli üretiminde; üretilecek dişli ve imalat takımı, uyum içinde çalışan dişli çark sistemlerinin dişlileri gibi birbirinin üzerinde hareket etmektedirler. Bu metotta üretilecek dişli taslağının diş boşluklarını oymaktadır. Takım yuvarlanma ve kesme gibi öteleme hareketini icra ederken, dişli taslağı da aynı anda kayma hareketi yapar ve bu şekilde dişli çark meydana gelir.

Dişlilerin imalatında en çok kullanılan yuvarlama yöntemleri;

- MAAG sistemi (kremayer şeklindeki kesici bıçak kullanılarak),
- FELLOW sistemi (dişli çark şeklindeki kesici bıçak kullanılarak),
- Azdırma sistemi (sonsuz vida şeklindeki freze kullanılarak).

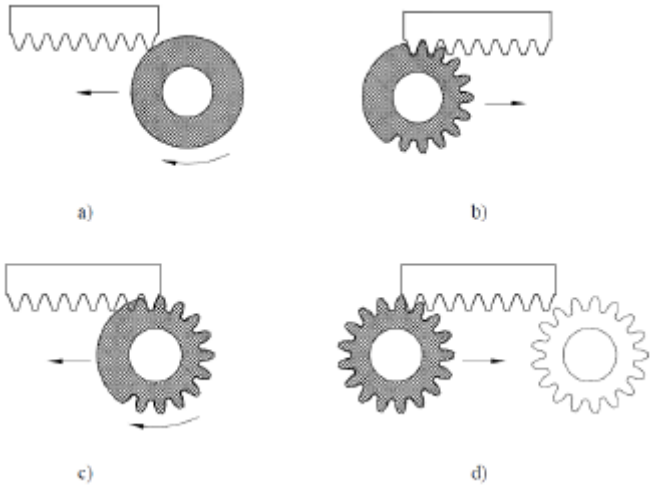
2.3.9.1. MAAG Sistemi

MAAG tezgâhlarıyla, helis ve düz (silindirik) dış alın dişlileri, dişli mil, zincir dişliler ve de benzer profillerin form ve yuvarlama takımıyla üretimi yapılabilir. Ek bir takım ile de, helis ve düz (silindirik) iç dişliler ve kremayer dişlilerin imalatı yapılmaktadır.



Şekil 2.17. Modül freze dişli ile dişli açma [9]

MAAG tezgâhı ile diş açma operasyonu şematik incelenmesi aşağıdaki gibidir.



a) Başlangıç

b) Geri dönüş

c) Tekrar

d) Son ve geri dönüş

Şekil 2.18. MAAG Sistemi şematik gösterimi [9]

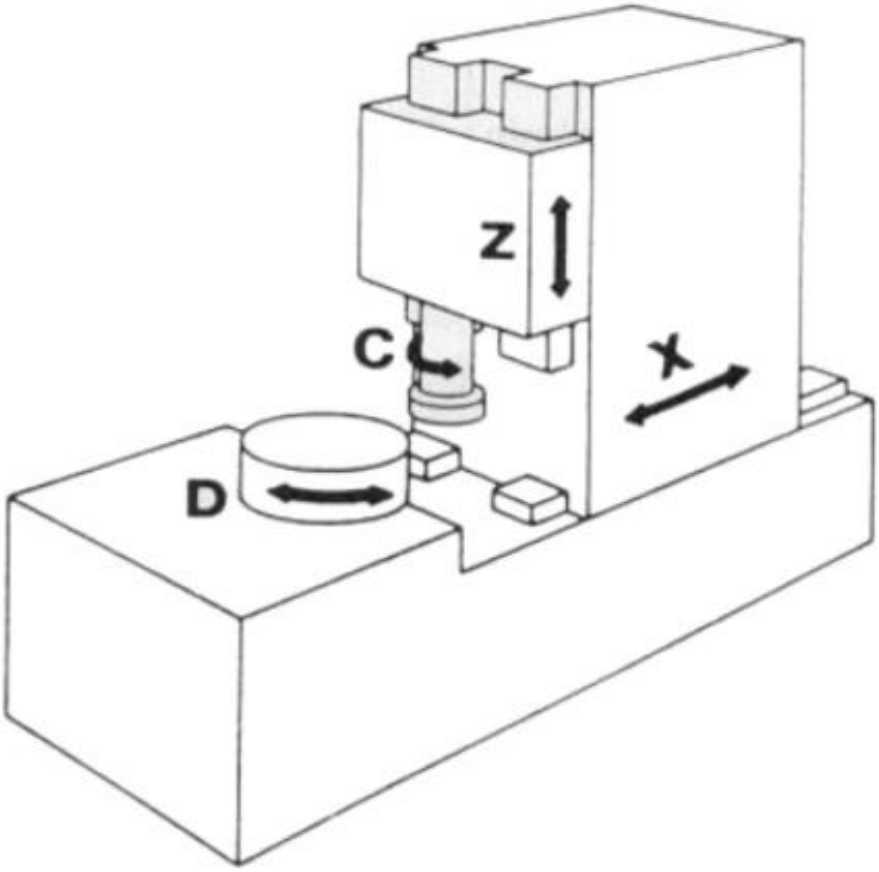
Kremayer biçimindeki bıçağın iki yüzeyi aynı anda kestiğinden, dişlerin sağ ve sol profilleri aynı anda açılmaktadır.

Kremayer biçimindeki bıçak; yukarı yönden aşağı yöne doğru planya hareketi yapar ve sonra tekrar yukarı yöne hareket ettikten, yani keserek diş açtığı çarktan ayrıldıktan sonra, diş açılan çark kendi ekseni etrafında belirli bir dönüş yapar ve kesici bıçak eksenine paralel şekilde ilerler. Daha sonra, kesici bıçak ikinci bir kesme işlemi gerçekleştirir. Operasyon sırasındaki dönme ve ilerleme hareketleri, tekerleğin kremayer rayın üstünde yuvarlanma hareketine benzer.

Dönme ve ilerleme hareketleri ne kadar küçük olurlarsa, açılan dişin yüzeyi de bir o kadar hassas ve kaliteli olacaktır. Kremayer biçimindeki bıçağın diş sayısı, sınırlı olduğu için tezgâh aralıklarla kesme işine otomatikman ara verir ve diş açılan çark dönüş gerçekleştirmeden kesici bıçak başlangıç noktasına geri gelir. Daha sonra bu operasyon tekrar eder.

2.3.9.2. FELLOW Sistemi

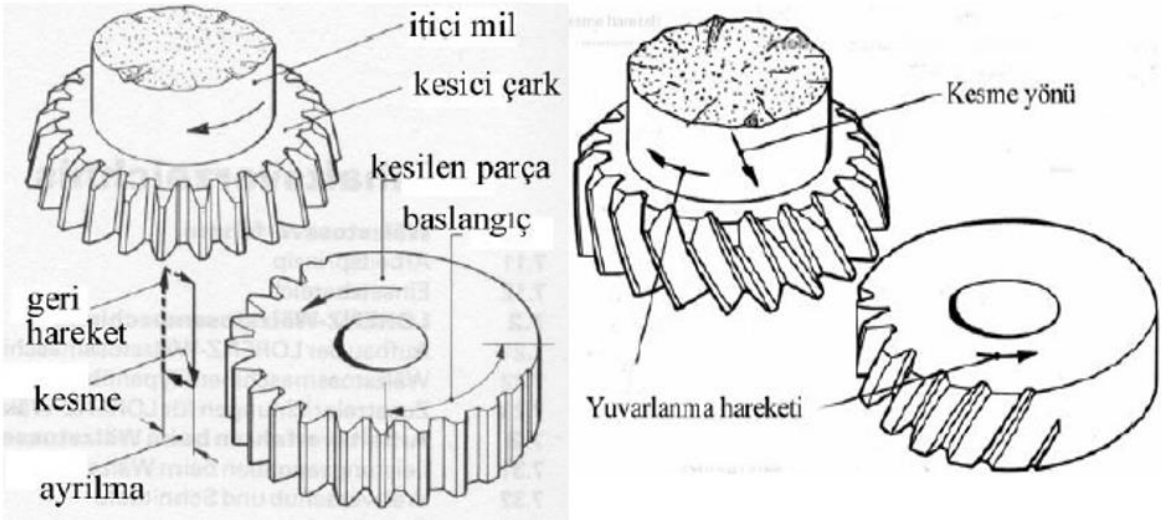
FELLOW ile MAAG sistemleri arasındaki temel fark, FELLOW sisteminde, MAAG sisteminin kullanılan kremayer biçimindeki düz kesici bıçak yerine, yuvarlak dişli çark biçiminde kesici bıçakların kullanılmasıdır.



Z: Kesici takımının yukarı aşağı hareketi
X: Kesici takımının İleri geri hareketi
C: Kesici aletin yuvarlanma hareketi
D: İşlenen parçanın yuvarlanma hareketi

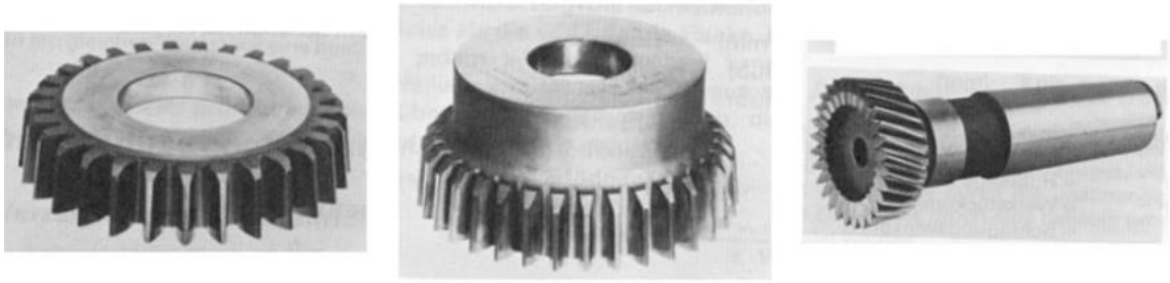
Şekil 2.19. FELLOW Sistemi ile çalışan makinanın şematik anlatımı [9]

Ana çalışma ilkesi, Şekil 2.19 ve Şekil 2.20'de gösterilen FELLOW sistemi Amerika Birleşik Devletlerin' de yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.20. FELLOW dişli çark üretim yöntemleri ile düz dişli ve helis dişli açma sistemleri [9]

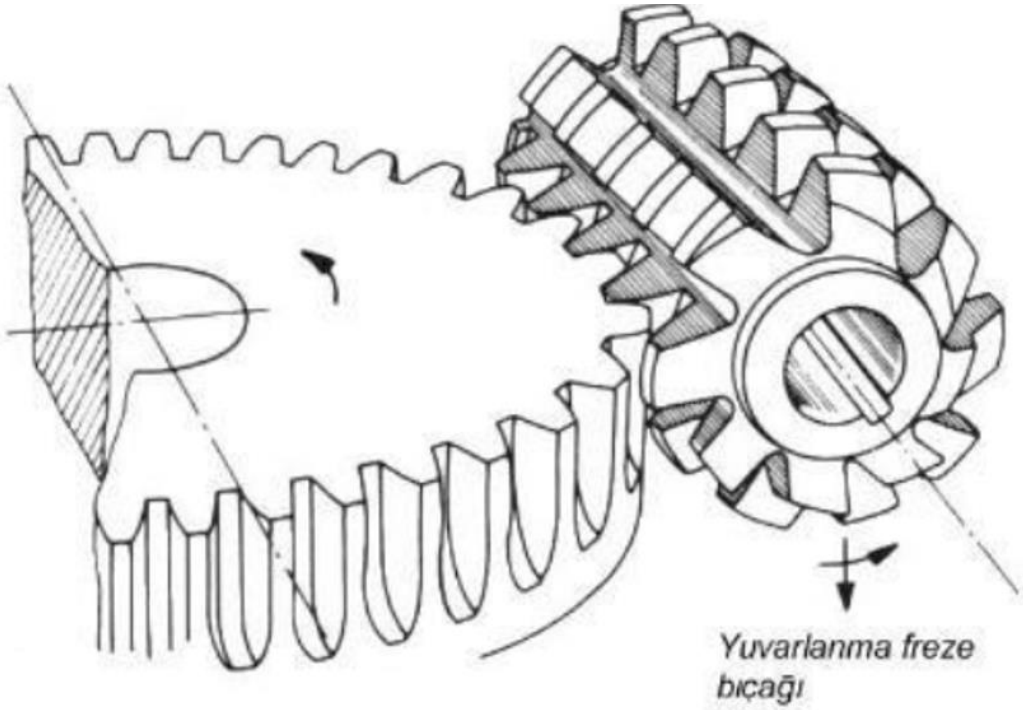
FELLOW siteminde, bıçak yukarı yönde boş biçimde (kesim yapmadan) çıkarken, hem kendi hem de açılan çark dönüş yapar ve sonra kesici bıçak yine kesme işlemini yaparak aşağı yönde hareket eder. FELLOW tezgâhının kesici bıçağı, her zaman farklı dişleri keserek açar. Bu durumdan kaynaklı olarak, kesici bıçakları, kremayer biçimindeki bıçaklara nazaran daha dayanıklılardır, fakat fiyatları da aynı oranda yüksektir.



Şekil 2.21. FELLOW Sistemi kesici bıçakları [9]

2.3.9.3. Azdırma Metodu

Azdırma çakıları kullanılarak dişli açma metodu, dişli imalat metotları içerisinde en çok tercih gören metottur. Yuvarlanma metodu kullanılarak diş açan hem MAAG hem de FELLOW tezgâhları planya hareketi yapar. Bu tezgâhlar; aşağı yönde bir kesme hareketi yaptıktan sonra yukarı yönde kesme yapmaksızın (boş) hareket ederler. Kesme operasyonunun ileri-geri hareketini sürekli kesme haline çevirmek için bıçak, sonsuz vida biçiminde tasarlanarak, azdırma freze çakısı meydana getirilmiştir.



Şekil 2.22. Azdırma Metodu ile diş açma çalışma prensibi [9]

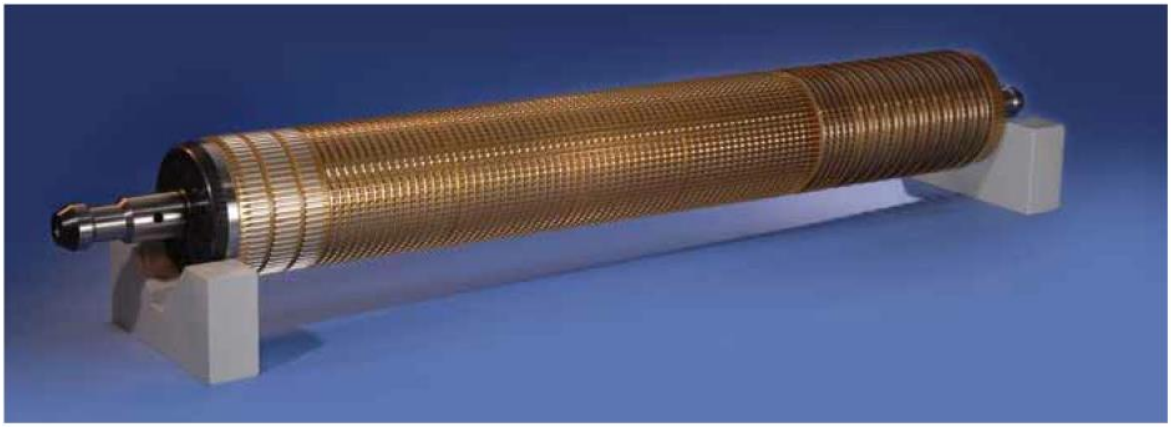
Şekil 2.22'de ki gibi, sonsuz vida biçimindeki helisel freze çakısı, hem dönmekte hem de aynı anda yavaş biçimde aşağı yönde ilerleyerek dişleri açmaktadır.

Diş açılan çarkta, helisel freze çakısının dönüşüne uygun biçimde, helisel freze çakısı ile birlikte döner. Diğer tezgâh çeşitlerinde de olduğu şekilde, ilk olarak kaba talaş alınır, ardından ikinci kez daha keskin freze çakısı ile de ince talaşlar alınır. Böylelikle yüksek hassasiyette ve kaliteli dişliler üretilmiş olur.

2.3.10. Broşlama Metodu İle Dişli Üretimi

Broş, üniversal olmayan, sadece işlenecek parçaya göre tasarlanan, malzemelerin dış yüzeylerini veya önceden açılmış bir deliğin iç yüzeyini, şekillendirmek için, buralardan talaş kaldıran, üzerinde aynı seviyede veya kademe kademe artış gösteren birçok kesici ağız, diş veya kenar bulunan bir kesici takımdır.

Broşlama, broş ismi verilen kesici aletlerle genellikle doğrusal kesme hareketi uygulayarak iş parçasının içinden veya dışından talaş kaldırma işlemine denir. Broş tığları genellikle doğrusal hareket ettirilerek kullanılır. Ancak helis broşlarda ilerleme ile birlikte helis adımına uygun bir dönme hareketi de bulunmalıdır. Broşlar yani kesici takım broş tezgâhına bağlanır. Broşlar iş parçasının içerisine daldırılıp itilerek veya çekilerek kesme işlemi yaparlar. Broşlama ile çok iyi yüzey kalitesine sahip ve boyutsal kesinlikte parçalar üretilebilir. Broşlar çok ağızlı ve çubuk şeklinde olan kesici aletlerdir.



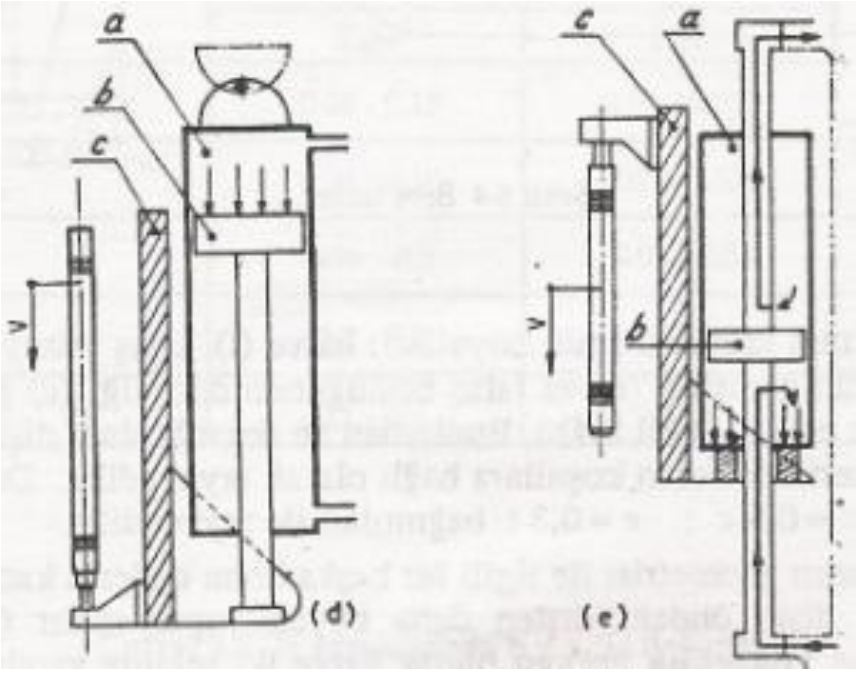
Şekil 2.23. Broş tığı [1]

Tek bir parça için broş maliyeti yüksektir fakat çok miktarda üretim için ekonomiktir. Broşlama diğer metal işleme yöntemlerine göre daha hassas ve hızlıdır. Broşlama ile talaş kaldırma birçok alan ve sektörde kullanılmaktadır. Broşlama uygulama alanları: kama yuvalarının açılması, otomotiv sektörü, freze ile yapılması gereken bazı işler, el takımları imalatın, uçak endüstrisi, dişliler ve akslar olarak örneklenebilir.

2.3.10.1. Broşlama Tekniği

Broşlama tekniği; kesici takım veya iş parçasını doğrusal olarak hareket ettirilerek, değişik kesitli ve çok sayıda kesici dişli bulunan bir takımla talaş kaldırma tekniğidir. Broş (tığ) denen kesici takım, çekme veya itme hareketleri yaparak iç, dış, düzlem veya değişik yüzeylere uygulanır. Bu teknikte iş parçasını veya kesici takımı hareket ettiren, iki farklı tezgâh bulunmaktadır. Çeşitli makine parçalarında bulunan deliklere, düzlem yüzeylere, iç ve dış yüzeylere broşlama tekniği ile değişik formlar vermek mümkündür. Pratik ve ekonomik bir üretim tekniği olduğu için, kullanma alanı çok geniştir. Broşlama tekniği; seri üretimde hassas ve düzgün yüzey kalitesi istenen parçaların, şekil ve ölçü tamlığı istenen profillerin ve özdeş parçaların üretiminde kullanılan çok verimli bir tekniktir.

Broşlama tekniği uygulanacak olan parçaların, broşlama işlemine uygun olması gerekir. Parçaların broşlanacak yüzeylerinde, kesici takımın yolu üzerinde çıkıntı olmamalıdır. İç yüzey broşlama için mutlaka başlama deliği olmalıdır. Konik yüzeylerin işlenmesi genellikle mümkün değildir. İşlenecek parçaların yüksek itme ve çekme kuvvetlerine dayanacak kadar sağlam olması ve yeteri kadar desteklenmeleri gerekmektedir [10].



Şekil 2.24. Yatay broş tezgâhlarda piston silindir sistemi [10]

Broşlama tekniğinde; iş parçasının işlenme özelliğine göre bazı parçalar bağlanmadan tezgâh tablasına konarak, bazı parçalar bağlama aparatıyla bağlanarak, bazı parçalar ise konumlama parçalarıyla konumlandırılarak işlenir. Üzerinde çok sayıda kesici diş bulunan kesici takım, itilerek veya çekilerek işlem yapmaktadır. Broşlama takımının maliyeti yüksek olduğu için broşlama tekniği, miktarı çok fazla olan parçaların üretiminde, maliyette ucuzluk, hızlı ve kaliteli üretim imkanları sağlamaktadır. Özellikle karışık şekilli parçalarda broş maliyeti yüksek olduğu için, işlenecek parça sayısının çok fazla olması gerekir. Broşlama tekniği, daha çok düzgün yüzey kalitesi ve şekil tamlığı istenen parçalara uygulanır. Ayrıca bu teknik, üretim kalitesinin sürekli olarak elde edildiği ve parça üretimi aşamasında, özel olarak eğitilmiş eleman gerektirmeyen bir tekniktir.

Şekil 2.25. Dikey broş tezgâhlarında dişli açma operasyonu [11]

Broşlama tekniğinde yüksek üretkenlik, ölçü tamlığı, düzgün yüzey kalitesi, düşük üretim maliyeti ve çok değişik işler yapabilme üstünlüğü bulunmaktadır. Broş ölçülerinin hassas olması nedeniyle, dar tolerans değerlerinde ölçü tamlığı elde edilir. Doğru tezgâh ve uygun broş seçildiği zaman, daha fazla talaş kaldırılır. Kaba ve ince işleme aynı anda yapıldığı için, üretim miktarı fazladır. Standart broş kullanılması hariç, özel broş takımlarının maliyeti yüksek olduğu halde kesici takımın ömrü uzun olduğu için, parça başına düşen üretim maliyeti düşüktür. Bağlanma sorunu olmayan küçük parçalar, döküm, dövme, kaynaklı parçalar ve değişik gereçleri işlemek mümkündür.

Broş tekniğinde broş tığları iç veya dış olarak tasnif edilebilir. İç broşlar, işlenecek parçada açılmış bir delik içinde, dış broşlar ise parçanın dışında istenilen profili gerçekleştirmek amacıyla kullanılır.

İç Broşlama; parça deliğinin iç yüzeyinde gerçekleştirilir ve delikleri büyütmek ve kama kanalı açmak amacıyla kullanılır. Broşlar parçanın iç yüzeyinde çekilir veya itilir. Dış Broşlama; parçanın dış yüzeyinden talaş kaldırma işlemidir. Bu işlemde ya parça takım üzerinden geçirilir ya da takım parça üzerinden geçirilir.

Broşlama tekniği ile çeşitli kanallar, kama kanalları, düz veya karışık şekilli yüzeyler, kremayer dişliler, iç dişliler üretilmektedir. Broşlama tekniği otomotiv endüstrisinde, uçak ve uzay endüstrisinde, el takımları üretiminde, frezeleme tekniği ile yapılan parçalarda, beyaz eşya sanayiinde, savunma sanayiinde (silah parçaları üretiminde), kilit üretimi ve elektrik motoru üretiminde kullanılmaktadır. Ayrıca savunma sanayii içinde yer alan silah sanayiinde namlu yivleri bu teknikle işlenmektedir [10].

2.3.10.2. Broş Tezgâhları

Broş tezgâhlarının yapısı genellikle basittir. Çünkü broş sabit bir hızda doğrusal bir şekilde hareket ettirilir. Broş tezgâhları kesici takıma kesme hızı, ilerleme, itme-çekme hareketi veya iş parçasına hareket vermeleri bakımından, diğer tezgâhlardan farklılıklar göstertir. Broş tezgâhlar; broş takımının (kesici uç, tığ) veya iş parçasının doğrusal olarak kesme hareketini ve griye dönüş hareketini sağlar. Broş tezgâhlarında kesici takım veya iş parçasının hareketi hassas olmalıdır. Helis kanal veya vida broşlama yapılacağı zaman, broş doğrusal olarak

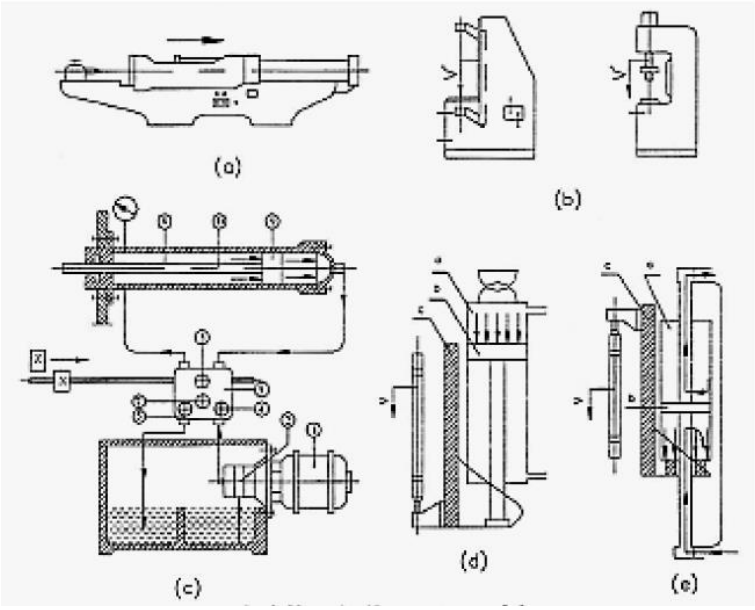
ilerleme yaparken, iş parçasının da helis açısına uygun olarak döndürülmesi gerekir. Broşlama tekniğinin iç broşlama, dış broşlama ikiye ayrıldığından bir önceki bölümde bahsetmiştik. İç ve dış broşlamada; broşların sıkıca tutulup itilmesi, çekilmesi veya parçanın hareket ettirilmesi gerekir. Broşlama tekniğinde broşun veya parçanın hareketli olduğu iki işleme yöntemi de kullanılmaktadır. İç yüzeylerde broş çekileceği zaman, parça üzerinde başlama deliğinin olması gerekir. Çevresel broşlama yapılacağı zaman, parçalı broşlar kullanılır [10].

Şekil 2.26. Broş takım tezgâhı [2]

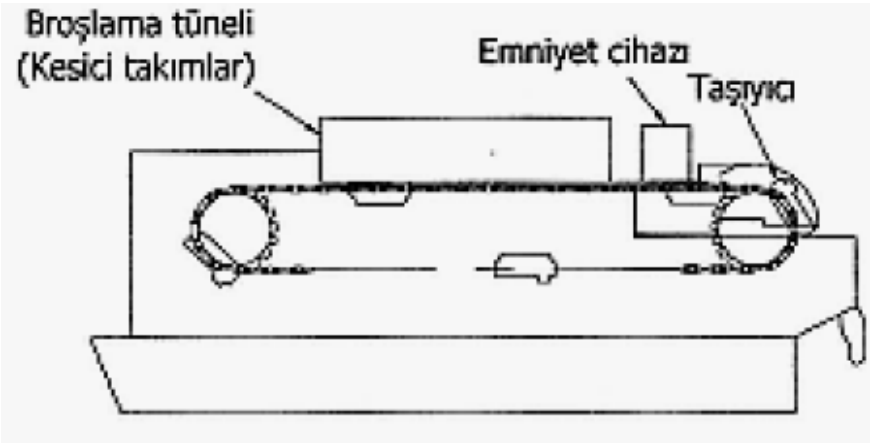
Broşlama tezgâhlarının çalışma ve kumanda sistemleri genellikle hidroliktir. Tezgâhlar yarı otomatik veya tam otomatik olarak çalışırlar. Kesme hızları 1 – 60 m/dk arasında değişmektedir. Geriye dönüş hızları, ileriye gidiş hızlarının iki katını bulmaktadır. Boyu uzun olan parçaların broşlama işlemi yatay olan tezgâhlarda yapılır. Çekme broşları, genellikle yatay broş tezgâhlarında kullanılır. Yatay broşlama tezgâhları çok fazla yer kaplarken, düşey broş tezgâhları daha az yer işgal etmektedir. İtme, dış yüzey işleme ve form verme broşları, düşey broş tezgâhlarında kullanılır. İşlenecek olan parçanın şekline, özelliklerine ve broşun çeşidine göre yatay veya düşey çalışan broş tezgâhlarından, uygun olanı tercih edilmektedir.

Broş tezgâhları çalışma özellikleri bakımından, genel olarak dört grupta toplanır. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

a) Zincir broş tezgâhları (Şekil 2.28),
b) Döner başlıklı broş tezgâhları,
c) Yatay broş tezgâhları (Şekil 2.27 a),
d) Düşey broş tezgâhları (Şekil 2.27 b,d,e);
   i. Aşağı-yukarı çekmeli broş tezgâhları,
   ii. Aşağı-yukarı itmeli broş tezgâhları.



Şekil 2.27. Çalışma özellikleri bakımından broş tezgâh çeşitleri



Şekil 2.28. Zincir broş tezgâhı

Yatay broş tezgâhlarında, hareket tabana paralel, düşey broş tezgâhlarında tabana dik durumdadır. Broş tezgâhları tek veya çift başlı olabilir. Broşa uygulanan kuvvetin çekme veya itme kuvveti olması bakımından, tezgâhlar bu bağlamda da çekme tipi ve itme tipi tezgâhlar olarak ikiye ayrılır [10].

Şekil 2.29. Yatay broşlama tezgâhı

2.3.10.3. Broşlanan Malzemeler

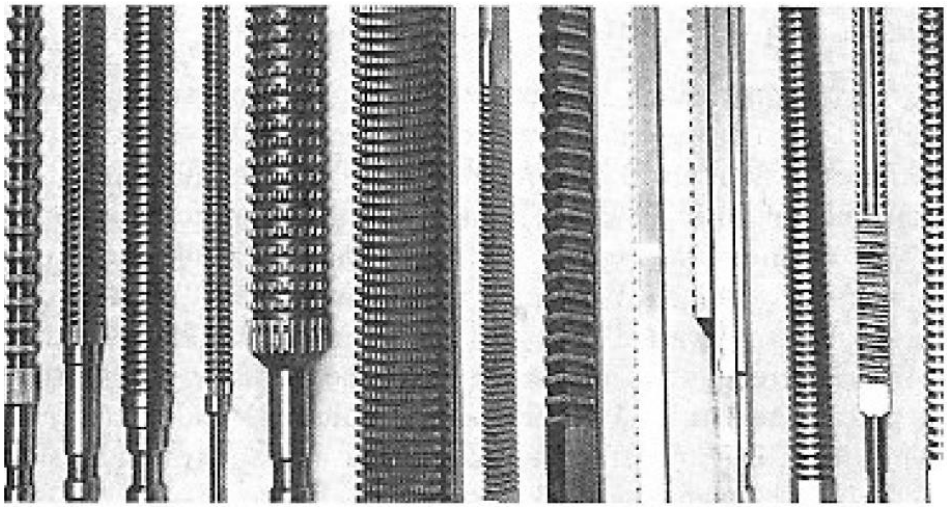
Talaşlı üretim teknikleri ile işlenebilen her malzeme, broşlama tekniği ile de işlenebilir. Sertliği 18-32 HRC arasında olan çelik malzemeler, bu teknikle işlenebilir. Dökme demir, pirinç, bronz, alüminyum ve magnezyum yüksek kesme hızları ile işlenebilir. Broş tezgâhlarında kesme hızları, işlenecek malzemenin çeşidine ve işlemin özelliğine göre değişmektedir. Yumuşak ve sert çelikler için kesme hızı 3-30 m/dk., dövme demir, bronz, pirinç ve yumuşak malzemeler için kesme hızları 6-60 m/dk. arasında değişebilmektedir. Tablo 2.1' de sertliklerine göre çeşitli çelik malzemeler verilmektedir. Geri dönüş hızı, boşa geçen zamanı azaltmak için 2 kat veya daha fazla artırılır. Dökme demir gibi kırılgan malzemeler işlenirken, küçük parçalar halinde talaş çıkar. Yumuşak çelik işlenirken talaşlar kıvrılarak, broşun diş boşluğunda birikir. Çok yumuşak malzemeler işlenirken, talaşlar broşun dişlerine yapışarak sıvanmaya neden olurlar [10].

Tablo 2.1. Broş malzemeler ve kesme hızları [10]

Broşlanan Malzeme		Serilik	Kesme Hızı	İlerleme Hızı	Takım Malzemesi	
		HBR	m/dk.	mm/diş	ISO	AISI
Otomat Çelikler	Düşük Karbonlu	100-150	11	0,10	S4-S2	M2-M7
		150-200	9	0,08	S4-S2	M2-M7
	Orta Karbonlu	175-225	7,5	0,075	S4-S2	M2-M7
		325-375	5	0,05	S9-S11	T15-T42
	Düşük Karbonlu	100-150	12	0,15	S4-S2	M2-M7
		200-250	11	0,075	S4-S2	M2-M7
Karbonlu Çelikler	Düşük Karbonlu	85-125	9	0,10	S4-S3	M2-M8
		225-275	5	0,075	S4-S4	M2-M9
	Orta Karbonlu	125-275	7,5	0,075	S4-S5	M2-M7
		325-375	3	0,05	S9-S11	T15-T42
Alaşımlı Çelikler	Düşük Karbonlu	125-175	7,5	0,075	S4-S2	M2-M7
		325-375	3	0,05	S9-S11	T15-T42
	Orta Karbonlu	175-225	6	0,10	S4-S2	M2-M7
		325-375	3	0,05	S9-S11	T15-T42
	Yüksek Karbonlu	175-225	6	0,10	S4-S2	M2-M7
		325-375	3	0,05	S9-S11	T15-T42
Paslanmaz Çelikler	Ferritik Ostenitik	135-185	6	0,075	S4-S2	M2-M7
		225-275	5	0,075	S9-S11	T15-T42
	Martenzitik	135-175	7,5	0,10	S4-S2	M2-M7
		275-325	5	0,05	S9-S11	T15-T42

2.3.10.4. Broşlar (Tığlar)

Broşlama işleminde kullanılan kesici takımlara broş denir. Broşlarda; her diş kendinden önceki dişten belirli bir oranda büyüktür ve önündeki talaşı keserek işlem yapmaktadır. Broşlarda arka arkaya gelen kesici dişlerin kademeli yapılmasının nedeni, her dişin bir miktar talaş kaldırmasın sağlanmasıdır. Broşlamada; bir dişin aldığı talaş, broşun ilerleme miktarı kadardır. Bu talaş yükü, tezgâhın operatörü tarafından değiştirilemez. Bunun sonucu olarak, broşların kullanım ömrü diğer kesici takımlara göre daha fazla olmaktadır.



Şekil 2.30. Çeşitli broşlar

Şekil 2.31. San –Tez projesi kapsamında üretilen broşlar (broş tığlar) [11]

2.3.10.5. Broş Malzemeler

Broşlar genellikle HSS (yüksek hız çeliği) gereçten veya sert metal takma uçlu olarak üretilirler. Yüksek kesme hızı gerektiği ve broşun çapı 150 mm'yi geçtiği zaman, toz metal (TM) HSS broşların kullanılması artmaktadır. Gri dökme demirin işlenmesi için tungsten karbür broşlar kullanılır. HSS ve HM (sert metal) broşlara yüzey kaplama işlemi yapılması kesici takımın ömrünü artırmaktadır [10].

Tablo 2.2. Broş malzemeleri [10]

Broş Malzemesi HSS	İşlenen Malzeme
AISI M2, W. Nr. 1.3343	Sertliği 34 HRC düşük, orta karbonlu çelikler, 32 HRC alaşımlı çelikler, alüminyum, pirinç, magnezyum, bronz, plastik, kurşun ve bakır
AISI M3-1	Sertliği 35-42 HRC orta karbonlu çelik 33-38 HRC alaşımlı çelik, bronz ve alaşımlı dökme demir
AISI M2-3, W. Nr. 1.3344	Dökme demi, alüminyum, döküm, paslanmaz çelik, grafit ve yumuşak çelik
AISI M4	Yüksek silisyumlu çelik, silisyum bronzu, alüminyum döküm ve dökme demir
AISI M42 W. Nr. 1.3247	Sertliği 35-42 HRC orta karbonlu çelik, sıcak dövme çelik, paslanmaz çelik, çelik döküm, bronz ve takım çelikleri
AISI T15, W. Nr. 1.1302	Paslanmaz çelik, titanyum, bronz, silisyumlu demir ve silisyumlu bronz
Toz Metal HSS	Yüksek kesme hızı ile çalışmak ve daha uzun takım ömrü elde etmek için M2, M3, T15 ve HSS' lerin yerine kullanılır.
Tungsten Karbür	Gri dökme demir ve yüksek kesme hızı ile çalışmak için kullanılır.

Broşların ölçü ve toleransları değişmeden 8 – 10 kez bilenmeleri mümkündür. Bu durumda bir broş ile yüz binlerce parça üretilmesi mümkün olmaktadır. Kesici takım ömrü, kesme hızı düşük ve her dişe gelen talaş miktarı çok az olduğundan yüksektir.

2.3.10.6. Broşların Tasarımı

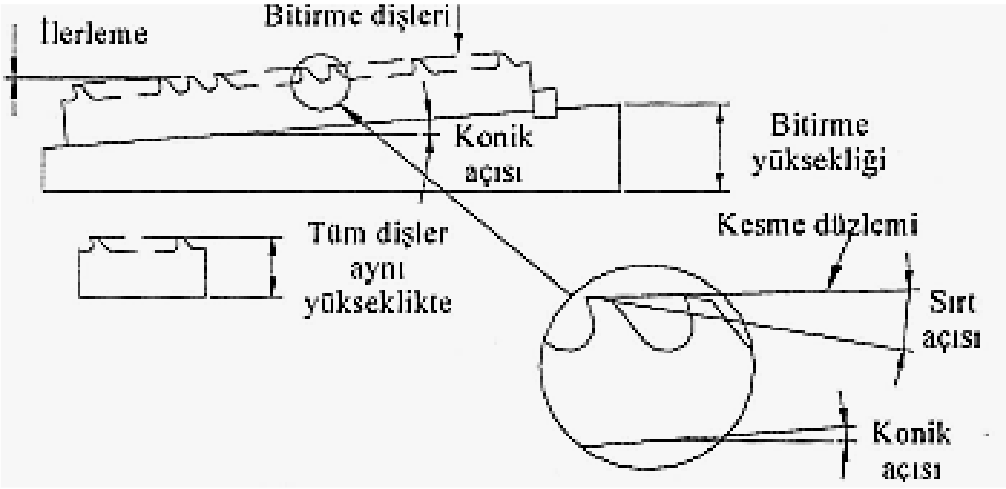
Kaldırılacak talaşın miktarına göre broşun dişlileri kaba, ince ve bitirme dişleri olarak düzenlenir. Bitirme dişleri, son ölçüyü veren birkaç dişten oluşur. Genellikle dış broş takımı ön bağlama sapı, ön kılavuz bölümü, kaba talaş dişlileri, ince talaş dişleri, temizleme ve bitirme dişleri, son kılavuz bölümü ve son bağlama sapından meydana gelmektedir. Broşlama işleminin iç veya dış broşlama olması, işlenecek parçanın şekli ve broşun kullanılacağı tezgâhın özellikleri, broşun şeklini belirlemede etkili olmaktadır. Şekil 2.32' de dış broş takımının hangi bölümlerden meydana geldiği ve dişlerin düzeni görülmektedir.

Şekil 2.32. Broş tığı tasarımları

Broşların tasarımında dikkat edilecek hususlar aşağıda bildirtilmektedir;

1. İşlenecek malzemenin cinsi,
2. Broşun meydana getireceği şekil,
3. Broşun çalışma şartları,
4. Broşun çekme veya basma dayanımı,
5. Broşa gelen kesme kuvveti,
6. Tezgâhın çekmeli veya itmeli olması,
7. Tezgâhın broşlama stroku,
8. Broşlanacak yüzeyin uzunluğu,
9. İş parçanın ölçüleri,

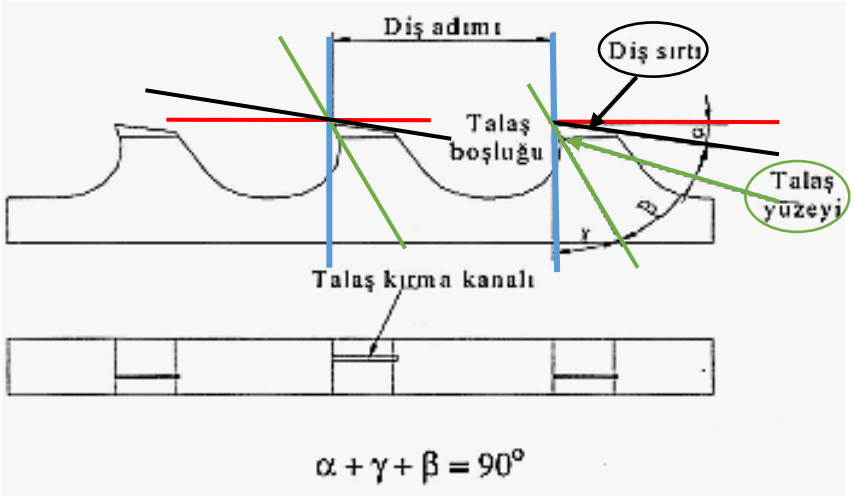
10. Broş parçaların ölçüleri,
11. Yüzey kalitesi,
12. Kaldırılacak talaşın miktarı,
13. İşlenecek malzemenin sertliği,
14. Üretilecek parça miktarı.



Şekil 2.33. Broş dişleri [10]

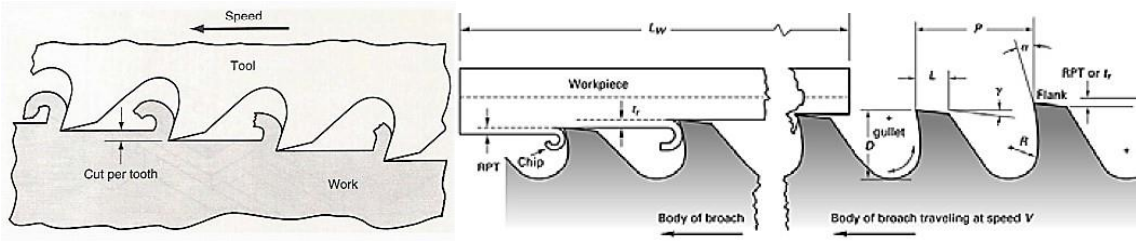
Broşun üzerindeki dişler, uç kısmından son kısmına doğru, düzenli bir şekilde büyümektedir. Birkaç sıra diş aynı yükseklikte yapılarak, aynı yükseklikte diş grupları da oluşturulabilirdir.

Kaba talaş dişlerinin ilerleme miktarı, ince talaş dişlerinin ilerleme miktarlarından daha fazladır. Bitirme dişlerinde ilerleme yoktur ve bitirme ölçüsünde yapılır. Bitirme dişleri en az 3 veya daha fazla dişten oluşur. Son birkaç diş aynı yükseklikte yapılarak, istenen ölçüyü verecek şekilde bitirme görevi yapmaktadır. Ayrıca dişleri kaba, ince ve bitirme talaşı kaldıracak şekilde düzenlenir. Böylece tek geçişte kaba, ince ve bitirme talaşı kaldırılarak işlem tamamlanır. Çok düzgün ve yüksek kaliteli bir yüzey elde edilir [10].



Şekil 2.34. Broş dişinin açıları ve talaş kırıcısı

Birçok kesici takımda olduğu gibi, broşların dişlerinde de boşluk açısı (α) talaş açısı (γ) ve kama açısı (β) bulunur. Bu açıların toplamı 90°'dir. Broş dişinin açıları Şekil 2.34' de gösterilmektedir. Broşun dişlerinde bulunan talaş açısı (γ), islenecek olan malzemeye göre 0° - 20° arasında değişmektedir. Talaş açısının, kesme kuvvetine etkisi büyüktür. Broş dişinin talaş açısı ve iki diş arasındaki talaş boşluğu, işlenecek yüzeyin uzunluğuna, malzemenin verdiği talaşın şekline ve ilerleme miktarına göre değişir. Boşluk açısı (α), hızlı aşınmayı önlemek için, mümkün olduğu kadar küçük olmalıdır. Boşluk açısı genellikle kesme dişlerinde 1° - 3°, bitirme dişlerinde 1,5° - 2° arasında olabileceği gibi, 0° - 0,5° arasında bileme düzlüğü de yapılmaktadır [10].



Şekil 2.35. Broş dişlerin talaş kaldırması

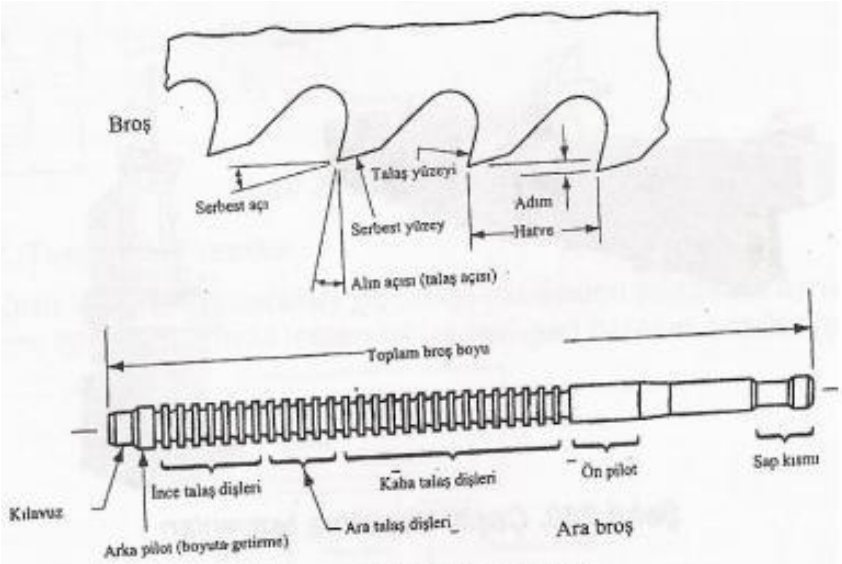
Bitirme dişlerinde boşluk açısının 0° olması, broşun bileme ömrünü artırır. Dişlerin derinliği adıma bağlı olarak değişir ve çıkan talaşları rahatlıkla içinde tutar. Broşun adımı, işlenecek olan parçanın boyuna ve malzemesine göre hesap edilir. Şekil 2.34' de broş dişlerin açıları ve dişlerin sırt kısımlarında bulunan talaş kırıcıları görülmektedir.

Talaş kırıcıları, broşun üzerindeki toplam yükü azaltmak, talaşların toplanmasını önlemek ve akışını kolaylaştırmak için yapılır. Talaş kırıcıları, kaba ve ince dişlere arka arkaya gelmeyecek şekilde veya bir dişe açılıp diğer dişe açılmayacak şekilde yapılır. Bitirme dişlerine talaş kırıcı yapılmaz [10].

Tablo 2.3. Broş dişinin açıları [10]

Malzemenin cinsi	Talaş Açısı (γ) (°)	Boşluk Açısı (α) (°)
Otomat Çelikleri	15-20	2-3
Karbonlu Çelikler	10-20	1-2
Takım Çelikleri	8-12	1-2
Nitrasyon Çelikleri	8-15	1-2
Paslanmaz Çelikler	8-12	1-2
Gri dökme çelikler	6-8	2-3
Alüminyum Alaşımları	10-15	1-3
Magnezyum Alaşımları	10-15	1-3

Broş dişlileri, talaş açısının bulunduğu kanaldan bilenir. Bilenmede broş ölçüsünün değişmemesi gerekir. Broşların bilenme ömrünü artırmak amacıyla, bitirme dişlerinin sırt kısımlarına bileme düzlüğü yapılır. Broş dişlerin tepelerinde bulunan bileme düzlüğünün genişliği broşun bileme ömrünü belirler. İç broşlama takımlarında dişler düz, dış broşlama takımlarında eğim açısı (λ) olabilir. İşlenen yüzeyin kalitesini iyileştirmek ve çapakları azaltmak için, özellikle dış yüzey broşlarına eğim açısı verilir. Dış yüzey broşlarının eğim açısı 3° ile 20° arasında değişmektedir [10].



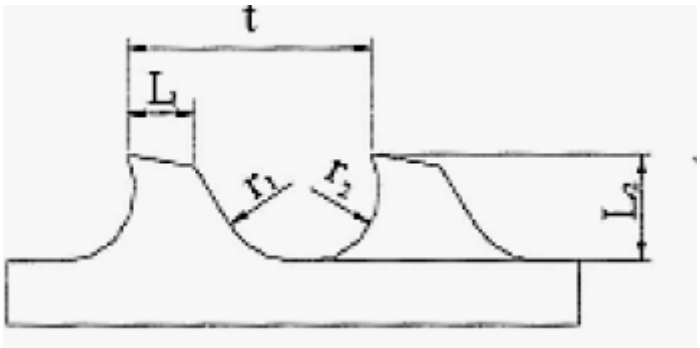
Şekil 2.36. Broş diş açıları ve broş takımı

Şekil 3.37 gösterilen parametreler kullanılarak Eşitlik 2.14 bağıntısında kullanılarak dişin ilerleme adımı hesaplanabilmektedir.

Tablo 2.4 Broş dişinin ölçüleri [10]

Broşlama Boyu L(mm)	Adım 1 (mm)	Diş üstü genişliği (L_1)	Talaş miktarı (mm)	Diş arka yarıçapı r_1 (mm)	Talaş açısı yarıçapı r_2 (mm)
1.3-2.3	1.12	0.30	0.38	1.12	0.15
2.3-3.8	1.57	0.38	0.58	1.57	0.25
3.8-5.1	3.17	1.17	1.17	3.17	0.58
5.1-6.3	3.96	1.17	1.52	3.96	0.76
6.3-8.9	4.76	1.57	1.78	4.78	0.89
…	…	…	…	…	…
146.0-158.7	22.22.	6.35	8.33	22.22	5.69
158.7-184.1	23.80	6.73	8.94	23.80	6.22
184.1-209.6	25.40	7.14	9.52	25.40	6.65
209.6-241.3	26.97	7.14	10.13	26.97	7.11
241.3-279.4	30.18	7.92	11.10	30.18	7.87
279.4-355.6	33.32	8.74	12.70	33.32	9.14

Broş dişlerinin ilerleme büyüklüğü 0,01 – 0,6 mm arasında değişmektedir. Sert malzemelerde ilerleme miktarı düşük olmalıdır.



Şekil 2.37. Broş dişi

$$h = 0.10\frac{(t-L_1)L_2}{L} \tag{2.14}$$

dişin ilerleme adımını veren denklemde;

h: İlerleme (mm)

t: Adım (mm)

L_1: Diş sıratındaki düzlüğün genişliği (mm)

L_2: Diş derinliği (mm)

L: Broşlama boyu (mm)

olarak ifade etmektedir.

Tablo 2.5. Dış broş takımının ilerleme (h) değerleri [10]

Parça malzemesi	Yükseklik olarak ilerleme, h (mm/diş)		Yana ilerleme, h (mm/dişi)
	Kaba	İnce	
Yumuşak çelikler	0.06-0.15	0.01-0.025	0.08-0.25
Islah çelikleri Takım çelikleri	0.04-0.1	0.01-0.025	0.08-0.25
GG	0.08-0.2	0.02-0.04	0.2-06
Alüminyum alaşımları	0.1-0.2	0.02	
Pirinç, bronz	0.1-0.3	0.02	

Tablo 2.6. İç broş takımının ilerleme (h) değerleri [10]

Parça malzemesi	Diş başına ilerleme, h (mm/diş)				Profil broş takımı
	Yüzey broş takımı		Yuvarlak broş takımı		
	Kaba	İnce	Kaba	İnce	
Çelik, Dökme çelik	0.04-0.1	0.01-0.025	0.01-0.03	0.0025-0.005	0.002-0.08
GG ve demir dışı metaller	0.05-0.015	0.02-0.04	0.02-0.4	0.01-0.02	0.04-0.1

Broşlama işlemi yapılırken, broşun en az 2 – 6 dişinin aynı anda iş parçasından talaş alması gerekir. Aynı anda kesme yapan diş sayısının fazla olması, broşlama işleminin daha verimli olmasını sağlamaktadır. İnce parçalar işlenirken sorun yaşanmaması için, birkaç parça bir araya getirilerek işlenmelidir.

Broş adımı işlenecek malzemeye, broşlama boyuna ve kaldırılacak talaşın cinsine göre hesaplanır. Malzemenin cinsine ve broşlama boyuna göre broşun adımını bulmak için aşağıdaki formüller kullanılır.

Yumuşak malzemeler için adım;

$$t = 1.5x\sqrt{L} \tag{2.15}$$

Sert malzemeler için adım;

$$t = 2x\sqrt{L} \tag{2.16}$$

Boyu kısa broş için adım;

$$t = 1.7x\sqrt{L} \tag{2.17}$$

Eşitliklerde;

t: Adım (mm)

L: İşlenen yüzeyin uzunluğu (mm)

olarak ifade eder.

Talaşın cinsine göre broş adımını bulmak için aşağıdaki formül kullanılır;

Kaba talaş için adım;

$$t = 1.7x\sqrt{L} \tag{2.18}$$

İnce talaş için adım;

$$t = 1.3x\sqrt{L} \tag{2.19}$$

2.3.10.7. Broş Tasarımında Kullanılan Teknik Hesaplamalar

Broşlama işleminde önemli kavramlardan biri broş çekme zamanıdır. Broş çekme zamanı aşağıdaki şekilde hesaplana bilir;

$$S_t = \frac{L_t(V+V_r)}{VxV_r} \tag{2.20}$$

Eşitlikte;

L_t: Broşun toplam birim zamanda aldığı yol (m)

S_1: Broşun kesme zamanı (dk.)

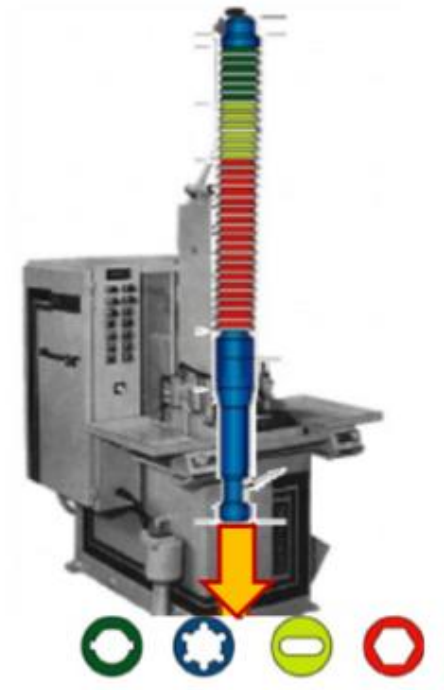
S_2: Broşun geri dönme zamanı (dk.)

S_t: Toplam zaman (dk.)

V: Kesme hızı (m/dk.)

V_r: Geri dönüş hızı (m/dk.)

olarak ifade eder.



Şekil 2.38. Broşlama operasyonu

Broşlarda diğer hassas bir konu ise talaşın ölçüleridir. Broşlamadan çıkan talaşın kalınlığı veya broşun ilerlemesi (h), talaşın genişliği broşun dişlerinde eğim açısı yoksa (a), eğim açısı varsa (b) olarak alınmaktadır.

Broşun dişinde eğim açısı yoksa;

$$\mathrm{As} = \mathrm{b\ x\ a} \tag{2.21}$$

Yukarıdaki eşitlikte;

As: Broşlamadan çıkan talaşın kesit alanı (mm^2)

olarak ifade edilir.

Broşun dişinin eğim açısı varsa eğim açısı b aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\mathrm{b} = \frac{\mathrm{a}}{\cos\lambda} \tag{2.22}$$

Böylece kesit alanı;

$$As = b \text{ x } \frac{a}{\cos \lambda} \tag{2.23}$$

olarak ifade edilir.

Şekil 2.39. Broş (tığ), broş tezgâhı ve broşlama

Broşlama işleminde istenen sonucun elde edilmesi için kesme hızı, işlenen malzeme, broşun geometrisi, elde edilecek yüzeyin kalitesi, broş tezgâhı, üretimin hızı ve takımın ömrü önemlidir. Kesme hızını etkileyen nedenlerin çok olması, ideal kesme hızını seçmede zorluklara neden olmaktadır. Kesme hızını etkileyen en önemli faktör kesme kuvvetidir. Broş takımlarda kesme kuvvetini aşağıdaki gibi hesaplayabiliriz;

$$Z_e = \frac{L}{t} \tag{2.24}$$

Yukarıdaki formülde;

Z_e: Aynı anda kesme yapan diş sayısı, L: Broşlanan boy (mm), t: Broş adımı (mm), olarak ifade edilir.

Bu bağlamda, eğer yüzey broşlama için broşun dişinde eğim açısı yoksa kesme kuvveti;

$$F_s = h \text{ x } a \text{ x } Ks \text{ x } Ze \qquad (2.25)$$

Broşun dişinde eğim varsa kesme kuvveti;

$$F_s = h \text{ x } \frac{a}{\cos\lambda} \text{ x } Ks \text{ x } Ze \qquad (2.26)$$

Eşitliklerdeki;

F_s: Kesme kuvveti (N),

a, b: Talaş boyu (mm)

h: ilerleme (mm)

K_s:Özgül kesme kuvveti (N/mm^2)

olarak ifade edilir.

2.3.10.8. Broşlamada Dikkat Edilecek Konular

Broşlamada dikkat edilecek hususlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Broşla işlenecek parçanın boyu, broşun boyuna uygun olmalıdır. İnce parçalar broşun kırılmasına neden olduğundan, birkaç tanesi bir araya getirilerek birlikte işlenir.
- Broşlar tezgâhlara broş mandreni gibi özel tutucularla bağlanır.
- Boyu 1000 mm' den uzun olan ve yatay tezgâhta çalışan broşların, boşta kalan uçları hareketli yatakla beslenir.
- Helisel broşlama yapılırken, broş rulmanlı döner yatakla desteklenir.

2.3.10.9. Broşlamada Kesme Sıvıları

Kesme sıvısının yaptığı görevler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Kesici takımla çıkan talaşlar arasında, yağlama görevi yapmak,
- Sıcaklığı ve aşınmayı azaltarak, talaşların takıma sarmasını önlemek,
- Çıkan ısıyı ortamdan uzaklaştırıp, düzgün yüzey kalitesi elde etmek,
- Dişin boşluğunda biriken talaşları uzaklaştırıp, broşun zarar görmesini önleyerek, broşun ömrünü uzatmak.

Tablo 2.7. Broşlamada kesme sıvıları [10]

Malzemenin cinsi	Soğutma sıvısı
Dökme demir	Bor yağı - kuru
Pirinç, bronz	Bor yağı
Alüminyum	Bor yağı
Çelik	Kesme yağı

Şekil 2.40. Kesme sıvısının broşlama operasyonuna uygulanması

2.3.10.10. Broşların Çeşitleri

Broşlar, işlenecek olan parçanın şekline göre yapılmaktadır. Her dişin kaldıracağı talaşın miktarı, broşun adımı, dişlerin şekli, broşun malzemesi ve ısıl işlemi çok önemlidir. Broşta bir dişin kaldırdığı talaşın miktarı az olduğu için broşların boyları uzun olmaktadır.

Kullanıldıkları yerler bakımından iç broşlar, dış broşlar ve form verme broşları, kullanma şekilleri bakımından çekme, itme, helisel ve döner broşlar, yapılışları bakımından tek veya parçalı, sert metal takma uçlu olabilirler.

İç yüzey broşları, çeşitli parçaların iç yüzeylerine broş çekmek veya itmek için kullanılan broşlardır. Kuvvetin uygulama özelliğine göre çekme ve itme broşları olarak ikiye ayrılırlar. Çekme broşları, işlenecek boyu uzun ve talaş miktarı fazla olan parçalarda kullanılır. İtme broşları sağlam ve kısa boylu olan broşlardır. Talaş miktarı az olduğu zaman kullanılır. İtme broşlarını hidrolik pres tezgâhlarda kullanmak da mümkündür.

Dış yüzey işleyen broşlar, iç yüzey işleyen broşlardan daha uzun ömürlü, yapımı daha kolay ve maliyeti ucuzdur. Dış yüzey işleyen broşlar, destekle birlikte kullanıldığı zaman, titreşimsiz olarak çalışırlar.

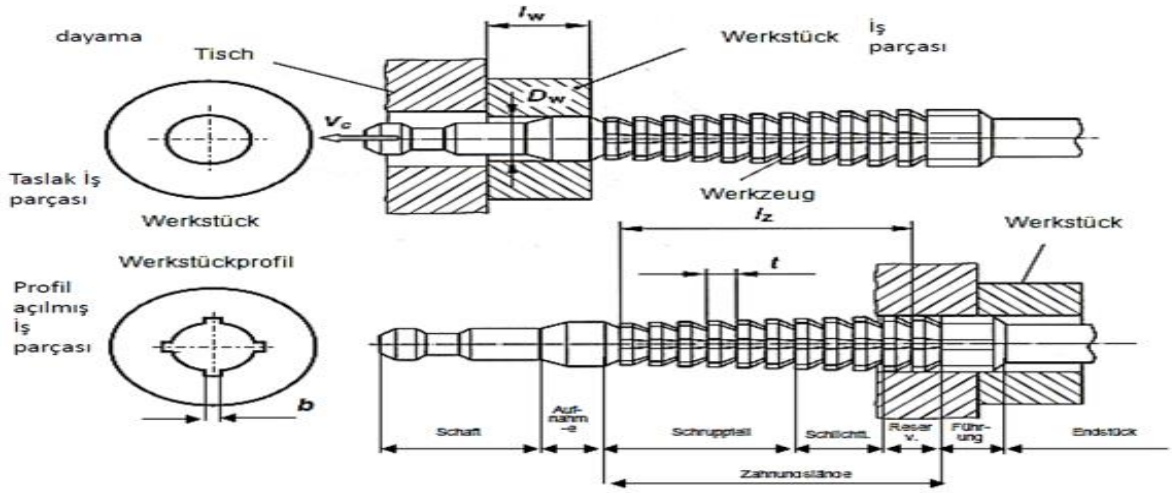
Şekil 2.41. Dış yüzey ve iç yüzey broşları [11]

Broşlar, körlendiği zaman mutlaka bilenmelidir. Körlenen broşlarla parça işlemede, harcanan güç sarfiyatı çok fazla olmakta, ayrıca işlenen yüzeylerin kalitesi de bozuk çıkmaktadır. Bileme işlemi, dişlerin öz yüzlerinden yapılmaktadır. Bileme sağlam ve titreşimsiz bir tezgâhta yapılmaktadır. İç yüzey broşlarının bilenmesi yapılırken ölçünün bozulmaması daha da önemlidir.

2.3.10.11. Broşlama Ve Broşlama Tekniğinin Avantajları Ve Dezavantajları

Endüstrinin pek çok alanında rakipsiz olarak kullanılmakta olan, diğer yöntemlere oranla zaman, personel ihtiyacı, hammadde kullanımı alanlarında yüksek verimlilik sağlayan broşlamanın avantajlarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz;

- Yüksek yüzey kalitesi sağlar,
- İşlem zamanını kısaltır,
- İkinci bir operasyona gerek kalmaz,
- Ölçü tamlığı sağlar,
- Karmaşık profillerin yapılabilmesini sağlar,
- Kolay ve ucuz işçilik sağlar.



Şekil 2.42. Deliğe broşlama ile dört taraflı kama kanalı açma

Talaşlı imalatın rakipsiz yöntemlerinden olan broş ile şekillendirme, broşlama tekniği, yüksek imalat hızı ve ucuz maliyetin yanında ölçü hassasiyetinin de sürekli aynı değerlerde kalmasını sağlar.

Broş tekniğinin üstünlüklerini aşağıdaki gibi sıralayabiliriz;

- Düzgün ve karışık şekilli parçalar işlenebilir,
- İşlem tek postada bitirilir,
- Kaba ve bitirme işlemi aynı anda yapılır,
- Çeşitli iç ve dış yüzeyler aynı anda işlenebilir,
- İşlenen parçalar özdeş olur,
- İşlenen yüzeyin kalitesi yüksektir,
- İşlem süresi kısalır,
- Kesme hızlı yüksektir.

Gelişmiş ülkeler çember dişli üretiminde tamamen bu teknolojiye geçmiş olmalarına rağmen, broş tığlarının astronomik ölçüde fiyatları ve bir yılı aşkın imalat süreleri ülkemizdeki imalatçıların bu teknolojiye geçmelerini engellemiştir. Bununla birlikte broşlama tekniğinde görülen olumsuzlukları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz;

- Büyük ve karışık şekilli parçalarda broşun maliyeti yüksektir,
- Çok küçük parçaların işlenmesi mümkün değildir,
- İşlenecek parçaların operasyon noktasına sağlam olarak bağlanması gerekir,
- Çok fazla talaş kaldıramaz.

Ülkemizin büyük oranda ihtiyaç duyduğu çember dişliler, yerli üretimle karşılanamayıp ithalat yoluyla yurtdışından temin edilmektedir. Bu tez beraberinde yürütülen San-Tez projesi ile çember dişlilerin seri üretimi için olmazsa olmaz konumunda olan broşlama tezgâhının ve broş tığlarının üretiminin ülkemizde gerçekleştirilmesi ve bu teknolojinin ülkemizde yaygınlaştırılması hedeflenmiştir.

3. TALAŞLI İMALATTA TALAŞ KALDIRMA MEKANİĞİ

3.1. Talaşlı İmalatın Tarihçesi

Talaşlı imalatlar, Sanayi Devrimi ile birlikte 18.yy. ve 19. yüzyıllarda gelişmeye başlayarak, 20.yy. da gelişme sürecini büyük bir ivme ile devam ettirmiştir. 18.yy. da en çok kullanılan iş parçası ağaçtı. Bu yüzyılda, metal parçaların işlenmesi ve işleme operasyonlarında kullanılacak tezgâhlar sınırlı olup, neredeyse 19.Yüzyıla kadar metal parçaların işlenme operasyonları yalnızca demirci ustaları tarafından, kol gücü ile yapılmaktaydı. Daha sonraları ise, buhar makinesinin icadı ve elektrik enerjisi ile üretilen gücün kullanılması, kol gücünün yerini daha çok makinelerinin almasını sağlamıştır. Ortaya çıkan yeni güç seçenekleri ile birlikte, takım tezgâhları icatları meydana gelmiş ve de bu konuda önemli gelişmeler yaşanmıştır. Güç ve hareketin iletilmesi işinde, kasnak-kayış mekanizmaları ve miller kullanılmaya başlanmıştır. Ortaya çıkan ilk takım tezgâhları, vida çekme operasyonları da yapabilen torna, planya ve freze tezgâhlarıdır. Operasyon sırasında, talaş derinliği ile stok uzunluğu ayarlanarak, parçanın tezgâh tarafından işlemesi mümkün olmuştur. Günümüzde bu operasyonun yerini frezeleme almış ve operasyon ilkesel olarak broşlama ve benzer operasyonlara temel oluşturmuştur. Bildiğimiz manada, modern talaşlı imalatın temelleri 19.yy. içlerinde Amerika ve Avrupa'da geliştirilmiştir. 19.yy. başlarında demir, sonrasında çelikler üzerinde operasyonlar geliştirilerek takım çelikleri üretilmiştir. Böylece, takım malzemeleri geliştirilmeye başlanmıştır [12].

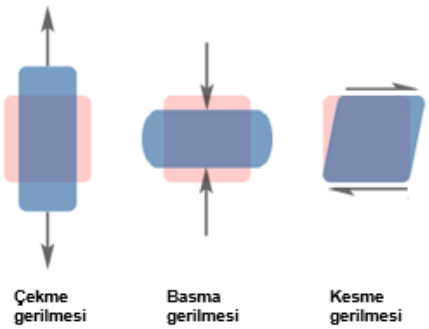
Şekil 3.1. Talaşlı imalat makineleri [12]

3.2. Malzemelerin Karakteristik Mekanik Özellikleri

3.2.1. Gerilme ve Gerinim Kavramı

Katı mekaniğinde, gerilme (σ) (ya da gerilim), birim alana etkiyen kuvvet miktarını göstermektedir. Cisim üzerine etkiyen kuvvetler; kesme gerilmesi, çekme gerilmesi ve basma (baskı) gerilmesi şeklinde sıralanabilir. Önceleri mekanik – extensometreler vasıtası ile ölçülen gerilme, sonraları yerini elektrik direncinde meydana gelen değişime bağlı olarak ölçüm yapan strain-gauge sistemine bırakmıştır [13].

$$\sigma = \frac{\text{F (Kuvvet)}}{\text{A (Uygulanan Alan)}} \tag{3.1}$$

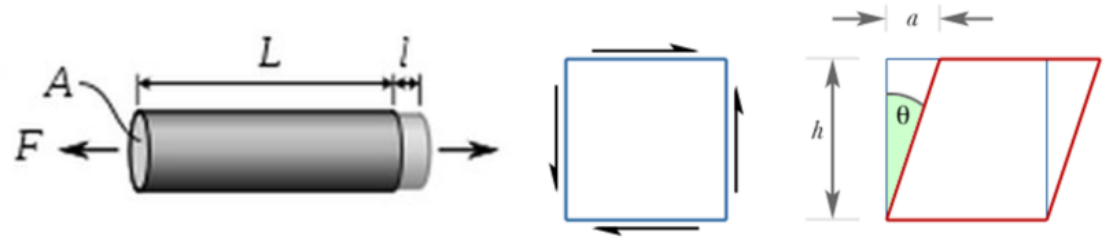


Şekil 3.2. Gerilme çeşitleri

Gerinim kavramı ise, yüklerin etki ettiği malzemenin, orijinal (üzerinde herhangi bir etki yokken) duruma kıyasla, şeklinin hangi oranda değiştirdiğini gösterir. Özetle gerinim kavramı, malzemedeki şekil değişimini, matematiksel biçimde ortaya koymamızı sağlıyor. Gerinim, üzerine etkiye kuvvetler ile aynı yöndeyse, normal gerinim (ε), fakat malzeme üzerine kesme kuvveti etkiyorsa, meydana gelen gerinim kesme gerinimi (γ) olarak ifade edilir.

$$\varepsilon = \frac{\Delta\text{L (boyca uzama)}}{\text{L (ilk boy)}} \tag{3.2}$$

$$\gamma = \frac{a}{h} = \tan\theta \text{ (Şekil 3.3)} \tag{3.3}$$



Şekil 3.3. Normal ve kesme geriniminin oluşumu

3.2.2. Elastisite Modülü

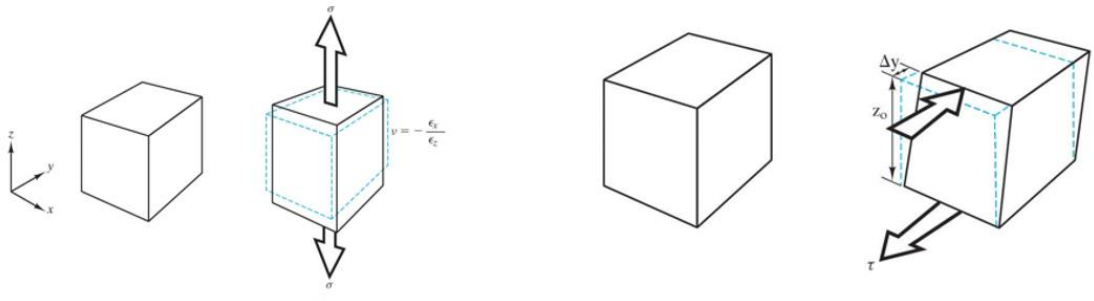
Malzemenin kendine etkiyen kuvvet ile elastik şekil değiştirmeye uğraması; elastisite modülü (Young Modülü) şeklinde de ifade edilebilir. Malzemeye ait elastisite modülü artıkça, malzeme daha rijit bir hale gelir. Malzemenin elastisite modülü büyük olduğu zaman, kendisine etkiyen gerilme ile daha az şekil değişimi meydana getirirken, elastisite modülü küçüldükçe ise daha da elastik davranış göstermektedir. Elastisite modülü; bir malzeme için karakteristik özelliktir (malzemeden malzemeye değişir) ve ürün tasarımı için önemli parametrelerden bir tanesidir. Yükleme altındaki malzemeye etkiyen kuvvet ortadan kalkınca, elastik uzama da ortadan kalkar. Elastik malzemelerde, gerilme ve birim uzama lineer biçimde değişir. Elastik malzemelerde, gerilme ve gerinim arasındaki bu ilişkiye, Hooke Kanunu denir. Malzemenin elastiklik modülü, gerilme-gerinim ilişki grafiğinin lineer kısmın eğimine eşittir [13].

Normal gerilme altındaki malzemenin elastisite modülü (E) (Hooke Kanunu);

$$\mathrm{E} = \frac{\sigma\ (\text{Normal Gerilme})}{\varepsilon\ (Gerinim)} \tag{3.4}$$

Kayma gerilmesi altında bulunan malzemenin kayma elastisite modülü (G);

$$\mathrm{G} = \frac{\tau\ (\text{Kayma Gerilmesi})}{\gamma\ (Gerinim)} \tag{3.5}$$

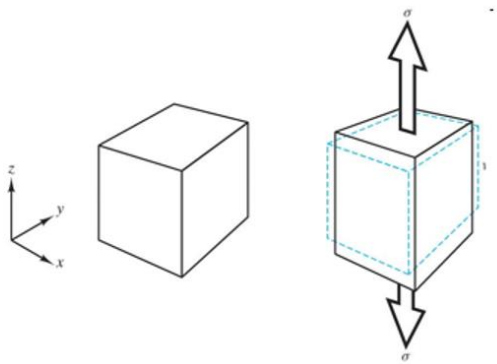


Şekil 3.4. Elastisite modülü

3.2.3. Poisson Oranı

Malzemelerin elastik özelliklerini ortaya koyan, bir diğer parametre ise poisson oranıdır (ν). Malzeme hacminde, elastik şekil değişimi sırasında bir değişiklik meydan gelir (fakat plastik deformasyonda hacim sabit kalır). Örnek olarak, çekme doğrultusunda, malzeme boyunda uzama meydana gelirken, bu uzamaya dik yönde kısalma oluşur. Meydana gelen bu değişikliler aradaki oran ise poisson oranı (ν), ile ortaya koyulur. Poisson oranı (ν), malzemelerin karakteristik özelliklerindendir ve her daim pozitiftir [13].

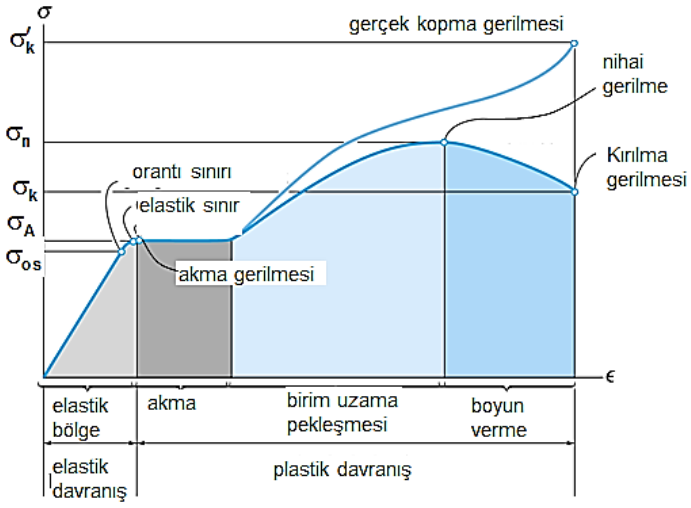
$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} \tag{3.6}$$



Şekil 3.5. Poisson oranı

3.2.4. Akma, Nihai Ve Kopma (Kırılma) Gerilmeleri Kavramları ve Diyagramı

Akma gerilmesi, bir malzemenin yükleme altındayken, plastik deformasyona başladığı sınır gerilme değeri olarak tanımlanır. Bir iş parçasına, akma gerilmesi sınır değerinin aşağısında, bir yük uygulandığı zaman, uygulanan yük ortadan kalktığında, iş parçası yeniden eski biçimini alır (elastik davranış), fakat uygulanan gerilme akma değerini aşarsa, iş parçasında oluşan deformasyonlar kalıcı olur (plastik davranış).

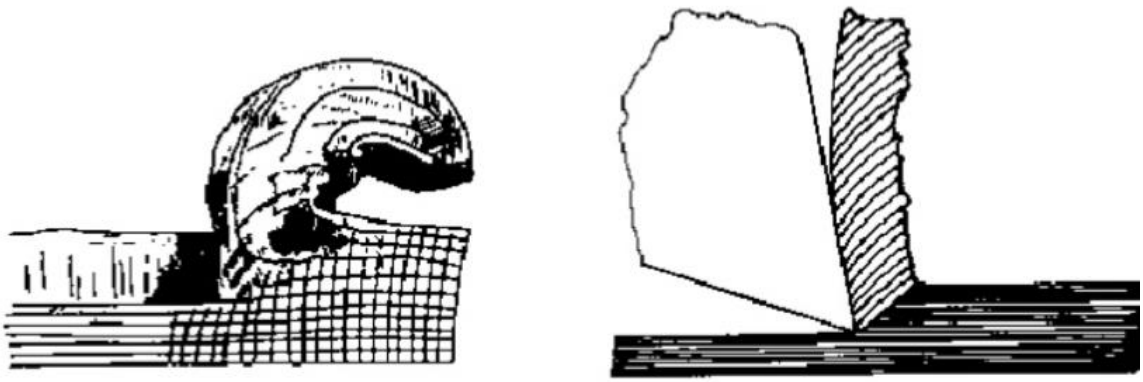


Şekil 3.6. Akma, nihai gerilme ve kopma gerilmeleri diyagramı [14]

Nihai gerilmeyi, bir malzemenin boyun vermeden ve kırılmadan dayanabileceği en yüksek gerilme değeri olarak ifade edebiliriz. Kırılma gerilmesi ise, bir malzemenin yükleme altında, kırıldığı gerilme değeri şeklinde ifade edilebilir. Şekil 3.6'da malzemenin özelliklerine ait gerilme tipleri görülmektedir [14].

3.3. Talaş Kaldırma Operasyonun Mekaniği

Talaş kaldırma operasyonları, tek veya çok uçlu kesici takımlar ile mekanik parçaların, nihai hallerini elde edebilmek için, işlenecek parçasından malzeme kaldırma operasyonu biçiminde ifade edilebilir. Talaş kaldırma mekaniğinde, talaş meydana gelme operasyonu ile işlenecek parçasından malzeme kaldırılır [15]. Talaşın meydana gelmesi için; kesici takımın malzemesinin, iş parçası malzemesine kıyasla aşınmaya karşı daha dirençli ve daha sert seçilmesi gereklidir. Operasyon esnasında kesici takımın; ilerlemesi ile birlikte, talaş derinliği meydana getirebilmesi için, takım ve işlenen parça arasında dalmayı sağlayacak, kesici bir uç geometrisine de sahip olmalıdır. Bununla birlikte, kesici takım, işlenecek parçanın malzeme direncini yeteri kadar bir kuvvetle yenebilmesi için kesici takım ve işlenecek parça arasında, kesme hızının veya nispi bir hareketin meydana gelmesi gereklidir. Bu koşullar var olduğu sürece, işlenecek parçadan, kesici takım talaş yüzeyi ile talaş meydana getirmek için malzemeden bir kısım parça kaldırılacaktır [16]. Başka bir söyleyişle, talaş kaldırma operasyonu; belirli bir boyut, yüzey ve şekil hassasiyeti ve kalitesine haiz bir parça oluşturmak için, keskin bir takım ve de güç sağlayarak, işlenecek parça üzerinden tabaka biçiminde, malzeme kaldırma operasyonudur. İşlenen parçadan, kopan tabaka talaş olarak adlandırılır. Fiziksel olarak talaş kaldırma operasyonu; elastik ve plastik şekil değiştirme temelli, sürtünme ve ısı oluşumu, talaşın kırılması ve büzülmesi, işlenen parça yüzeyinin sertleşmesi, kesici takım ucunun (dişlerin ve ağzının) aşınması gibi birçok olayın oluştuğu, oldukça karmaşık fiziksel bir operasyondur.



Şekil 3.7. Talaş oluşumu [15]

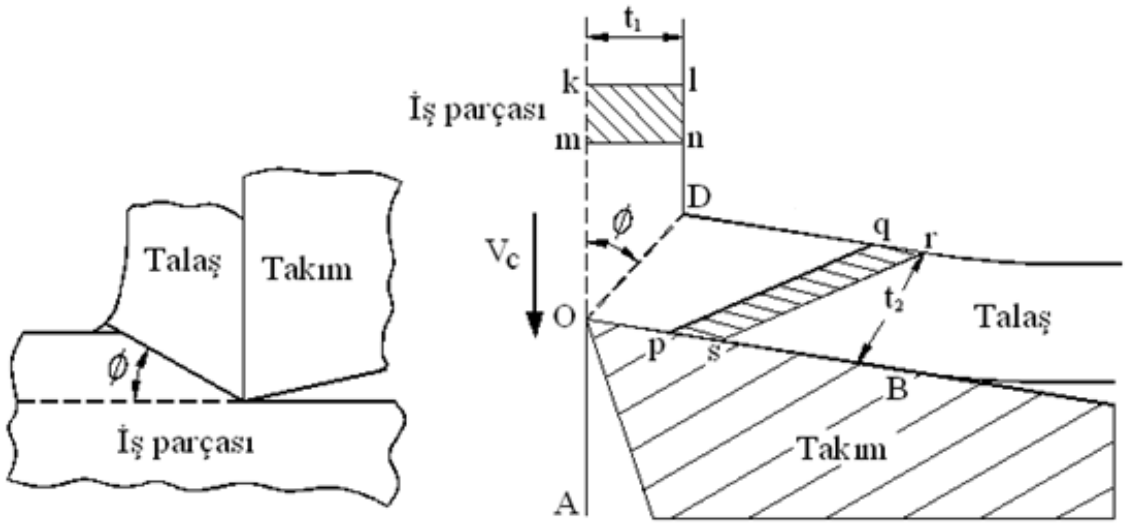
3.3.1. Talaş Kaldırma Teorileri

Üretim endüstrisinde, malzemelerin verimli biçimde işlenmesi, yalnız kesilen malzeme ile ilgili değil, aynı anda farklı koşullar altında, kesici takıma ait malzeme, kesici takım geometrisi ve operasyonun ne şekilde yapılacağı hakkında da bilgileri içermelidir. Son yıllarda, pek çok yeni takım tezgâhı ve kesici takım malzemeleri geliştirilmekte, çok daha yüksek hızlarında kesme işlemi yapılmakta ve bu koşullarda endüstrinin temel ihtiyacı olan, üretim hızlarını artırmaktadır. İncelenen tüm bu faktörler dikkate alındığı zaman, takım tezgâhları ile talaş kaldırma teorisi ve bunların uygulama alanları devamlı araştırılmaktadır [16].

Talaş kaldırma operasyonu analizleri ile alakalı detaylı araştırmalar, meydana gelen talaşta farklı uzama ve gerilme ile sonuçlanan birkaç tane modelin varlığını ortaya koymaktadır [17].

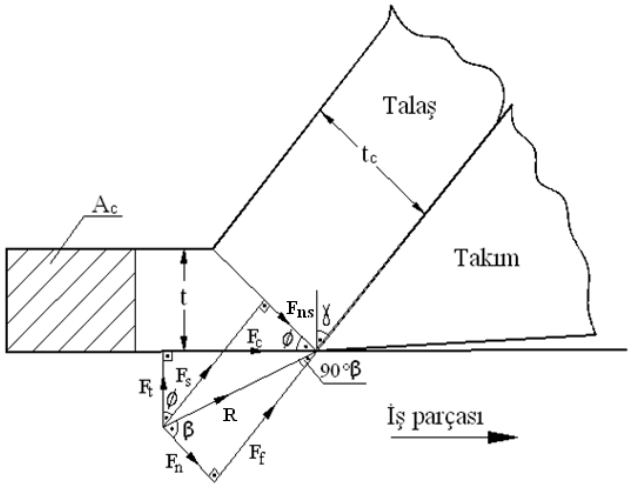
3.3.1.1. Ernst, Merchant ve Pispaen Yaklaşımı

Ernst, Merchant ve Pispaen yaklaşımları talaşın; talaş kaldıran takımın önündeki kesici kenardan, işlenen parça yüzeyine kadar uzanan, yaklaşık olarak tek düzlem ile sınırlanan, kayma hareketi neticesinde meydana geleceğini dikkate alır [16]. Yalnızca sürekli talaş tiplerinde geçerli olan bu yaklaşım, diğer tip talaşlar için denenmemiştir. Merchant, talaş kaldırma mekaniği temelinde, hassas bir geometride, ideal bir talaşın meydana gelme kavramını ortaya koymuş ve kavram Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Merchant'ın ideal talaş oluşum modeli [16].

Yaklaşımını detaylıca irdeleyecek olursak; takımının kesme kenarına etki eden bileşke kuvveti “R” ve bileşke kuvvetinin kayma düzlemi boyunca ve kayma düzlemine dik doğrultudaki bileşenleri “F_{ns}” ve “F_s”, kesici takım yüzeyi boyunca ve kesici takıma dik doğrultudaki “F_n” ve “F_f” bileşenleri, bileşke kuvvetteki esas kesme kuvveti “F_c” ve ilerleme kuvveti olan “F_t” bileşenleri Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Ortogonal kesmede kuvvet diyagramı [16]

Yaklaşıma baktığımızda, bütün takım bileşke kuvvetinin, talaş-takım ara yüzeyi boyunca iletildiği ve kesici takım kesme kenarı veya yan kesme kenarı üzerine herhangi bir kuvvetin etki etmediği, dolayısıyla kazıma kuvvetinin 0 (sıfır) olduğu varsayılır. Ernst ve Merchant teorisinin temelinde, kayma açısı öyle bir değere haiz olmalıdır ki, kesme operasyonunda yapılan iş, F_c kuvveti ile orantılı olacağından, ϕ’ ye bağımlı F_c kuvveti için bir ifade elde edebilmek ve minimum F_c kuvveti için bir ϕ değerini elde etmek mümkün olabilsin. Bu durumdan dolayı Şekil 3.9’dan;

$$F_s = R.\cos(\phi + \beta - \gamma) \tag{3.7}$$

$$F_s = \tau_s.A_s = (\tau_s.A_c) / \sin(\phi) \tag{3.8}$$

eşitlikleri türetilebilir.

Eşitliklerde; τ_s: iş malzemesinin kayma dayanımı (kayma düzlemi üzerinde), A_s: Kayma düzlemi alanı, A_c: Deforme olmamış talaş kesit alanı, γ: Normal talaş açısı, β: Takım-talaş arasında ortalama sürtünme açısını göstermekte olup arctan(F_t/F_n) ifadesine eşittir.

$$R = \frac{\tau_s . A_c}{\sin(\phi)} = \frac{1}{\cos(\phi+\beta-\gamma)} \tag{3.9}$$

Bu geometri için;

$$F_c = R.\cos(\beta - \gamma) \tag{3.10}$$

şeklinde ifade edilebilir. Eşitlik 3.9 ve 3.10 kullanılarak;

$$F_c = \frac{\tau_s . A_c}{\sin(\phi)} = \frac{\cos(\beta-\gamma)}{\cos(\phi+\beta-\gamma)} \tag{3.11}$$

eşitliği ortaya konabilir. Minimum F_c kuvvetinde ϕ değerini bulmak için Johnson & Cook malzeme modeli akma gerilmesi eşitliğinin (3.12) ϕ' ye göre diferansiyeli alınıp ve sıfıra eşitlenirse, Eşitlik 3.13 türetilir;

$$\overline{\sigma} = [A + B(\overline{\varepsilon})^n][1 + c\, ln\left(\frac{\dot{\overline{\varepsilon}}}{\dot{\overline{\varepsilon}}_0}\right)][1 - \frac{T-T_R}{T_M-T_R}] \tag{3.12}$$

(Eşitlik 3.12 de; $\overline{\sigma}$ malzemenin akma gerilmesi, $\dot{\overline{\varepsilon}}$ şekil değiştirme hızı, $\dot{\overline{\varepsilon}}_0$ referans şekil değiştirme hızı, $\overline{\varepsilon}$ eşdeğer plastik şekil değiştirme, A akma gerilmesi, B şekil değiştirme sertleşmesi katsayısı, n şekil değiştirme üssü, C şekil değiştirme hızına bağlı katsayı, m termal yumuşama katsayısı, T sıcaklık, T_R oda sıcaklığı ve T_M ise malzemeye ait ergime sıcaklığıdır. Bu denklemdeki sabitler "Split Hopkinson Pressure Bar" (SHPB) test düzeneğinden elde edilmektedir [18].)

$$2\phi + \beta - \gamma = \frac{\pi}{2} \tag{3.13}$$

Merchant; yeni bir teori ortaya koyarak, aşağıdaki ilişkiyi de ortaya çıkarmıştır.

$$\tau_s = \tau_{so} + k.\sigma_s \tag{3.14}$$

Şekil 3.9'dan;

$$F_{nc} = F_r\, sin(\phi + \beta - \gamma_{ne}) \tag{3.15}$$

$$F_{ns} = \sigma_s.A_s = \frac{\tau_s.A_c}{sin\,\phi} \tag{3.16}$$

biçiminde ifade edilebilir.

Eşitlik 3.15 ve 3.16'da kayma düzlemine etki eden normal gerilme ise;

$$\sigma_s = \frac{sin\,\phi}{A_c} R.sin(\phi + \beta - \gamma) \tag{3.17}$$

olarak ifade edilebilir ve eşitlik 3.10 ve 3.17 birleştirilecek olursa, birinci deformasyon bölgesi için kayma gerilmesi;

$$\tau_s = \sigma_s.cot(\phi + \beta - \gamma) \tag{3.18}$$

biçiminde elde edilebilir. Eşitlik 3.14 ve 3.18'den;

$$\tau_s = \frac{\tau_{so}}{1 - k.tan(\phi + \beta - \gamma)} \tag{3.19}$$

ifadesi türetilebilir. Eşitlik 3.19'da; τ_s değerinin ϕ'deki değişme ile nasıl değiştiğini açıkça göstermektedir. ϕ'ye bağlı F_c kuvveti için yeni eşitlik meydana getirmek için Eşitlik 3.11'de Eşitlik 3.19'daki τ_s bağıntısı yerine yazılırsa;

$$F_c = \frac{\tau_{so}.A_c.\cos(\beta-\gamma)}{\sin\phi.\cos(\phi+\beta-\gamma).[1-k.\tan(\phi+\beta-\gamma)} \quad (3.20)$$

eşitliğini elde etmiş oluruz. Herhangi bir malzeme için, k ve τ_{so} değeri ve kesme işlemi içinde A_c ve γ değerleri sabitlerdir. Bundan dolayı da ϕ'nin yeni bir eşitlik ifadesinin ortaya konulması için Eşitlik 3.20'nin diferansiyeli alınırsa;

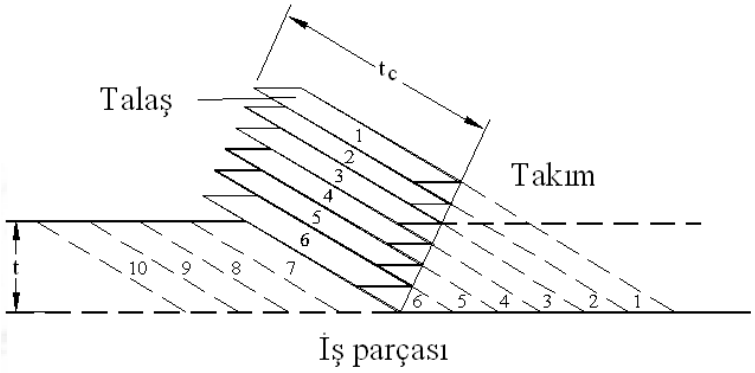
$$2\phi + \beta - \gamma = C \quad (3.21)$$

ifadesi yazılabilir. Eşitlik 3.21'de C iş malzemesi sabiti olup $C = \mathrm{arc.}\cot k$ biçiminde hesaplanabilir. Fakat deneysel olarak yapılan çalışmalarda, değişik kesme koşulları için de alınan herhangi bir malzemede τ_{so} değerinin sabit kaldığı görülmüştür. Bu nedenden dolayı da k sabiti de sıfıra eşittir.

Piispanen tarafından da benimsenmiş olan bu model, kayma açısına karşılık, serbest yüzeye eğik olarak tutulan bir iskambil kâğıdı grubu biçiminde malzemenin kesileceğini ortaya koymaktadır [16]. Kesici takım, iş parçasına göre hareket ettiğinde, zaman içeresinde bir kartın veya katmanın devreye girmesi ile bunların birbirlerinin üzerine kaymasına neden olacağından kaynaklanmaktadır (Şekil 3.10). Bu modelin özelliklerini özetle aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz;

a) Takım yüzeyi sürtünmesi, plastikten deformasyondan ziyade elastik deformasyon şeklinde meydan gelir,
b) Kayma işlemi, mükemmel düzlem yüzeyde gerçekleşir,
c) Talaş sıvanma durumu, ihmal edilir,
d) Kayma açısı, serbest seçilmektedir.

Tüm bu koşullar ile birlikte bu model için, kesici takımın çok iyi bilenmiş olması, talaş derinliğinin hep sabit ilerlemesi, işlenen parçanın kesici takıma göre, hareket etmesi, sürekli biçimde talaşın meydana gelmesi ve kesme düzleminin kesici takım boyunca kesme ve normal gerilmeler için aynı şekilde, muntazam (uniform) olması gibi durumların varsayımlarına dayanır [16].



Şekil 3.10. Piispanen talaş oluşum modeli [16]

3.3.1.2. Lee ve Shaffer Yaklaşımı

Lee ve Shaffer yaklaşımında; plastisite teori ortogonal kesme işlemi için uygulanmıştır. Plastisite teoremi kullanılarak, kesme probleminin incelenmesinde gerilme altındaki işlenecek malzemenin davranışlarıyla ilgili olarak;

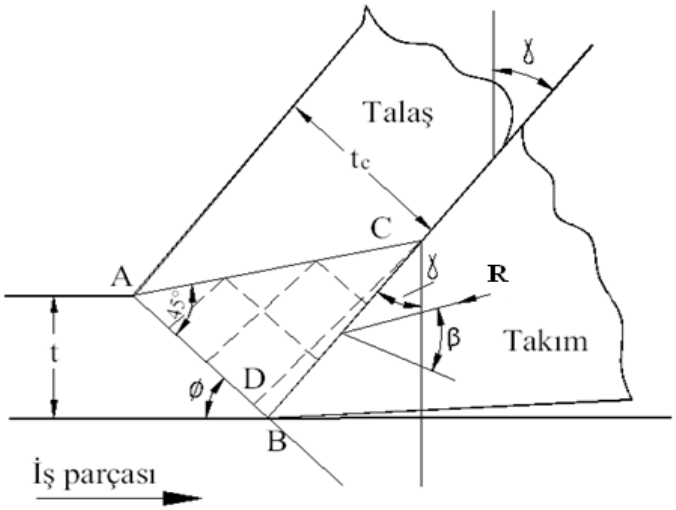
a) Malzemenin; rijit plastik davranış gösterdiği, elastik uzamanın ihmal edildiği, akma gerilme değeri geçildikten sonra, deformasyonun sabit gerilmede meydana geleceğini ve rijit plastik davranış gösteren malzemenin, gerilme-gerinim eğrisinin düz doğru olduğunu,

b) Malzeme davranışının, deformasyon miktarından bağımsız olduğunu,

c) Deformasyon sırasında, yükselen sıcaklık ve atalet etkilerinin ihmal edilebileceği varsayımlarında bulunulur.

Lee ve Shaffer yaklaşımında, kesme operasyonu sırasında, çok yüksek uzamalar ve de uzama miktarları meydana geldiğinden dolayı, talaş kaldırma operasyonu sırasında, işlenen malzemenin gerçek davranışlarına çok yaklaşılmıştır. Birçok metal malzemelerde, deformasyon sertleşmesi miktarının, artan uzama miktarı ile giderek azaldığı bilinmekte ve de yüksek uzama etkisinin de maksimum gerilme ile ilişkili bir biçimde, metal malzemenin akma dayanımının artmasına neden olmaktadır. Aynı biçimde, toplam uzama miktarına göre meydana gelen elastik uzama miktarı da ihmal edilebilecek düzeydedir. Bundan dolayı, işlenen malzemenin, gerilme-gerinim eğrisi hemen hemen bir doğru oluşturur.

Plastisite teoremi kullanılarak çözülmek istenilen problemde, kayma hattı bölgesinin oluşması gereklidir. Bu bölge; iki adet ortogonal çizgi ailesinden meydana gelir ve maksimum kayma gerilmesi de iki adet ortogonal doğrultuda, plastik bölge içinde yer alır. Mevcut yaklaşımda; mükemmel plastik bir malzemenin kayma hattı, Şekil 3.11'de gösterildiği biçimde, paralel düz şekildeki doğru ailesinden meydana gelen talaşta, belirli bir kayma doğrusu bölgesinin (plastik bölgenin) mevcut olduğu öngörülmektedir [19]. Burada bileşke kuvvet "R", kayma açısı "ϕ", normal açı "γ", sürtünme açısı "β", deformasyona uğramamış talaşın kalınlığı "t" olarak ifade edilmektedir. Kayma gerilmesi ve kayma gerilmesinin maksimum değeri "AC" doğrusu boyunca oluşur. Talaş kaldırma operasyonunda, işlenen parçanın malzemesinin fiziksel özellikleri herhangi bir değişime uğramaz. Neredeyse tüm işlenen gevrek malzemeler, mükemmel plastik özelliklerinden daha ziyade, elasto-plastik özelliklere haiz olduğundan, mevcut yaklaşım için sınırlı uygulama alanı bulunmaktadır.



Şekil 3.11. Ortogonal kesme için Lee ve Shaffer'ın kayma hattı alanı teorisi [19]

"AC" serbest yüzey olarak seçilebilir ve de maksimum kayma gerilmesinin yönleri daima $\pi/4$'de serbest yüzey ile karşılaşacağından "CAB" açısı $\pi/4$'e eşit olacaktır. Takım-talaş ara yüzeyine etki eden gerilmelerin, nizami (üniform) olduğu ön görülüp, "BC" sınırında esas gerilme mevcut sınırı β ve $\beta + (\pi/4)$ açılarında karşılanır.

Maksimum kayma gerilmesi doğrultuları, ana gerilme doğrultularına kıyasla $\pi/4$ açıda meydan gelir. Böylece, “BCD” açısı; $(\pi/4) - \beta$’ya eşit olur. Şekil 3.11’den;

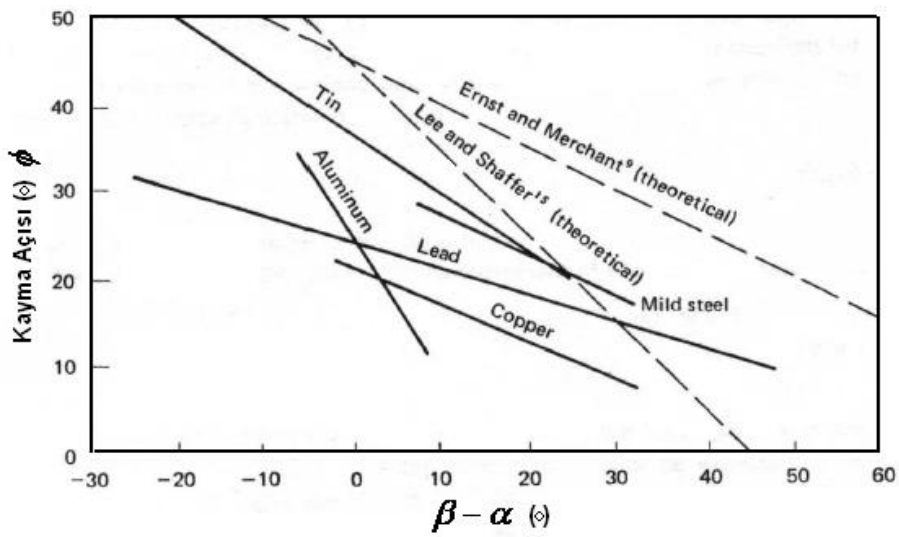
$$\phi + \frac{\pi}{4} + \beta - \gamma_{ne} = \frac{\pi}{2} \tag{3.22}$$

biçiminde yazılabilir. Düzenleme yapıldığında da;

$$\phi + \beta - \gamma_{ne} = \frac{\pi}{4} \tag{3.23}$$

eşitliği meydana getirilmiş olur. Lee ve Shaffer yaklaşım ile Eşitlik 3.23’de $\beta = \pi/4$ ve $\gamma = 0$ olduğu zaman, $\phi = 0$ olacağından dolayı uygulanmıştır.

Açıklaması yapılan teori ve deneysel çalışmaların birbirleri ile kıyaslanması Şekil 3.12’de gösterilmiş ve Şekil 3.12 için kayma açısına “ϕ”, karşılık “$\beta - \gamma$” değişimi, Lee & Shaffer, Ernst & Merchant’ın ortaya koyduğu ilişkilerin, düz doğrular biçiminde olduğu izlenmektedir. Şekil 3.12’den, testi yapılan farklı malzemede, her iki teorinin de, deneysel sonuçlarla olan nicelikli uyumuna tam anlamıyla ulaşılamadığı, fakat teoriler ile deneysel sonuçlar, nitelikli olarak karşılaştırıldığında, her iki teori ve deneysel sonuçlar da “ϕ” ve “$\beta - \gamma$” arasında, doğrusal bir ilişkinin mevcut olduğunu göstermektedir. “$\beta - \gamma$” ifadesinde meydana gelen azalma her daim “ϕ” açısında artışa neden olmuştur. Bundan kayaklı olarak, talaş açısı “γ” ve takım yüzeyindeki ortalama sürtünme açısı “β” için meydana gelen bir azalama, kayma alanında oluşacak azalmaya karşılık, kayma açısını artıracaktır.



Şekil 3.12. Farklı teorilerin ve deneysel sonuçların karşılaştırılması

Lee & Shaffer ve Ernst & Merchant'ın kayma açısı teorileri ile Şekil 3.12'deki deneysel sonuçları, göstermiştir ki; talaş kaldırma operasyonunda en önemli faktör, takım-talaş ara yüzeyindeki sürtünmedir. Takım yüzeyinde meydan gelen, ortalama sürtünme katsayısı ile takım-talaş sürtünme davranışları oldukça önem arz eder. Bundan kaynaklı, talaş kaldırma operasyonunda; takım-talaş ara yüzey sürtünme davranışları detaylı biçimde incelenerek dikkate alınmalıdır.

3.3.1.3. Oxley Yaklaşımı

Oxley modeli, çok yaygın kullanılan talaşlı imalat modellenme yaklaşımlarındandır. Oxley yaklaşımı; sürekli talaş oluşumu ile sınırlıdır. Bu nedenle, bölünmüş talaş oluşumu meydana getiren malzemelerin akma gerilmelerini ortaya koymakta kullanılmaz. Oxley; modellediği yaklaşımda, aşağıdaki kabulleri dikkate alır [15].

- Kesici uç; yeterince keskin olmalıdır (çok çok küçük kesme ovalliği).
- Talaş tipi; sürekli talaş biçimindedir.
- Kesme derinliği; tatmin edici yüzey gerilme şartları için ön ilerleme süresinden daha fazla olmalıdır.
- Takım-talaş ara yüzeyi ve kayma düzleminde meydan gelen sıcaklık ve gerilmeler benzer dağılımlı ve ortalama değerlere sahip varsayılmalıdır.
- Pasif kuvvetler; ihmal edilebilir.
- Takım yüzeyi üzerinde; yığılmalı talaş (BUE) oluşumu görünmemelidir.

Oxley, kayma açısı ilişkisini açıklayan analitik bir ifadeyi, aşağıdaki biçimde ortaya koymuşudur;

$$\theta = \phi + \beta - \gamma \tag{3.24}$$

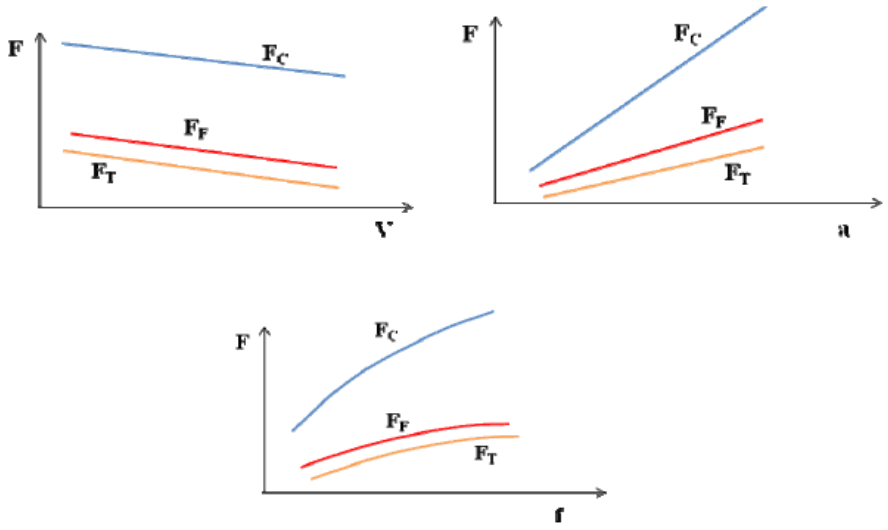
ve

$$\theta = \arctan\left[\frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} - \phi + \left(1 + \frac{t_c}{t}\right)\frac{cos2(\phi-\gamma)}{2tan\beta} - \frac{\sin 2(\phi-\gamma)}{2}\right] \tag{3.25}$$

biçiminde ifade edilmiştir.

3.4. Talaş Oluşumuna Etki Eden Faktörler

Talaş kaldırma işlemi için kesici takımın sertliği iş parçası malzemesi sertliğinden daha fazla olması gerekmektedir. Kesici takımın; belirli kesme geometrisine sahip olması, uygun kesme parametreleri varlığında iş parçasına belirli bir yük uygulamalıdır. İş parçasının üzerine uygulanacak yük, ilerlemenin olduğu yönde malzemeyi deforme etmeye çalışır. İş parçası; belirli bir bölgeye kadar deformasyona uğradıktan sonra iş parçasının üzerinden malzeme ayrılacaktır. Ayrılan malzemeye talaş denir. Talaş kaldırma operasyonu esnasında kullanılan kesme parametreleri, talaş oluşumunu doğrudan etkiler. Talaş kaldırma operasyonunda en etkin olan üç parametrenin (kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliği) kesme kuvvetlerine etkisi Şekil 3.13'de gösterilmiştir. Grafiklerden anlaşıldığı üzere kesme esnasında oluşan üç kuvvetten en büyüğü asıl kesme kuvvetidir. Artan kesme hızı ile iş malzemesi; birinci deformasyon bölgesinde daha hızlı bir deformasyona uğrayacaktır. Şekil değiştirme hızı artacaktır. Bu durum da kesme sıcaklığının artmasına neden olacaktır. Artan kesme sıcaklığı ise malzemenin daha kolay kesilmesine katkıda bulunacağından, kesme kuvvetleri nispeten düşmektedir.

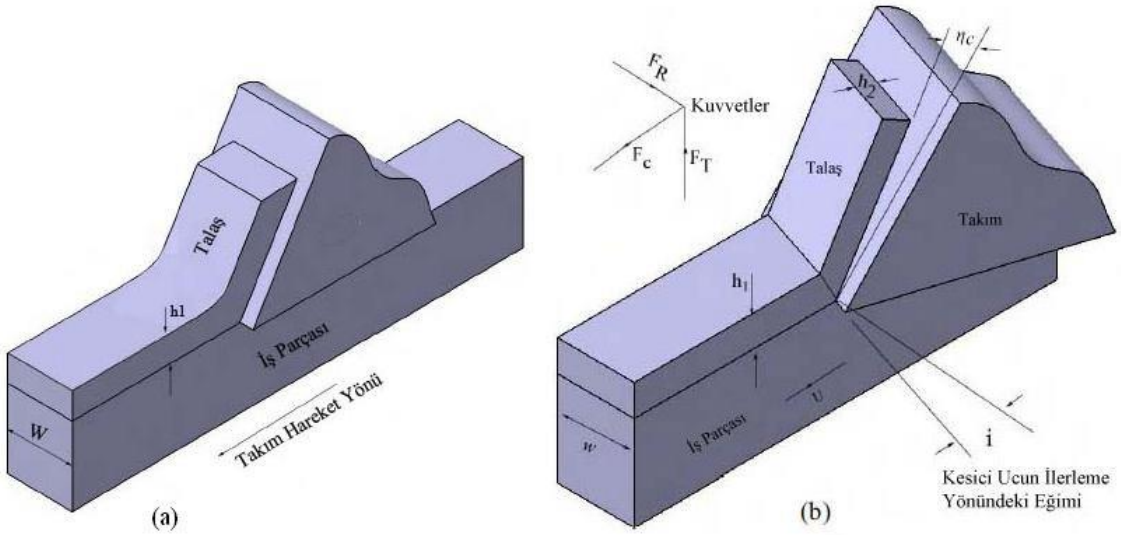


Şekil 3.13. Kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi

İlerleme değerinin artması ile de birim zamanda kaldırılacak talaş miktarı artacak ve kesmeye etki eden her üç kuvvet de artacaktır. Aynı bağlamda artan talaş derinliği, kalkan talaşın kesitinin artmasını sağlayacaktır. Bu durum yine kesme kuvvetlerinin artışına sebep olacaktır.

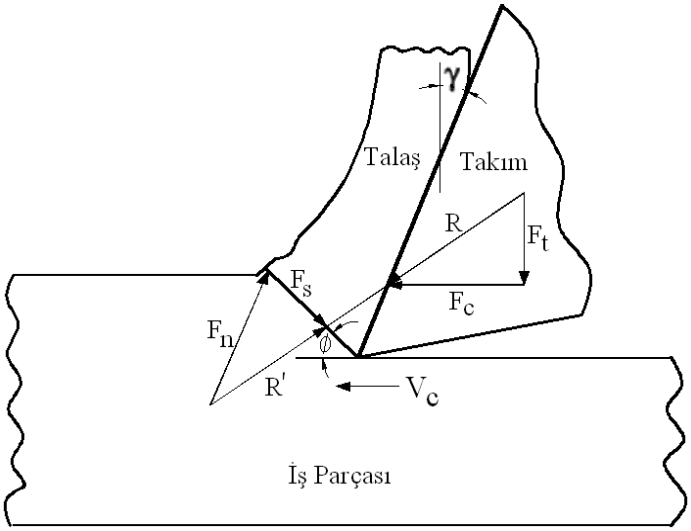
3.5. Ortogonal (Dik) ve Meyilli (Eğik) Kesme İşlemi

Kesme işleminin analizi için akademik ve endüstriyel alanlarda genellikle dik (ortogonal) ve eğik (oblik) iki kesme yöntemi kullanılır (Şekil 3.14). Dik (ortogonal) kesme operasyonu; kesici takımda kesme yapan kenarın pozisyonunun iş parçasına göre dik olarak konumlandığı kesme operasyonudur. Dik kesme operasyonu; genellikle, iki boyutlu problem davranışı gösterdiğinden dolayı kesme mekaniğini meydana getiren eşitliklerin yazılmasında teorik ve deneysel işlerde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir.



Şekil 3.14. Kesme yöntemlerinin şematik gösterimi a) Dik (Ortogonal) kesme, b) Eğik (Meyilli) kesme [20].

Dik (ortogonal) kesme operasyonu kullanılarak yapılan çalışmalarda, kesme derinliği deneysel çalışmalarda da nümerik analizlerde de kolaylık olması açısından çoğunlukla sabit alınır. Bu kesme operasyonunda talaş akışı, kesici kenarın eğimi ile ilişkili olarak değişir. Dik (ortogonal) kesme operasyonunda, talaş kaldırma sırasında oluşan kayma düzlemi ve takım üzerindeki kuvvetler Şekil 3.15'de görülmektedir [21].



Şekil 3.15. Dik (Ortogonal) kesmede kayma düzlemi ve takım üzerindeki kuvvetler [21].

3.6. Kayma Düzlemi ve Kayma Açısı

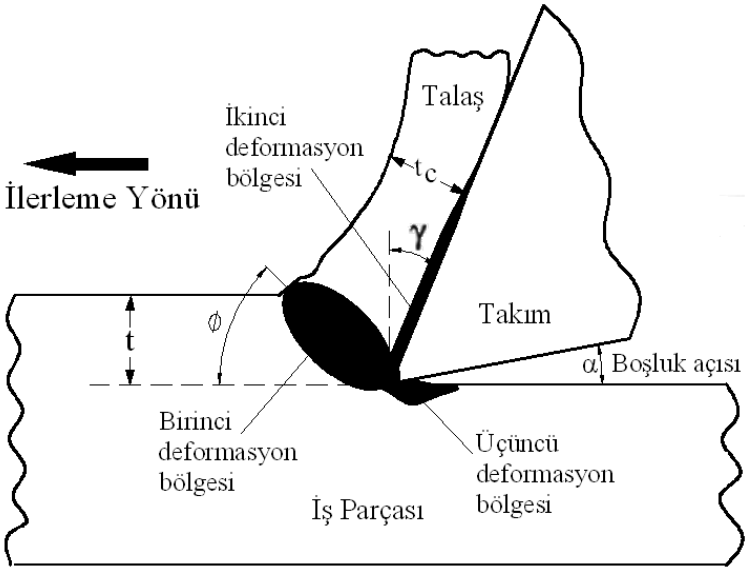
Kayma açısı, plastik deformasyonun meydana geldiği yerdeki alan açısıdır. Hem kesme esnasında dinamik olarak hem de durduktan sonra statik olarak kayma açısını hesaplamak veya ölçmek için birçok metot mevcuttur. Kayma açısını hesaplayabilmek için talaş oranını hesaplamak gerekir. Deforme olmamış talaş kalınlığının (t), deforme olmuş talaş kalınlığına (t_c) oranı talaş oranı olarak tanımlanır ve aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$r_c = \frac{t}{t_c} = \frac{AB.\sin\phi}{AB.\cos(\phi-\gamma)} \tag{3.26}$$

Eşitlik 3.26'da AB: Takımın uç kısmından iş parçasının serbest yüzeyine kadar kayma düzlem uzunluğunu, ϕ: kayma açısını ve γ: talaş açısını ifade eder. Eşitlikte (3.26) ölçülen talaş kalınlık oranının fonksiyonu olarak kayma açısı için kosinüs teoremini açarak ve sadeleştirerek yazıldığında ϕ açısı;

$$\tan\phi = \frac{r_c.\cos\gamma}{1-r_c.\sin\gamma} \tag{3.27}$$

olarak ifade edilebilir.



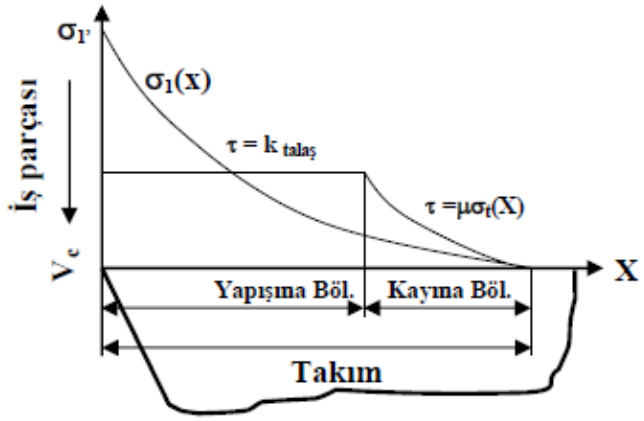
Şekil 3.16. Dik (ortogonal) kesme modeli [21].

Talaş kaldırma operasyonu sırasında takım ve iş parçası arasında meydana gelen kayma bölgeleri Şekil 3.16'da gösterilmiştir. Kayma doğrultusu boyunca, talaş kaldırma operasyonu yoğunlaşmayı gerektirir. Kayma düzlemine yaklaşıncaya kadar malzeme deforme olmaz ama kayma düzlemi az miktarda geçtiğinde oldukça fazla miktarda basit kayma oluşarak Şekil 3.16'da olduğu gibi talaş meydana gelir. Homojen olmayan uzamadan dolayı talaş arkası kabadır. Bu durumda malzeme kesildiği sırada oluşan gerilme yığılmalarından kaynaklı veya zayıf noktaların oluşundan dolayı meydana gelmektedir.

3.7. Takım-Talaş Temas Boyu

Takım-talaş temas uzunluğu, talaş kalınlığı (deforme olmamış), talaş oluştuğu bölge, kayma açısı, talaşın meydana geldiği bölgenin geometrisi ve metal kesme işlemindeki süreçlerin hepsi birlikte değerlendirilmektedir [22].

Takım-talaş arasında temas uzunluğu, kesme kuvvetlerinin büyüklüğünü etkiler. Kesikli talaş çıkaran ve iki fazlı malzemelerde, talaş ve kesici takım arasında daha az temas uzunluğu olduğu için çok düşük kuvvetler oluşur. Sınırlı bir temas uzunluğuna sahip takımlar için takım-talaş arasındaki temas uzunluğunun azaltılmasıyla kesme kuvvetlerinde de belirli düşüşler sağlanabilmektedir [16].



Şekil 3.17. Ortogonal kesme şartlarında takım talaş yüzeyinde oluşan normal ve teğetsel gerilmelerin değişimi [23].

Takımın ömrünün belirlenmesi hususunda takım-talaş ara yüzeyindeki temasın koşulları çok önemlidir. Bu hususta en önemli parametrelerden birisi de takım-talaş temas uzunluğudur. Artış gösteren takım-talaş temas uzunluğu, takımın yüzeyindeki sıcaklık dağılımını etkilemekte ve bu nedenle aşınma sürecini hızlandırmaktadır [24].

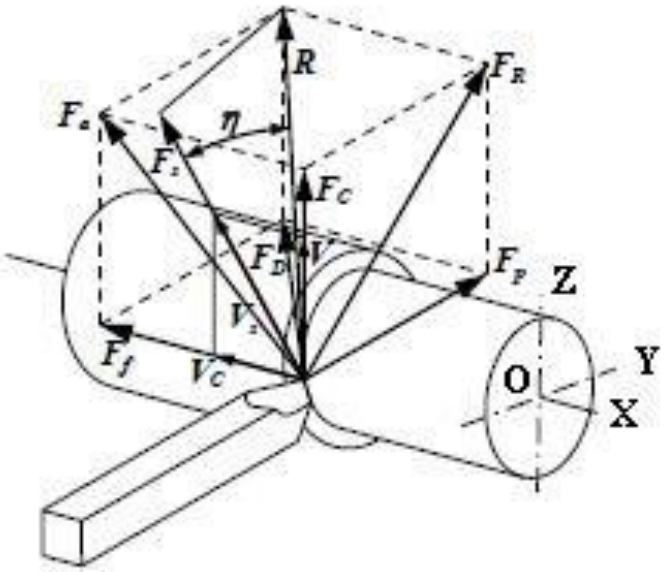
Genel bir görüşe göre; talaş kalınlığı, kayma ve talaş açısının fonksiyonudur. Temas uzunluğunun artması, pozitif talaş açısının azalması ve talaş kalınlığının artmasıyla da meydana gelir [24]. Kesme sıvısı, iş parçası, takım ve de operasyon parametreleri temas boyunu etkileyen öteki faktörler olarak sıralanabilir [25].

3.8. Kesme Kuvvetleri ve Gerilmeler

Talaş kaldırma operasyonunda, iş parçasından talaşın kaldırılması için büyük güce ihtiyaç duyulur. İhtiyaç duyulan büyük güçten kaynaklanan kesme kuvvetlerini, doğrudan ve dolaylı olarak iki biçimde ölçebiliriz. Doğrudan dinamometre kullanılarak ve teorik biçimde makine takım davranışlarından çıkarım yaparak ölçülebilir [26].

3.8.1. Talaş Kaldırmada Oluşan Kesme Kuvvetleri

Talaş kaldırma operasyonu sırasında meydana gelen kesme kuvvetleri, kesme performansını ve birim parça maliyetini direkt etkilemektedir. Bu nedenlerden dolayı uzun yıllardır araştırmacıların ilgisini çekmiş, bu konuda birçok araştırma yapılmış ve hala yapılmaktadır. Sert karbürlerin kullanılmaya başlanması ile birlikte, takım malzemelerindeki gelişmeler hız kazanmış; kesme hızları ve yüzey kalitesi artmaya başlamıştır. Bilimsel ilerlemenin ışığında, talaş kaldırma operasyonları operatörlerin kişisel tecrübesinden, bilimsel bir düzeye evrilmiştir. İşlenen parçanın, emniyetli, kaliteli, uzun ömürlü ve ekonomik olması için, operasyona etki eden kuvvetlerin tamamı hassas biçimde belirlenmelidir. Bu nedenle, kuvvet ölçümlerinin yüksek hassasiyette yapılması elzemdir. [27].



Şekil 3.18. Tornalamada oluşan kesme kuvvetleri [28].

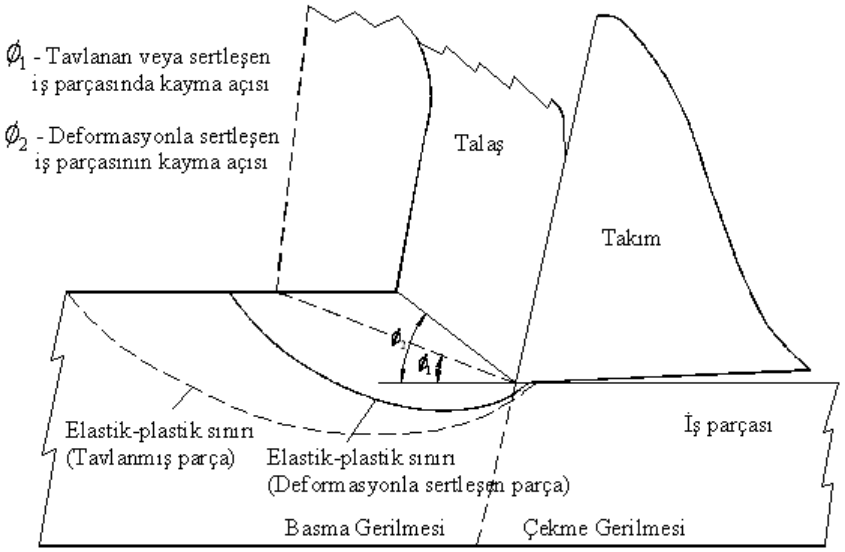
Talaş kaldırma operasyonunda yarı-ortogonal (yarı-düz) kesme operasyonunda üç doğrultudaki tüm kuvvet bileşenleri ölçülebilir. Şekil 3.18'de takımın üzerindeki kuvvetler gösterilmektedir. Bu kuvvetler, takım-talaş yüzeyine etkisi olan kesme ucuna dik OZ doğrultusunda kuvvetin bileşeni kesme kuvveti (F_c) olarak adlandırılır. Kesme hız vektörünün yönünde etki eden asıl kesme kuvveti olup, genelde meydana gelen kuvvetlerin en büyüğüdür ve kesme operasyonu için gereken gücün 99%'unu oluşturur. İlerleme yönüne paralel OX doğrultusunda takıma etkiyen kuvvetin bileşeni ise ilerleme kuvveti (F_f) olup bu kuvvet genellikle F_c kuvvetinin yaklaşık 50%'sini oluşturmaktadır. Ancak ilerleme miktarları ve kesme hızları karşılaştırıldığı zaman, fark çok yüksek olduğu için gerekli gücün sadece küçük bir kısmı harcanır. Radyal doğrultuda, takımı iş parçasından uzaklaştırmaya çalışan, OY doğrultusunda işlem gören yüzeye dik şekilde etki eden radyal (pasif) kuvvet (F_p) ise kesme operasyonuna etkiyen üçüncü bileşendir. Bu bileşen; ilerleme kuvvetinin yaklaşık 50%'sine denk gelir ve güç gereksinimi için katkısı, radyal doğrultudaki hızı ihmal edilebilir olduğu için çok küçüktür. Bu bileşen kuvvet ortogonal (düz) kesme için kuvvetlerin en küçüğü olduğundan dolayı, basit talaş kaldırmada, kesme kuvvetlerinin analizinde genellikle ihmal edilir.

3.8.2. Talaş Kaldırmada Gerilme Dağılımı

Normal gerilmeler ve yüksek kayma gerilmeleri, takım-talaş yüzeyinde de ilk kayma bölgesinde de ortaya çıkar. Buradaki sürtünme bölgesi veya ikinci kayma bölgesi mekanik operasyonlar ile kesici takımların aşınmasının anlaşılmasında önemli bir göstergedir.

3.8.2.1. İş Parçasında Gerilme

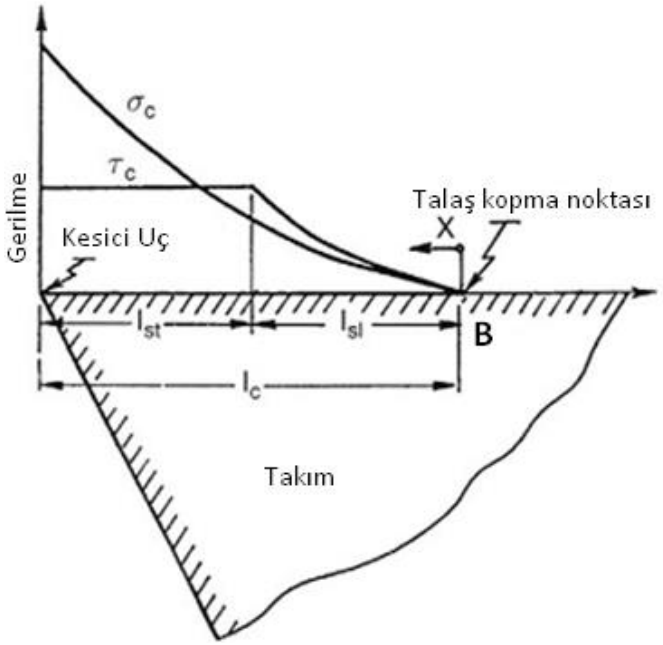
Talaş oluşması operasyonunda ana mekanizma, iş parçasının kayma düzlemine yaklaşmadan önce deformasyon sertleşmesini gerektirmesidir. Yapılan deneysel çalışmalar, iş parçasının takımın kesici ucundan belirli bir mesafe uzaklıkta, elastik olarak deforme olduğunu göstermektedir. İşlenecek malzeme takıma yaklaştığında, Şekil 3.19'da görüleceği şekilde, basma gerilmeleri, iş parçası malzemesini plastik olarak deforme etmeye başlar. Takım ucu gerisindeki gerilmeler de çekme biçiminde oluşacaktır. Takım ucundaki elastik-plastik sınır mesafesi; iş parçası özellikleri, kesme parametreleri ve takım dizayn parametreleri ile ilişkilidir. Bilhassa çekme doğrultusundaki şekil değişikliği, sertleşme oranı ve işlenen malzemenin pekleşme üssü, işlenen malzeme üzerindeki gerilmelerin büyüklüğünü değiştirerek elastik-plastik sınır yer değiştirmesine yol açar. Deformasyon sertleşmesi daha az olan malzemeler ise elastik-plastik sınırlarını, kesici takım uç noktasından uzak bir noktada oluşturacaklardır.



Şekil 3.19. İş parçasında gerilmeler [16].

3.8.2.2. Takım-Talaş Ara Yüzeyindeki Gerilme

Takım-talaş ara yüzeyinde oluşan gerilmelerin (kayma ve normal) dağılımları, takımların performans ve kesme operasyonlarını kavramada önem teşkil eder. Talaş yüzeyinde oluşan gerilmelerin üniform olmadığı, günümüze kadar yapılmış olan deneysel çalışmalar ile ortaya konmuştur.



Şekil 3.20. Kesme esnasında takım-talaş üzerindeki gerilme dağılımları [29]

İlk kez bu yaklaşım Zorev tarafından [30] yapılarak, deneysel elde edilen sonuçlar ile uyumlu bir biçimde Şekil 3.20'de görüldüğü gibi, talaş yüzeyinde oluşan gerilmelerin lineer (doğrusal) olmadığı izlenmiştir. Takım ucunda oluşan normal gerilmenin maksimum "σ_{max}" olduğu değerde ve sonrasında takım ile talaşın temasının sona erdiği noktaya kadar olan normal gerilme de azalma göstermektedir. Yapışma bölgesine bakıldığında, oluşan kayma gerilmesi önce sabit ve sonrasında takım ile talaşın ayrıldığı noktada parabolik azalma göstermektedir. Sabit temas boyu ve kayma dayanımları için yapışma uzunluklarının artırılması söz konusu olduğunda kesme kuvvetleri de bu duruma bağlı olarak artmaktadır. Bu sebeple, talaş yapışma eğiliminin diğerlerine göre daha az olduğu takım malzemesi kullanma veya soğutma sıvısı kullanılması, yapışma bölgesi boyunu azaltır, böylece kesme kuvvetleri azaltılmış olur.

3.9. Takım-Talaş Ara Yüzeyindeki Sürtünme

Talaş kaldırma operasyonu ile işlenen metal bir malzemede, kesme kuvvetleri, takımından kaynaklanan eğim düzleminin küçük bir alanı boyunca oluşur ve bu durum takım-talaş ara yüzü olarak adlandırılır. Bu nedenden dolayı, kesme kuvvetlerinin belirlenmesi, takımların aşınması teorilerinin geliştirilmesi sadece takım-talaş ara yüzünün tribolojik özelliklerinin dikkatlice, iyi bir şekilde analiz edilmesiyle mümkün olabilir [31].

Merchant analizleri, sürekli sürtünme katsayısı bulunduğu yerlerde, takım-talaş arasında kayıcı temasın var olduğunu belirtmiştir [32]. Fiziksel durumların birçoğunda ve de mühendislik yaklaşımlarında, tribolojik ara yüzdeki sürtünmenin meydana gelen etkileri bugüne kadar Coulomb sürtünme katsayısı denkleminde Eşitlik 3.28'de ki gibi ortaya konulmuştur.

$$\mu_f = \frac{F}{N} \tag{3.28}$$

Yukarıdaki ifadede, N; ara yüzdeki normal kuvvet ve de F; bu ara yüzdeki sürtünme kuvveti olarak tanımlanır. Takım-talaş ara yüzeyindeki gerilmeler hemen her noktada benzer çıkmaktadır ki bundan dolayı, $\sigma_c = N \,/\, A_c \; ve \; \tau_c = F \,/\, A_c$ biçiminde ifade edilebilir ve bu ifadelerden de;

$$\mu_f = \frac{\tau_c}{\sigma_c} \tag{3.29}$$

denkliği ortaya çıkarılır. Eşitlik 3.29'a bakıldığında, takım-talaş ara yüzünde var olan sürtünme katsayısı sabit ise, tüm temasın olduğu bölge uzunluğunda normal ve kayma gerilmelerinin oranı aynı olacaktır. Takım-talaş ara yüzünde, nispi herhangi bir hareketin var olmadığı yerde, genel durum yapışma sürtünmesidir. Yapışma sürtünmesini tanımlamak için, kayma yüklerini, kaymada oluşan yüklerinin akma gerilmesi olan k_c'ye ve meydana gelen normal gerilmeleri ise iş malzemesi akma gerilmesine σ_y eşitleyecek olursak;

$$\mu_f = \frac{k_c}{\sigma_y} = \frac{\sigma_y/\sqrt{3}}{\sigma_y} = 0.577 \tag{3.30}$$

ifadesi ortaya çıkar. Eşitlik 3.30'daki μ_f sürtünme katsayısı, sınır değeri olarak düşünülmelidir. Bu nedenle, eğer $\mu_f > 0.577$ olduğunda, ara yüzde herhangi bir nispi hareket olmayabilir.

Geçmiş yıllarda, sürtünme katsayısı ile ilgili, çokça deneysel çalışmalar ve nümerik modellemeler ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bu deneysel çalışmalarda, sürtünme katsayısını, Finnie ve Shaw; $\mu_f = 0{,}88 - 1{,}85$, Armarego ve Brown; $\mu_f = 0{,}8 - 2{,}0$, Kronenberg; $\mu_f = 0{,}77 - 1{,}46$, Zorev; $\mu_f = 0{,}6 - 1{,}8$, Usui ve Takeyama; $\mu_f = 0{,}4 - 2{,}0$ olacak şekilde elde etmişlerdir. Talaş kaldırma operasyonunun simülasyonlarında sürtünme katsayısı; Komvopoulos ve Erpenbeck; 0,0–0,5, Lin ve Lin; 0,001, Endres, DeVor ve Kappor; 0,05, 0,10, 0,25, ve 0,5, Lin, Pan ve Lo; 0,074, Olovsson, Nilson ve Simonsson; 0,1, Stenkowsky ve Moon; 0,2, Stenkowsky ve Carroll; 0,3 olarak kullanmışlardır [62]. Sonlu elemanlar metodu ile modellemede kullanılan sürtünme katsayıları, modellemede kullanılan modelin ara yüzü için uygun değer olarak kabul edilmiş, sınır değerinin altındadır. FEM ile modellenmiş operasyonların sonuçları, model için seçilmiş sürtünme katsayısının, o modellemeye özel olup olmadığına bakılmaksızın, deneysel, prototip ile üretilen, sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür.

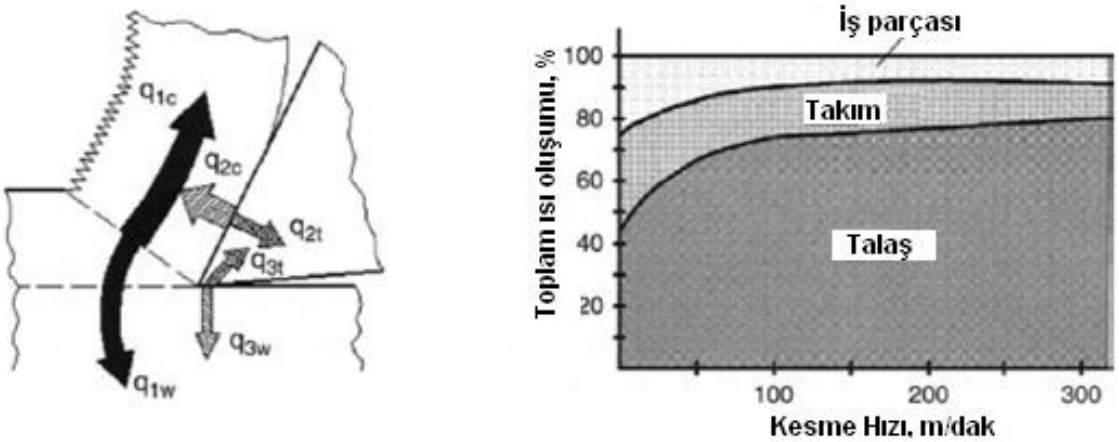
Deneysel olarak belirlenen sürtünme katsayısında meydana gelen problemi ortaya koymak için, Merchant tarafından geliştirilmiş olan kuvvet diyagramını tercih edilmektedir. Çünkü Merchant; metal kesme operasyonunda Coulomb kanununu dikkate almıştır. Merchant kuvvet diyagrama göre sürtünme katsayısı μ_f;

$$\mu_f = \frac{F}{N} = \frac{F_T + F_C.\tan\gamma}{F_C - F_T.\tan\gamma} \tag{3.31}$$

şeklinde ifade edilebilir. Eşitlik 3.31'den anlaşılacağı şekilde sürtünme katsayısı, sürtünme kuvveti ve normal kuvvet (deneysel olarak elde edilmiş) kullanılmasıyla hesaplanabilmektedir. Bu çalışma tarihte ilk kez 1927 senesinde Kronenberg tarafından bulunmuştur [61]. Üzücü ki Merchant, Kronenberg'in kitabının ilk basımını görmezden gelerek, ondan tam 20 sene sonra onun araştırmalarını iletmiştir.

3.10. Talaş Kaldırmada Isı Oluşumu

Takım-iş malzemesi ve takım-talaş ara yüzeyinde meydana gelen sürtünme ve talaş kaldırma operasyonu esnasında harcanan enerjiden kaynaklı kesici takımların üzerlerinde çeşitli sıcak dağılmaları ortaya çıkar. Ortaya çıkan sıcaklık dağılımları kesici takımlar üzerinde aşınmalara neden olacaklardır. Son zamanlarda, kesici takımların aşınmasına etki etmesinden dolayı, talaş kaldırma operasyonunda; iş malzemesi, talaş ve kesici takım arasında meydana gelen sıcaklıkların belirlenebilmesi için çok sayıda çalışma yapılmış ve halen yapılmaktadır. Talaş kaldırma operasyonlarında, kullanılan güç, kesici takımların uçlarına yakın bölgelerde, çoğunlukla ısıya dönüşecektir, oluşan ısının büyük kısmı çıkan talaşlarla birlikte dışarıya atılır. Sistemde kalan ısının, bir bölümü parça içine etki ederken, diğer kısmı ise kesici takıma etki eder ve ısınmasına neden olur. Kesme operasyonlarında, teknik ve ekonomik problemler, dolaylı olarak ya da doğrudan bu ısıdan kaynaklanır. Şekil 3.21'de talaş kaldırma operasyonunda takım-talaş ve iş malzemesinden kaynaklı ortaya çıkan ısı miktarının kesici takım, talaş ve iş malzemesine dağılımı verilmiştir.



Şekil 3.21. Kesme esnasında takım-talaş üzerindeki gerilme dağılımları [29].

Şekil 3.21'den anlaşıldığı biçimde, kesme hızının artışı ile beraber, talaşa iletilen ısı miktarı da artmaktadır. Ancak bu artış, belirli bir sürenin ardından azalmaktadır. Kesme hızının yükselmesiyle, deformasyon hızının da artacağından dolayı kesme sıcaklığı buna bağlı olarak artacaktır.

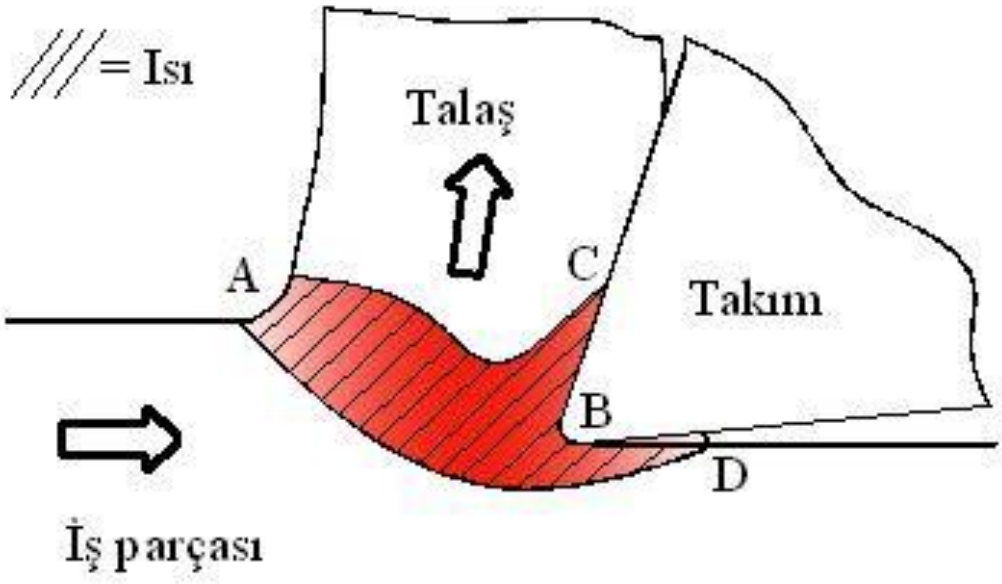
Şekil 3.21'de ilgi uyandıran başka bir konu, düşük kesme hızlarında da kesici takıma ve işlenen parçaya iletilen ısının bir miktar artmasıdır. Nedeni ise; düşük kesme hızından kaynaklı talaşın kesici takımın yüzeyinden daha yavaş bir hızla uzaklaşmasıdır. Böylece; talaşta oluşan ısının, kesici takıma ve işlenen parçaya aktarılma imkanı artmaktadır. Kesici takım ucu sıcaklığı, takımın aşınması ve de dayanımı (mukavemeti) için önemlidir, çünkü meydana gelen sıcaklık ile hangi takımların, hangi hız aralığında çalışacağı belirlenir. Fakat çoğunlukla ısı, yüksek kesme hızlarında, talaşla birlikte ortamdan uzaklaşır. Operasyonda talaş derinliği azaldığında, talaşın ısısını artırır ve bu durum yüksek hızlarda talaşların renklerinin değişmesi veya kızarması olarak görülebilir. Aktarılan enerji ve talaş temas yüzeyi azaldığından daha fazla talaş sıcaklığı oluşmasına karşın, kesici uca daha az ısı enerjisi yüklenmesi oluşur. Kesici ucun sıcaklığı, kesme hızı ile çok ilişkili olduğundan, kesme hızının, takım-talaş ara yüzey sıcaklığı üzerinde etkili olduğu ve ara yüzeylerde kesici takımın aşınma oranını artırdığı bilinmektedir [16].

3.10.1. Kesme Sıcaklığı

Talaş kaldırma operasyonundaki kesme işleminde ısı oluşması genellikle üç bölümde incelenebilir; kesici takım-işlenen parça ara yüzeyi, kesici takım-talaş ara yüzeyi ve birinci kayma bölgesi [33]. İş malzemelerinden talaş kaldırma esnasında ortaya çıkan ısının, kesici takım-talaş ara yüzeyinde meydana gelen sıcaklığın, işlenen parçanın yüzey kalitesi ve kesici takım ömründe etkisinin olduğu bilinmekte ve meydana gelen bu sıcaklığın, ölçülebilmesi için kullanılacak metotlar devamlı araştırılmaktadır [34]. İşlenen parçanın operasyonu esansında oluşan ısı, takımın performansını etkileyip, sınırlayan önemli faktörlerdendir. Bu durumdan dolayı, yüksek sıcaklıklara dayanabilen, kesici takım malzemelerinin araştırılmasına ve geliştirilmesine zemin hazırlamıştır [35].

Talaş kaldırma operasyonu sırasında meydan gelen ısı, operasyon çeşidine, operasyon parametrelerine, işlenen parçanın malzemesine ve kesici takım geometrisine göre değişiklikler gösterir. Talaş kaldırma sırasında meydana gelen ısının 10% – 40% oranında bir kısmının takıma geçtiği deneysel çalışmalarla gösterilmiştir [36] [37].

Kesici takım–talaş ara yüzeyi sıcaklığının ölçümü (deneysel olarak) 3 farklı yöntemle yapılabilmektedir; kesici takım ve iş parçasının temasından meydana gelen elektromotor kuvvetin (EMK) ölçümü, ısıl çift (thermocouple) kullanımı ve kızılötesi-termal kamera kullanımı. Kesici takım–talaş ara yüzeyinin sıcaklığının en doğru biçimde ölçülebilmesi için yığıntı talaş oluşumu istenmeyen bir durumdur [38] [39]. Bu metotlardan en yaygın kullanılan yöntem ise ısıl çift (thermocouple, termokupl) yöntemidir.



Şekil 3.22. Dik kesmede ısının meydana gelişi [16].

Şekil 3.22'de ortogonal (dik) kesme işleminde ısının ortaya çıkışı gösterilmektedir. Operasyona alınan malzeme, elastik deformasyona uğradığında, operasyon için gerekli olan sıkıştırma enerjisi, iş malzemesinde depolandığından, hiç ısı oluşmaz. Fakat işlenecek malzeme plastik olarak deformasyona uğradığında, kullanılan enerjinin çoğunluğu ısıya dönüşür. Talaş kaldırma operasyonunda, işlenen malzeme çok fazla uzamalara maruz kalır ve elastik deformasyon, toplam deformasyonun çok küçük bir kısmını oluşturur. Bundan dolayı, enerjinin bütününün ısıya dönüştüğü varsayılır.

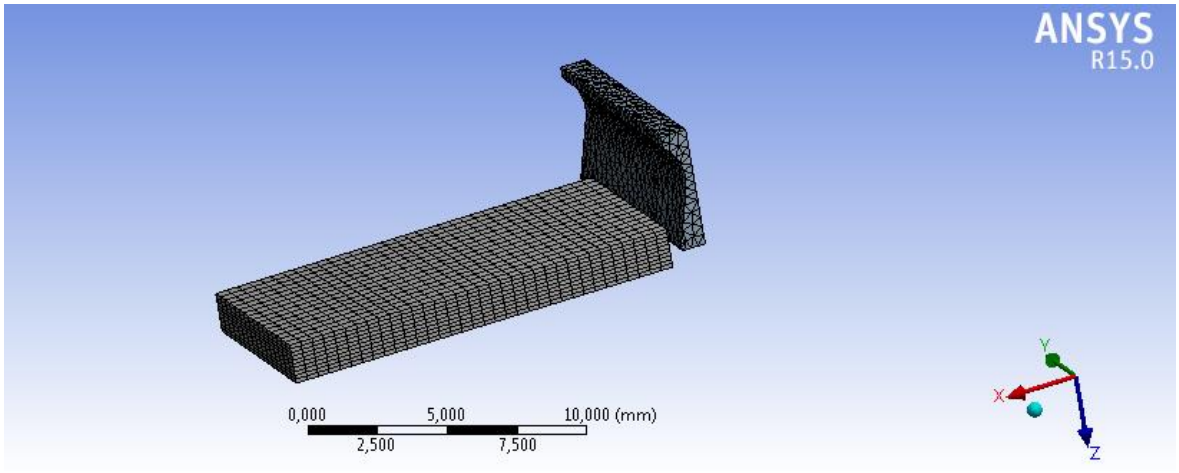
Burada enerjinin ısıya dönüşmesi ana olarak iki plastik deformasyon bölgesinde meydan gelmektedir (Şekil 3.22). Bu bölgeler; ilk deformasyon bölgesi veya kayma bölgesi, ikinci deformasyon bölgesi ve "AB" - "BC" bölgeleridir. Pek çoğu pratik koşullarda, kesici ucun yarıçapı eğer çok büyük ise, yeni iş parçasının yüzeyi ve kesici takım arasındaki sürtünme sebebiyle diğer bir üçüncü ısı bölgesi, "BD" meydana gelecektir. Fakat kesici takım aşırı aşınmış ise, bu meydan gelen ısı kaynağı çok küçük olacağından ihmal edilebilir.

4. SONLU ELEMANLAR METODU İLE ANALİZ

4.1. Giriş

Sonlu Elmanlar Metodu (FEM), karmaşık olan problemleri basit alt problemlere indirgeyerek ele alan ve bu alt problemleri de kendi içerisinde çözerek, parçadan bütüne gitme prensibi ile problemlere çözüm bulan bir metottur. Ana hatları ile sonlu elemanlar metodunda; karmaşık geometriler, sonlu elamanlar metodunun kullandığı elemanlar vasıtası ile basit alt bölgelere ayrılır, ardından her bir eleman için süreklik fonksiyonları, cebirsel polinomlar ile ifade edilir ve her bir eleman için düğüm noktalarındaki sürekli tanım fonksiyon denklemlerinin başlangıç ve sınır şartlarının değerlerinin tanımlanmasıyla, istenilen çözüm için izlenen üç ana öğe bulunmaktadır [27]. Sonlu elemanlar metodu uygulamalarında genellikle;

a) Sonuç aranan modelin (geometrinin) sonlu elemanlar ile ifade edilmesi,
b) İnterpolasyon fonksiyon denkliklerinin belirlenmesi,
c) Elemanlar için rijitlik matris sisteminin oluşturulması,
d) Sistem için rijitlik matrisinin hesaplanarak oluşturulması,
e) Çözüm aranan sisteme etkisi olan kuvvetlerin tanımlanması,
f) Sınır koşullarının ortaya konulması,
g) Sistem denklemlerinin çözümü,
olarak sıralanabilen adımlar izlenir [41].



Şekil 4.1. Bir sonlu eleman paket programında (ANSYS) modelin düğüm noktaları ve elemanlar.

1950'li yıllarda ilk olarak uzay mühendisliği alanlarında kullanılmaya başlanan sonlu elemanlar metodu (FEM) daha sonra birçok disipline yayılmıştır. İlk olarak sonlu elemanlar terimi (Finite Element) 1960 yılında Clough (Moaveni, 2003) isimli bilim adamı tarafından kullanılmıştır. Bu metodu ilk kullananlar arasında Rolls Royce, Boeing ve Bell Aerospace firmaları vardır. Sonlu elamanlar metodunun ana fikrini meydana getiren ilk çalışma, 1956 senesinde Turner ve arkadaşları tarafından kaleme alınan makaledir. Teknolojik gelişmeler ışığında, 1970'li yıllarda iyice olgunlaşan metot, günümüzde makine, elektrik, havacılık, inşaat vs. gibi pek çok değişik mühendislik disiplinleri beraberinde tıp alanında; kalp ve damar; estetik cerrahi gibi çeşitli alanlarda da kullanılmaktadır [42]. 1986 senesinde, Ledley ve Huang'ın çalışmasıyla sonlu elamanlar metodu kullanılarak gerilme analizi, diş hekimliği disiplininde kullanmıştır. Yapılan çalışmada, önce bir diş modelinin matematik modeli oluşturulmuş ve dişe farklı yönlerden kuvvetler uygulanarak, uygulanan kuvvetlerin dişi kökü ve onu destekleyen kemik dokusunda oluşan gerilmeler değerlendirilmiştir [43]. Sonlu elemanlar metodunun günümüzdeki anlamıyla diş hekimliği disiplininde kullanılması 1970'li senelerde Farah ve arkadaşların çalışması ile başlamış ve neredeyse son yirmi senedir protez ve implant tedavisinde kullanılmaktadır [44].

Sonlu elemanlar metodunda çözüm aranan problemler, çoğunlukla kısmi diferansiyel denklemler ile ifade edilebilen fiziksel problemlerdir. Bu konuya örnek verecek olursak; mukavemet problemleri için aranan çözüm, uzayda yer kaplayan cisimde meydana gelen deplasmanlardır (yer değiştirmedir). Bu konunun çözümü ise deplasmanlar ve gerilmeler arasında kurulacak kısmi diferansiyel denklemin (ikinci derece) çözülmesi ile ortaya konulabilir. Fakat oval (eğrisel) kenar/yüzey içeren bir geometriye sahip olan karmaşık problemler için gerçek çözümden ziyade yaklaşık bir çözüm elde edilecektir. Yaklaşık olarak elde edilecek bu çözümleme yöntemlerinde de genel olarak potansiyel enerji yaklaşımı kullanılmaktadır. Bu yaklaşım sisteminde; konservatif sistemler içinde yapılan işin, ilerlenen yoldan bağımsız, yalnızca yüklemelerle ile ilgili olmasından dolayı; iç kuvvetlerin potansiyel enerjisini; yüzey, kütle ve tekil kuvvetler gibi dış kuvvetlerin potansiyel enerjisi ile şekil değiştirmenin enerjisinin hepsi uygulanan kuvvetlerin yaptığı iş şeklinde değerlendirilir [27].

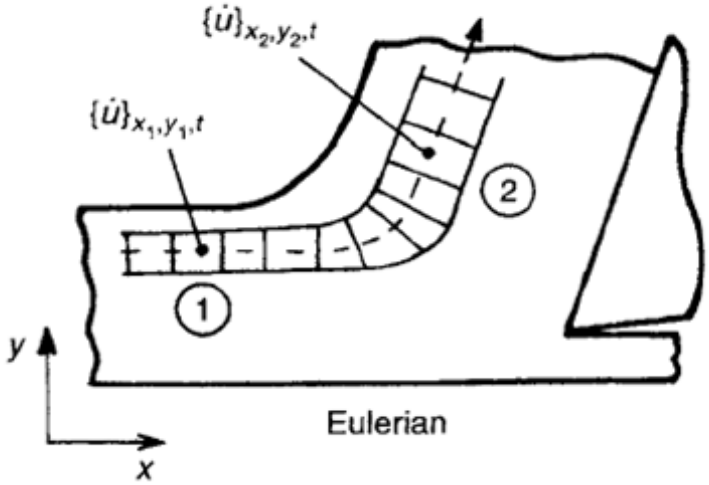
Sonlu elemanlar metodunda, sonuç istenilen alan çok sayıda birbirlerine ağlar ile bağlanmış sonlu elemanlardan meydana gelmektedir. Problem çözülürken, denge denklemleri ve sınır koşulları belirlenerek, tüm sonlu elemanlarda teoriler ile çözümler yapılır ve yaklaşık sonuçlar meydana getirilir.

Sonlu elemanlar metodunun, elastik ve sürekli ortamlarda çalıştırılması, karmaşık geometrik yapıların parçalara ayrılması, uygun interpolasyon metodunun seçilmesi ve de rijitlik matrisinin $[\mathrm{K}]$ ve yük vektörlerinin, elemanlarının eşitliklerinin birleştirilmesi ile total denge denklemlerinin elde edilmesi, bilinmeyen düğüm yerleri için çözüm metotlarının kullanılması ve sonuçların ulaşılması basamaklarını izler [45].

$$[K]\{Q\} = [F] \tag{4.1}$$

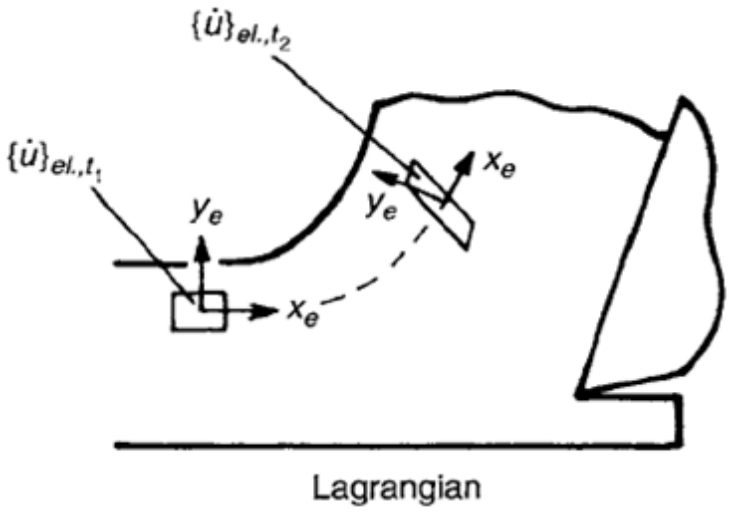
Eşitlik 4.1'de, $[K]$; global rijitlik matrisi, $\{Q\}$; deplasman vektörü, $[F]$; yük vektörü olarak tanımlanır.

Sonlu elamanlar metodunun kullanılmasında birkaç yaklaşım vardır. Bunlardan bir tanesi Eulerian yaklaşımıdır. Eulerian yaklaşımında sonlu eleman ağı (mesh) sabittir. Sonlu eleman ağı yapısında zaman içerisinde herhangi bir değişiklik olmadığından, tekrar sonlu eleman ağı üretimi gerçekleşmemektedir [46].



Şekil 4.2. Ortogonal kesme işleminin modellenmesindeki Eulerian yaklaşımı [46]

Yaklaşımlardan bir diğeri ise Lagrangian yaklaşımıdır. Lagrangian yaklaşımında sonlu eleman ağı malzeme ile birlikte değişmektedir. Bu duruma bağlı eleman ve düğüm noktası sayısında değişmeler olabilmektedir [46].



Şekil 4.3. Ortogonal kesme işleminin modellenmesindeki Lagrangian yaklaşımı [46]

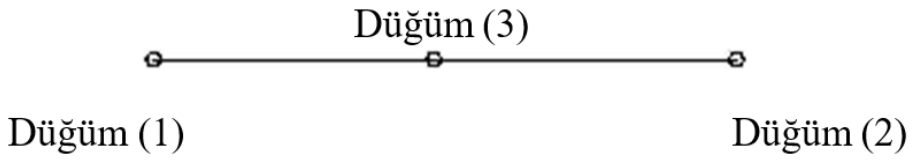
Diğer bir yaklaşım olan Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) yaklaşımına baktığımız zaman; isminden de fark edileceği üzere yukarıda bahsedilen iki yaklaşımı birleştirmektedir. Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) yaklaşımında sonlu eleman ağının iş malzemesinden bağımsız hareket etmesine müsaade edilir. Bu durum da çok fazla şekil değiştirmenin ortaya çıktığı analizler için çok fazla önem arz eden bir unsurdur. Birçok paket program Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) yaklaşımını kullanmaktadır [46].

Sonlu elemanlar metodu ile çalışan birçok ticari paket program mevcuttur. Var olan bu paket programların en çok tercih edilenlerinden bir tanesi ANSYS programıdır. ANSYS ile çözüm aranan model üzerinde analiz gerçekleştiğinde, maksimum von-Mises gerilmeleri, ortay çıkan gerilmelerin yoğunluk dağılımını, gerilmelerin meydana geldikleri yerleri ve gerinimlerin grafiksel olarak gösterimini elde etmek mümkündür.

4.2. Sonlu Elemanlar Metodunda Kullanılan Elemanlar

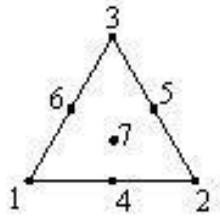
Sonlu elemanlar metodunda en doğru sonuca ulaşmak için çözüm aranan geometrinin iyi bir şekilde sonlu elemanlara ayrılması gerekir. Bu seçenek, problem ile uğraşan mühendisin elindedir. İlk olarak, sürekli ortamın boyutuna, çözüm aranan modelin geometrisine uygun olarak sonlu eleman belirlenmelidir. Seçilen sonlu elemanın boyutu bir, iki ya da üç boyut olabilir. Seçilen sonlu elemanın sınırları genellikle doğrusal olarak alınmakla birlikte, çeşitli problemlerde eğrisel sınırlı sonlu elemanlar da kullanılabilmektedir ve kullanılması gerekli olabilir [47].

Sonlu elemanlar metodu ile analiz edilecek sürekli ortamın geometrisi, yükleri ve malzemenin özellikleri ve de yer değişimleri bir bağımsız uzay koordinatı cinsinden tanımlanabiliyorsa tek boyutlu sonlu elemanlar tercih edilebilir. Bahsi geçen koordinat, elemanın ekseni boyunca ölçülür. Tek boyutlu bir sonlu eleman Şekil 4.4'de görülebilir. Sonlu elemanı diğer bir komşu sonlu elemanlara bağlayan (1 ve 2) noktalarına "dış düğüm noktaları", diğer (3) noktasına "iç nokta" denir [48].

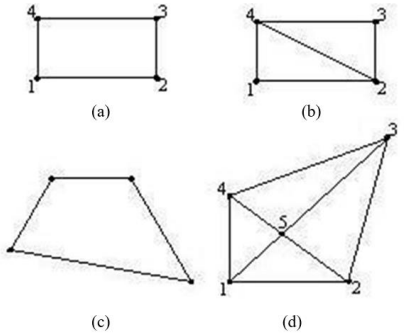


Şekil 4.4. Tek boyutlu bir sonlu eleman [48]

Katı mekaniğine ait pek çok problem, yaklaşık, "iki boyutlu sonlu elamanlar" ile çözülebilmektedir. En basit iki boyutlu elemanlardan biri üçgen elemanıdır. İki boyutlu bir üçgen elemanda Şekil 4.5'da görüldüğü şekilde (1,2,3) noktaları elemanı komşu sonlu elemanlara bağlayan, "dış düğüm noktaları", (4,5,6) noktaları "kenar noktaları", (7) noktası "iç nokta" olarak bilinir. Şekil 4.6'da da değişik şekillerdeki iki boyutlu sonlu elemanlardan; (a) dikdörtgen eleman; (b) iki üçgenli dikdörtgen eleman; (c) dörtgen eleman; (d) dört üçgenli dörtgen eleman görülmektedir [48].



Şekil 4.5. Üçgen sonlu eleman



Şekil 4.6. İki Boyutlu (a) Dikdörtgen, (b) İki Üçgenli Dikdörtgen, (c) Dörtgen, (d) Dört Üçgenli Dörtgen Sonlu Elemanlar [48]

Eksenel simetrik olan cisimlerde, kesiti üçgen veya dörtgen olabilen halka sonlu elemanlar kullanılır. Bu elemanlar için silindirik koordinatlar (r, z, θ) geçerlidir. Halka sonlu elemanlarda, değişkenlerin ve özelliklerin hiçbiri θ'ya bağlı olmadığından bu elemanlar iki boyutlu gibi değerlendirilebilir [48].

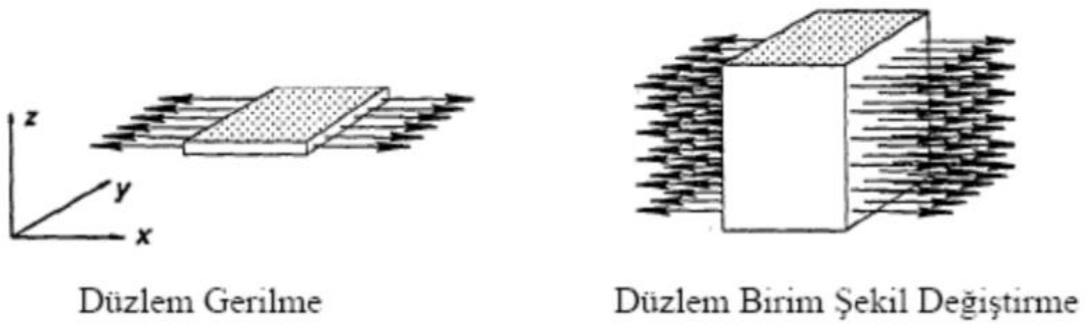
Üç boyutlu elemanlardan, üç boyutlu kiriş eleman, genel amaçlı elemandır ve üç boyutlu işlemleri yapma özelliğinedir. Bu eleman türü ayrıca uzay kiriş elemanı olarak da adlandırılır. 3D eleman uzayda iki nod ile temsil edilir. Diğer üçüncü nod ise serbestlik derecesini ve 3D elemanın uzayda koordinatlarını tanımlamak için kullanılır. 3D elemanın iki ucunu tespit eden iki noda ait 12 serbestlik derecesi vardır. Her bir nod için 3 öteleme ve 3 döndürme serbestlik derecesi vardır [49]. 3D eleman; çeşitli doğrultudan gelecek kuvvet ve herhangi bir eksenin çevresinde dönmeye karşı dirençlidir. 3D elemanı tanımlamak için nodlara ait koordinatlar, elastisite modülü (E), kayma modülü (G), kesit alanı, kesit atalet momenti, burulma sabiti (J) ve kiriş eksenine dik doğrultuda olan deformasyon faktörleri gereklidir.

4.3. Sonlu Elemanlar Metodu ile Problem Çözümü

Sonlu elemanlar metodu kullanılarak problem çözümünde, analiz edilecek geometrik modelde, en doğru sonuçları almak için model doğru sonlu elemanlara ayrılmalıdır. Sonlu elemanlara ayırma prosesinde, parçanın geometrisine ve sürekli ortamın boyutlarına en çok uyan ağ elemanı tercih edilmelidir. Sonlu elemanlar metodu ile analiz de, problemin türü ve geometrinin şekline göre bir, iki veya üç boyutlu elemanlar kullanılabilir [50].

4.3.1. İki Boyutlu (2D) Modelleme

Problemin geometrisi bir düzlemde tanımlanır ve uygulanan yüklerde aynı düzlem üzerinde olursa, problem düzlemsel (2 boyutlu/2D) olarak çözülebilir. İki boyutlu (2D) problemler iki genel durumda incelenebilir; düzlem şekil değiştirme ve düzlem gerilme. Düzlem gerilme, geometrinin düzlemdeki boyutlarına oranla çok küçük kalınlığa sahip olması durumunda geçerlidir (Şekil 4.7). Böylece, düzlem dışı koordinata bağlı olan gerilme bileşenlerinin tamamı sıfırdır. Eğer kalınlık düzlemdeki boyutlardan çok büyük ise, bu durumda düzlem şekil değiştirme hali mevcuttur. Düzlem şekil değiştirmede, düzlem dışı doğrultularda, birim şekil değiştirmelerin tümü sıfırdır.



Şekil 4.7. İki boyutlu katı geometrisi

Teoride düzlem gerilme durumunda kalınlık sıfıra, düzlem şekil değiştirme durumunda ise kalınlık sonsuza gider. Kalınlığın sonlu değerde ve neredeyse düzlemdeki boyutlar ile aynı olduğu durumda, üç boyutlu durum söz konusu olur. Bahsi geçen durum ile birlikte pratikte sadece düzlem yükleri mevcut ise, düzlem şekil değiştirme ve düzlem gerilme yaklaşımları gerçek 3D çözüme elverişlidir. Düzlem şekil değiştirme ve düzlem gerilme çözümleri genellikle benzer durum ve bazı diğer durumlarda aynı neticeyi vermektedir [51].

Elastisite teorisi ile ortaya konan ifadeler ile 2D problemler çözülebilir. Bu ifadeler, birim şekil değiştirme, yer değiştirme ve gerilme bileşenlerini birbirleri ile ilişkilendirir. Lineer elastisitede mühendislik problemlerinin incelenmesi esas alınmaktadır. Malzemeler; homojen ve izotropiktir. Meydana gelen küçük deformasyonlara izin verilmiştir. Birim şekil değiştirme ve gerilme veya deformasyon arasında lineer bir ilişki mevcuttur. Uygulanan kuvvetler ortadan kaldırıldığında, deformasyonlar da ortadan kalkar.

2D yapılarda, düzlemde incelenecek noktanın hareketini gösteren iki tane yer değiştirme bileşeni vardır. Cisim x ve y koordinat sistemine yerleştirildiği zaman x yönünde var olacak yer değiştirme bileşeni u(x,y) ve y yönünde var olacak yer değiştirme bileşeni v(x,y) şeklinde ifade edilebilir. Düzlemsel çözüm için birim şekil değiştirme bileşenleri ε_x, ε_y ve γ_{xy} olarak ifade edilebilir.

Birim yer değiştirme ve şekil değiştirme bağıntıları aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \tag{4.2}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \tag{4.3}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \tag{4.4}$$

Birim şekil değiştirmelere karşılık gelen gerilmeler ise σ_x, σ_y ve τ_{xy} olarak ifade edilebilir. Düzlem gerilmede ise σ_z, τ_{yz} ve τ_{xz} sıfıra eşittir. Düzlemdeki gerilme durumunda;

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-v^2} \begin{bmatrix} 1 & v & 0 \\ v & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-v)}{2} \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \tag{4.5}$$

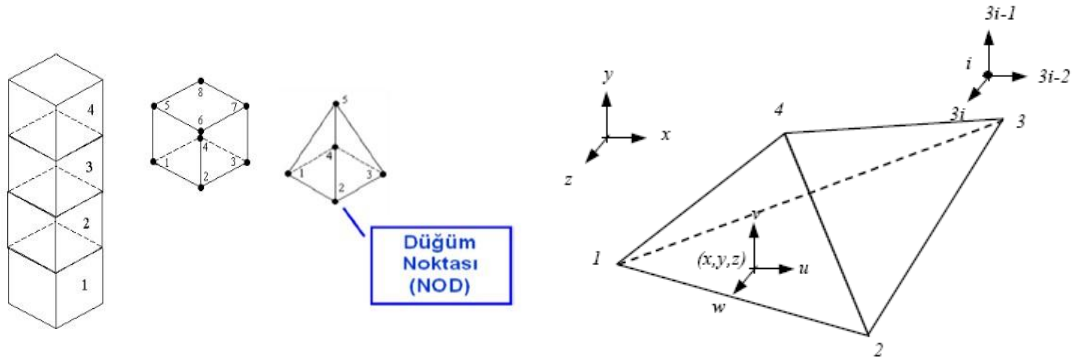
Yukarıdaki eşitlikte; σ_x ve σ_y normal gerilme bileşenlerini, τ_{xy}; kayma gerilmesini, E; elastisite modülünü, v; poisson oranını ifade etmektedir.

Düzlem şekil değiştirme halinde, birim şekil değiştirme bileşenleri ε_x, γ_{xz} ve γ_{yz} sıfıra eşittir. Gerilme bileşenleri; σ_z, τ_{xz} ve τ_{yz} sıfırdan farklı ve de σ_z bilinen bir değerde olabilir. $\sigma_z, \varepsilon_z = 0$ şartının sağlanması ile düzlemde mevcut olan bileşenlerden doğrudan hesaplanabilir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1-v)(1-2v)} \begin{bmatrix} 1-v & v & 0 \\ v & 1-v & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-2v)}{2} \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \tag{4.6}$$

4.3.2. Üç Boyutlu (3D) Modelleme

Tek ve iki boyutlu problemlere genel bakış attıktan sonra mühendislik problemlerine baktığımızda, birçok mühendislik probleminin üç boyutlu olduğunu görüyoruz. Fakat tek ve iki boyutlu olarak yapılan çözümler, yeterli doğrulukta sonuçları ürettiği için üç boyuta göre tercih sebebidir. Çözümlerinde oluşturulan matrislerin büyüklüğünün arttığı ve hesap yönteminin zorlaştığı 3D sonlu elemanlar yaklaşımı ile problem çözümünde CAD programları içinde geliştirilen paket programlar kullanılabilir. Şekil 4.8 de gösterilen elemanların çözüm algoritması ve düğüm noktalarına bağlı matrislerin hesaplanması basit, dikdörtgen ve üçgen elemana oranla çok daha zordur. Fakat üç boyutlu elemanlar ile ulaşılan sonuçlar, iki boyutlu elemanlarla elde edilen sonuçlara nazaran gerçeğe daha da yakındır.



Şekil 4.8. Sonlu elemanlar metodunda kullanılan bazı 3D elemanlar

4.4. Sonlu Elemanlar Metodu ile Analizde Malzeme Özellikleri Tayini

Çözüm aranan geometriye ait sonlu elemanlar sistemde modellendikten sonra, geometrilere ait malzemenin özelliklerinin tanımlanması gereklidir. Malzeme özelliklerin tanımlamasında, malzemenin fiziksel niceliklerinin doğru biçimde tayin edilmesi gereklidir, aksi halde analiz yanlış sonuçlar üretir. Bu çalışmamızda, talaş kaldırma operasyonu esnasında plastik şekil değişimine uğraması muhtemel geometrilerin elastik ve plastik özelliklerinin, seçilen malzeme modeli için doğru bir biçimde tayin edilmesi elzemdir. Aşağıda, broşlama analizinde kullanılacak malzeme modeli ve bu modele ait özellikler detaylı olarak verilecektir.

4.4.1. Johnson & Cook Malzeme Modeli

Johnson ve Cook isimli bilim adamları tarafından geliştirilen malzeme modeli, yüksek orandaki plastik deformasyonları, patlamaları ve de çarpışmaları modellemek için uygun yapıdadır. Literatüre baktığımızda, izotropik malzemelerin modellenmesi için en yaygın kullanılan yaklaşımlardan bir tanesi Johnson & Cook malzeme modelidir. Johnson & Cook malzeme modeli iki ve üç boyutlu sonlu eleman tipleri ile uyumludur. Johnson & Cook malzeme modeli içinde; sıcaklık değişimleri, pekleşme (hardening) ve gerinim hızının etkileri de modellenebilmektedir [51].

Broşlama operasyonunda kullanılan malzemelerimizin özelliklerini, sonlu elemanlar analizi içerisinde Johnson & Cook malzeme modeli parametrelerini kullanarak tanımladık. Bu sayede broş ve çember dişlide meydana gelen; şekil değiştirme enerjisi, plastik deformasyon miktarı ve gerilmeler hesaplanmaktadır. Johnson & Cook malzeme modeline ait matematiksel ifade Eşitlik 4.7'de (daha önce Eşitlik 3.12 de belirtilen ifadenin genel hali) görülmektedir. Johnson & Cook malzeme modelinin matematiksel ifadesine göre, akma gerilmesi üzerinde yüklenen bir malzeme üzerinde oluşan gerilmeler Eşitlik 4.7 esas alınarak hesaplanabilmektedir.

$$\sigma = [\sigma_a + b\varepsilon_p^n][1 + c\, ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon_0}}\right)]\,[1 - T^m] \tag{4.7}$$

Yukarıdaki eşitlikte; $\sigma_a\ (A)$; akma gerilmesidir ve çekme deneyinden elde edilen bu değer gerçek gerilme değerine çevrilerek kullanılır. Eşitlikte yer alan b (B) ve c (C) katsayıları ise sırasıyla; pekleşme modülü ve gerinim hızı katsayısıdır. ε_p; plastik şekil değiştirme miktarı ve n pekleşme üsteli olarak tanımlanmaktadır. $\dot{\varepsilon}$; gerinim hızı ve $\dot{\varepsilon_0}$; referans gerinim hızı şeklinde ifade edilir. Referans gerinim hızının altında olan değerler için gerinim hızı etkisi hesaba alınmaz [25]. Johnson & Cook malzeme modelinde, sıcaklık etkisini de modelleyebilmek için m katsayısı tanımlanır. Eşitlikte; $[\sigma_a + b\varepsilon_p^n]$ terimi pekleşme durumunu değerlendirerek, malzemenin elasto-plastik özelliklerini modeller. Eşitlikteki $[1 + c\, ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon_0}}\right)]$ ifadesi gerinim hızını, $[1 - T^m]$ terimi de sıcaklığın malzemenin mekanik davranışına olan etkisini modellemektedir. Broşlama operasyonuna ait sonlu elemanlar modelinde, bulunan çelik malzemenin özellikleri literatürde bulunmaktadır [52] [53]. Broş tığ ve çember dişlinin malzemesi çeliktir. Buna göre AISI 1006 ve AISI M2 HSS (yüksek hız çeliği) (DIN 1.3343) çeliklerine ait malzeme özellikleri ve Johnson & Cook malzeme modeline ait katsayılar Tablo 4.1'de verilmektedir [54].

Johnson & Cook malzemede modeli yenilme (kırılma-kopma) kriterinin asal gerilmeleri, gerinim hızını ve sıcaklığın yenilmeye olan etkilerini içerdiği model aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\varepsilon^f = \left[D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*}\right][1 + D_4 ln\dot{\varepsilon}^*][1 + D_5 T^*] \tag{4.8}$$

Eşitlik 4.8' de; D_1, D_2, D_3, D_4 ve D_5; malzeme parametrelerini, σ^*; asal gerilmelerin ortalamasının von-Mises gerilimine oranını ($\sigma^* \leq 1{,}5$), $\dot{\varepsilon}^*$; gerilme hızını (birimsiz); T^*; salt erime sıcaklığını ($\frac{T-T_R}{T_m-T_R}$; T_R; oda sıcaklığı, T_M; erime sıcaklığı) ifade etmektedir.

Bu model Eşitlik 4.9'da gösterildiği şekilde; lineer olarak kabul edilen hasar birikimli kriterlere dayanmaktadır.

$$D = \sum \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^f} \tag{4.9}$$

Eşitlik 4.9'da; $\Delta\varepsilon$; eşdeğer plastik gerinim artışını, ε^f; eşdeğer yenilme (kırılma-kopma) gerilmesi ifade eder. Yenilme D=1,0 olduğu zaman meydana gelir.

Tablo 4.1. Malzemelere ait Johnson & Cook malzeme modeli parametreleri [54]

Malzeme Özellikleri & J&C Parametreleri	Malzeme	
	1006 Çeliği	M2 HSS
A(MPa)	350	3250
B(MPa)	275	211
c	0,022	0,05
m	1,0	1,17
n	0,36	0,065
D_1	0,05	0,4
D_2	3,44	0
D_3	-2,12	0
D_4	0,002	0
D_5	0,61	0
$T_{melt}(K)$	1811	4680

4.5. Eksplisit (Explicit) (Açık) Dinamik Analiz Teorisi

Düşme, çarpışma ve parça koparma gibi analizlerin sonlu elemanlar metodunda kullanılan teorisi en genel anlamda, dinamik analiz ve bu konuda yer bulan lineer olmayan zamana bağımlı eksplisit (açık) dinamik analiz teorisine dayanmaktadır. Bu analiz, hareketin mevcudiyeti ve de zamana bağlı deformasyonların var olması sebebiyle zamana bağlı ve dinamik bir yapı meydana gelecek ve çok küçük bir zaman diliminde gerçekleşen, çok yüksek hızlardaki dinamik modellemeler için gerekli matematiksel yaklaşımları içermektedir. Eksplisit (açık) dinamik teori; zaman parametresini kullanarak enerji, kütle ve momentum korunumu denklemlerini çözer.

Lagrange yaklaşımında; ağ yapısının hareketi, malzeme yapısında kaymaları oluşturur ve bu durum kütlenin korunumunu sağlar. Eşitlik 4.8'de herhangi bir anda ki yoğunluğun, istenilen bölgenin o anki hacminden ve başlangıç anında ki kütlesinden hesaplanması ilişkisi görülmektedir [52].

$$\frac{\rho_0 V_0}{V} = \frac{m}{V} \tag{4.10}$$

Momentumun korunumunu denklemleri, ivme gerilme tensörü (σ_{ij}) ile ilişkilendirilir;

$$\rho\ddot{x} = b_x + \frac{\partial\sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial\sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial\sigma_{xz}}{\partial z} \tag{4.11a}$$

$$\rho\ddot{y} = b_y + \frac{\partial\sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial\sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial\sigma_{yz}}{\partial z} \tag{4.11b}$$

$$\rho\ddot{z} = b_z + \frac{\partial\sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial\sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial\sigma_{zz}}{\partial z} \tag{4.11c}$$

Enerji korunumu ifadesini de aşağıdaki gibi ifade edebiliriz;

$$\dot{e} = \frac{1}{\rho}(\sigma_{xx}\dot{\varepsilon}_{xx} + \sigma_{yy}\dot{\varepsilon}_{yy} + \sigma_{zz}\dot{\varepsilon}_{zz} + 2\sigma_{xy}\dot{\varepsilon}_{xy} + 2\sigma_{yz}\dot{\varepsilon}_{yz} + 2\sigma_{zx}\dot{\varepsilon}_{zx}) \tag{4.12}$$

Eksplisit (açık) dinamik analizde çözüm aşağıdaki eşitlikler kullanılarak yapılmaktadır. Nodal ivmeler kütle ile bölünen kuvvetler türetilmektedir:

$$\ddot{x}_i = \frac{F_i}{m} + b_i \tag{4.13}$$

ifadesinde; $\ddot{x}_i$; nodal ivme bileşenlerini (i=1,2,3…), F_i; her bir noda etki eden kuvveti, b_i; ivme bileşenlerini, m; noda ait kütleyi ifade etmektedir.

$$\dot{x}_i^{n+1/2} = \dot{x}_i^{n-1/2} + \ddot{x}_i^n \Delta t^n \tag{4.14a}$$

$$x_i^{n+1} = x_i^n + \dot{x}_i^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2} \tag{4.14b}$$

4.6. Eşdeğer (von-Mises) Gerilme

Sonlu Elemanlar Metodu analizi hesaplarında düğüm noktası deplasmanları belirlendikten sonra, diğer aşamada problem için aranılan sonuçlar sıralanır. Örnek olarak, gerilme analizi problemi için normal gerilmeler ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$), kayma gerilmeleri ($\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$), asal gerilmeler ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$), eşdeğer gerilme (veya von-Mises gerilmesi σ_{vM}) ile toplam deformasyon gibi.

3D durumda, birbirine dik, üç düzlemede sıfır kayma gerilmelerine karşılık, normal gerilmelerin en büyük veya en küçük değerler olduğunda; bu durumdaki normal gerilmeler, asal gerilmeler olarak da ifade edilir ve küçükten büyüğe sırası ile ($\sigma_3, \sigma_2, \sigma_1$), şeklindedir.

Gerilme analizi probleminde, seçilen malzemenin uygulanacak yüklemelere (veya gerilmelere) karşı dayanıklılığıysa, genel olarak malzemede meydana gelebilecek en büyük şekil değiştirme (çarpılma) enerjisi teorisine (von-Mises kriteri) göre denetlenir. Bu durum için, en genel ifade ile biçim değiştirme (çarpılma) enerjisi teorisi aşağıdaki gibi yazılabilir [56];

$$U_g = \frac{1}{12G}\left[\left(\sigma_x - \sigma_y\right)^2 + \left(\sigma_y - \sigma_z\right)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)\right] \quad (4.15a)$$

$$U_g = \frac{1}{12G}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (4.15b)$$

$$U_g \leq [\sigma_Y^2/(6G)] \quad (4.16)$$

$$\sigma_{VM} = \sqrt{½.[\left(\sigma_x - \sigma_y\right)^2 + \left(\sigma_y - \sigma_z\right)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)]} \quad (4.17a)$$

$$\sigma_{VM} = \sqrt{½.[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (4.17b)$$

$$\sigma_{VM} \leq \sigma_Y \quad (4.18)$$

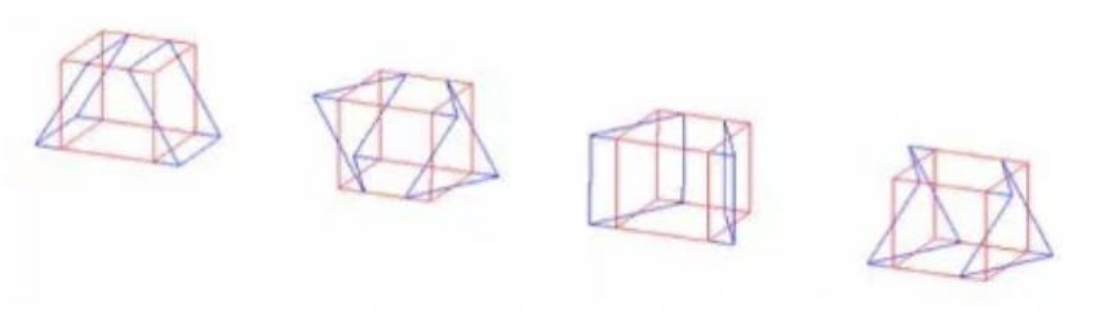
Yukarıda ifade edilen teoriye göre (Eşitlik 4.14); basit çekme deneyinden elde edilen akma gerilmesi noktasından (σ_Y), daha büyük gerilmelere maruz kalan malzemede hasar (kırılma/kopma) meydana gelir. Bu nedenle, malzemeden parça koparmak için malzemeye etkiyen von-Mises gerilmesi, malzemenin akma noktası gerilmesinden daha büyük olmalıdır ($\sigma_{VM} > \sigma_Y$).

4.7. Hourglass Modları ve Hourglass Enerji

Sonlu elemanlar metodu kullanarak; eksplisit (açık) dinamik analizi yapan paket programlar (ANSYS, LS-DYNA, RADIOSS ve ABAQUS vs.), çok zor statik problemler ile yüksek enerjili dinamik problemlerin çözümünü yaparak simüle etmek konusunda çok başarılıdırlar. Bu paket program sistemlerinde; doğru çözüm üretmenin zor yanlarından bir tanesi hızlı ve de doğru hesaplama yapan eleman türünü seçmektir. Çok yüksek bir şekil değişimi olan ekspilist (açık) dinamik analizlerin bir çoğunluğunda, hızlı ve güçlü olmasından ve de kayma kilitlenmesine (shear-locking) duyarlı olmamasından dolayı indirgenmiş integrasyon eleman çeşidi tercih edilir. Neticede, bu elemanlar genel olarak ticari eksplisit dinamik analiz programları için öngörülen elemanlardır. Tam integrasyon noktalı elemanlar, implicit (kapalı) çözücüler için daha çok kullanılmaktadır. Çünkü bu tarz elemanlarda daha az zaman adımları, daha küçük eleman deformasyonu beklenir. Kayma kilitlenmesine karşı da daha fazla eleman eşitliği mevcuttur.

Bunlar ile birlikte, elemanların integrasyon noktası sayısının azalması ile hourglass modları için daha duyarlı olacaklardır [57].

Hourglass modları, gerilme veya gerinim meydana getirmeyen, fiziksel olmayan fakat çözümün doğruluğunu etkileyebilen, sıfır enerji modlarıdır. Genel olarak; gerçekçi olmayan zorlanma, gerilme, eğilme veya temasa yol açmaktadırlar. Dört düğüm noktalı kabuk elemanlar ve sekiz düğüm noktalı üç boyutlu (hexahedral) elemanlar hourglass hatasına karşı duyarlıdır. Tetrahedral katı elemanlar ve üçgen kabuklu elemanlar hourglass hatalarından etkilenmezler. Sekiz düğüm noktalı katı bir eleman için hourglass modları, Şekil 4.9' da mavi ile gösterilmektedir.



Şekil 4.9. 8 düğüm noktalı eleman için houglass modları [57]

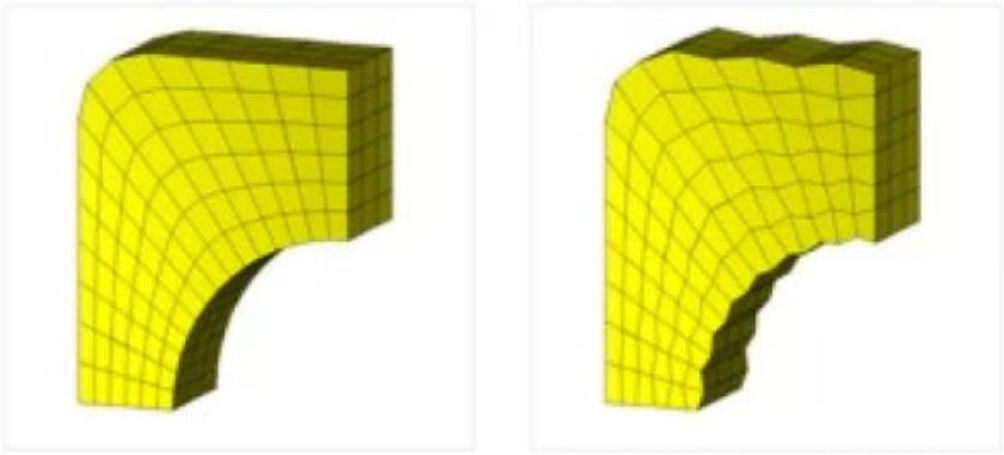
Sadece bükülmeye maruz kalan küçük malzeme parçasını temsil eden teke indirgenmiş bir eleman düşünelim;

Şekil 4.10. Saf bükülmeye maruz kalmış malzeme içerisindeki eleman

Şekil 4.10' da soldaki durum elemanın ilk hali, sağdaki durum ise deformasyona uğradıktan sonraki halini temsil etmektedir. İncelendiğinde; deformasyona uğradıktan sonra noktalı çizgiler ve bunların aralarında bulunan açı değişmemiştir. Bu koşul; elemanın tek integrasyon noktasında bulunan tüm bileşenlerinin sıfır

olduğunu söylemektedir. Eleman böyle deformasyona uğradığında gerinim enerjisi meydana getirmediğinden, bu şekildeki deformasyon modu sıfır enerji modu olarak adlandırılır. Elemanda bu moda karşı çıkacak rijitlik yoktur. Özellikle büyük boyutlu elemanların tercih edildiği modellemelerde sıfır enerji modu, ağ boyunca yayılarak anlamsız sonuçlara neden olmaktadır.

Bu modlar bazen parçada bir bölgede, deforme edilmiş bir örgü şeklinde, kum saati gibi ortaya çıkabilir. Şekil 4.11'de, solda görülen parçada hourglass yoktur, fakat sağdakinde hourglass hatası açık olarak görülebilmektedir. Deformasyona uğramış ağ üzerinde, yapılırken hourglass modlarını incelenirken, her zaman hourglass görülemeyebilir. Bundan dolayı, hourglass enerjinin kontrol edilmesi gereklidir. Hourglass enerjinin, sistemin iç enerjisinden yüksek olması durumu, o analizde hourglass hatasına dikkat edilmesi gerektiğini açıkça ifade eder.



Şekil 4.11. Sonlu elemanlar oluşturulmuş parça üzerinde hourglass görünümü [57]

Hourglass hatalarını gidermek için;

- Tam integrasyon elemanlar seçmek,
- Eleman boyutlarını daha küçük tercih etmek,
- Noktasal kuvvet veya yüzey ilişkisini yüzeye dağıtmak,
- Hourglass deformasyon modalarına yapay bir rijitlik eklemek (statik veya yarı-statik problem çözümlerinde kullanılan varsayılan yöntem),
- Yapay viskozite eklemek, (yüksek hızlı darbe ve dinamik problemlerde tercih edilir).

izlenecek yöntemler olarak sıralanabilir.

Kontrol algoritmalarının yanlış kullanımı, hourglass için problemlere yol açabilmektedir. Kontrol algoritmaları sadece hourglass için tasarlanmışsa da, dikkat edilmezse sistem enerjisini yapay olarak yok eder. Bundan dolayı, uygun hourglass kontrol algoritması ve katsayısı tercih edilmelidir. Aşırı hourglass kontrolü, çok büyük rijit bir tepki doğurabilir. Diğer bir genel kuralsa, hourglass kontrol kuvvetlerinden eklenen enerjiyi takip etmek ve toplam sistem iç enerjisinin %5'inden daha az olduğundan emin olmaktır. Yapılan birçok analiz, bu değerin aşılmasının, kritik sonuçları etkileyen sistemin iç enerjisinin, hourglass kontrol kuvvetleri marifetiyle yapay olarak, dağıttığını ortaya koymuştur.

4.8. Sonlu Elemanlar Metodunun Avantajları ve Dezavantajları

Birçok endüstri dalında (otomotiv, havacılık, savunma sanayii, imalat sanayii vb.) yeni bir ürün tasarlarken, üretimi yapılacak ürünün öncelikle prototipinin üretilerek gerekli test ve analizler yapılması gerekir. Eğer üründe, tasarım aşamasında bir takım değişiklik yapılması gerekir ise bu değişikliklerin uygulandığı yeni prototip üretilerek, gerekli test ve analizler yeniden yapılması gerekecektir. Bu durum da çok yüksek maliyet (malzeme, işçilik vs.) ve ciddi bir zaman kaybını beraberinde getirecektir. Oysaki bilgisayar destekli tasarım programları ile tasarladığınız bir ürünü sonlu eleman metodu ile istediğiniz değişiklikleri de dilediğiniz kadar yaparak, defalarca analiz edebilirsiniz. Böylece doğacak ekstra büyük maliyetler ve zaman kaybından kaçınmış olursunuz. Sonlu elemanlar metodunu kullanan bilgisayar destekli tasarım programları ile hem günlük hayatta kullanılan basit bir ürünü hem de yapısı kompleks, tasarım maliyetlerinin ve harcanan zamanların çok

yüksek olduğu otomotiv, havacılık, savunma sanayii ve imalat sanayii gibi bir çok sanayii kollarında rahatlıkla kullanılabilmektedir [58]. Bu sebeple, sonlu elemanlar metodu ile analiz pek çok avantaja sahiptir. Bu avantajlarının yanında bir takım dezavantajları da vardır. Aşağıda sonlu elemanlar metodu ile analiz yapılmasının avantajlarından ve dezavantajlarından söz edeceğim.

Sonlu elemanlar metodu analizlerinin avantajlarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz;

i. Yaklaşımlar (düşünce) konusunda esneklik sağlar (mühendislik, matematik gibi),
ii. Çözüm mühendislik veya matematiksel açıdan ayrı ayrı irdelenip, karşılaştırılabilir,
iii. Çözüm yönteminin verimliliği irdelenebilir,
iv. Sonuçların doğruya yakınlığı (hassasiyeti) kontrol edilebilir,
v. Sonlu elemanlar metodu sadece belirli durumlarda kullanılan bir yöntem değildir. Metotta; ortam geometrisinin düzensiz olması veya heterojen olması metodun kullanılmasını engellemez, üstelik farklı sınır koşulları ile de problemlerin çözümü mümkündür [59].

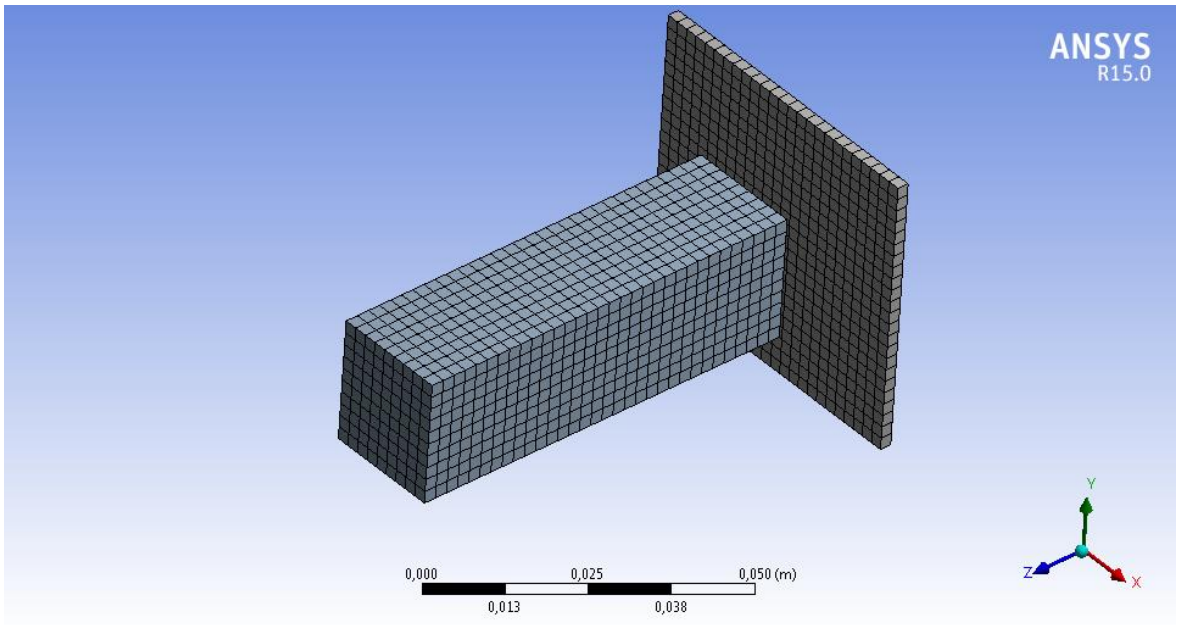
Sonlu elemanlar metodu analizlerin dezavantajlarını ise aşağıdaki gibi sıralayabiliriz;

i. Mevcut tüm nümerik analiz metotları gibi, sonlu elemanlar metodu da yüksek kapasiteli bilgisayar kullanımını zorunlu kılar ki bu durumda çok pahalı bilgisayar kullanılması, yüksek bir maliyet ortaya çıkarır ayrıca sonlu elemanlar metodu prensibi ile analiz yapan paket programlar bir hayli pahalıdır,
ii. Sonlu elemanlar metodu, analizde kullanılan teori kadar doğrudur. Analiz edilen malzemenin fiziksel olarak verileri, sonlu eleman verilerinin seçimi ve paket programa seçilen verilerinin yüklenmesi sırasında oluşabilecek hatalar sonucu etkileyecektir,
iii. Doğruya en yakın sonuçlar, seçilen sonlu elemanların daha küçük eleman boyutlu olması ile mümkündür. Seçilen elemanların daha küçük olması durumunda, kullanılan bilgisayarın büyük bir hafızaya ihtiyacını doğurur. Bu bağlamda kullanılan bilgisayar hafızalarının sınırlı oluşu, çözümlerdeki hassasiyeti azaltmaktadır [40].

5. ANALİZLER, SİMÜLASYONLAR VE DEĞERLENDİRMELER

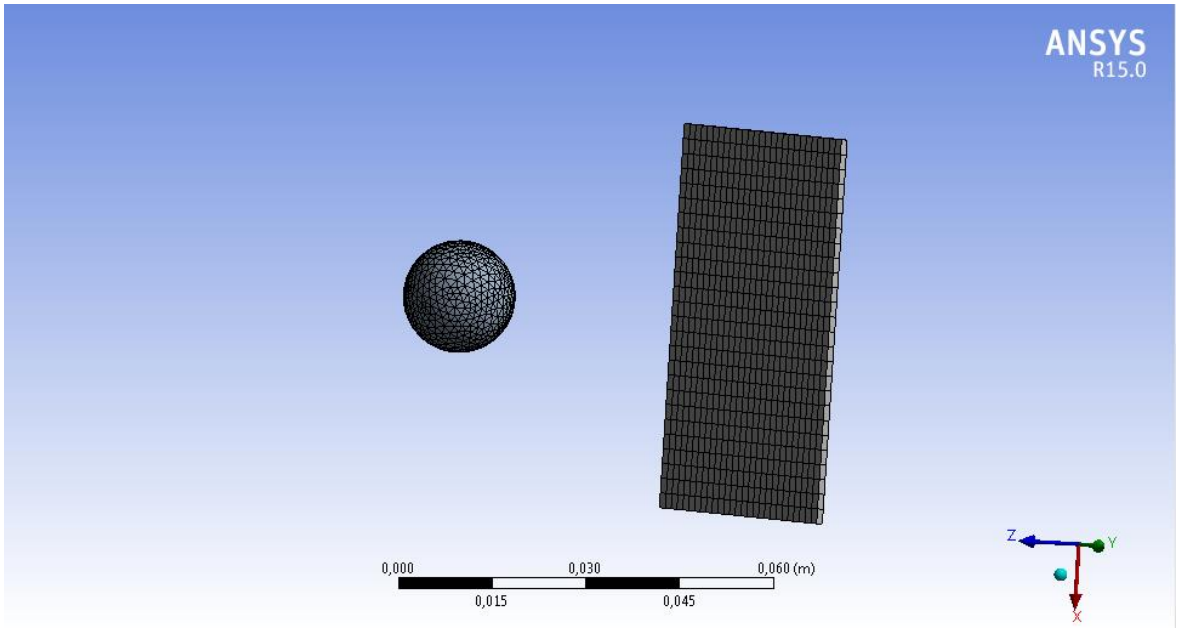
Tez çalışmam ve beraberinde yürüyen San-Tez projesinin (01042.STZ-2011-2 Broş Kesici Takımları ve Broş Tezgâhı Tasarımı ve Prototip Üretimi) temel hedeflerinden olan, dişli açma simülasyonunda karşılaşacak durumları belirleyebilmek, eksplisit (açık) dinamik teorinin ANSYS Workbench paket programı içinde çalışma prensibini kavramak, Johnson & Cook malzeme modelini inceleyerek dişli açma simülasyonunu bu model ile hatasız modelleyebilmek için dişli açma simülasyonunu basamaklara ayırarak, tek tek durumları incelip parçadan bütüne ilerlemek istendi.

Analiz çalışmalarında ilk olarak, dişli açma simülasyonunda karşılaşan durumlardan olan, hareketli bir malzemenin (plakanın) sabit bir malzemeye çarpması (dikdörtgenler prizması) sonucu meydana gelebilecek gerilme ve gerinim dağılımları analiz ederek başladı. Bu kurgu; iç broşlamada, broş tığının kesici dişlerinin ilerlemesi ile sabit malzemeye (çember dişlinin ham hali olan çember) çarpması veya dış broşlamada hareket eden diş açılacak malzemenin, sabit broşun dişlerine çarpması şekilde düşünülebilir.



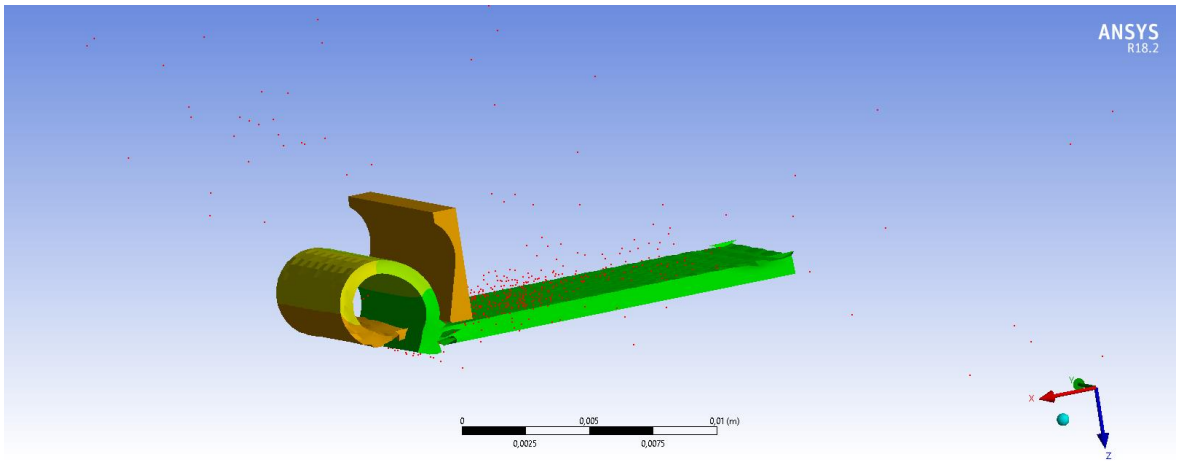
Şekil 5.1. Sabit bir alüminyum (AISI AL 6061-T6) dikdörtgenler prizmasına, hareketli levhanın çarpma analizi

Daha sonra, hareketli bir malzemenin sabit bir malzemeye çarparak, sabit malzemeden parça koparma durumunda meydana gelebilecek gerilme ve gerinim dağılımları analiz edildi. Bu analizde, kopan parçaları, çember dişli açılırken, kopan talaş parçaları şeklinde düşünmek mümkün olabilir. Bu analizler kompleks olan dişli açma simülasyonumun her bir aşamasında ne gibi durumların meydana geleceği hakkında, çalışmaya temel oluşturacaktır.



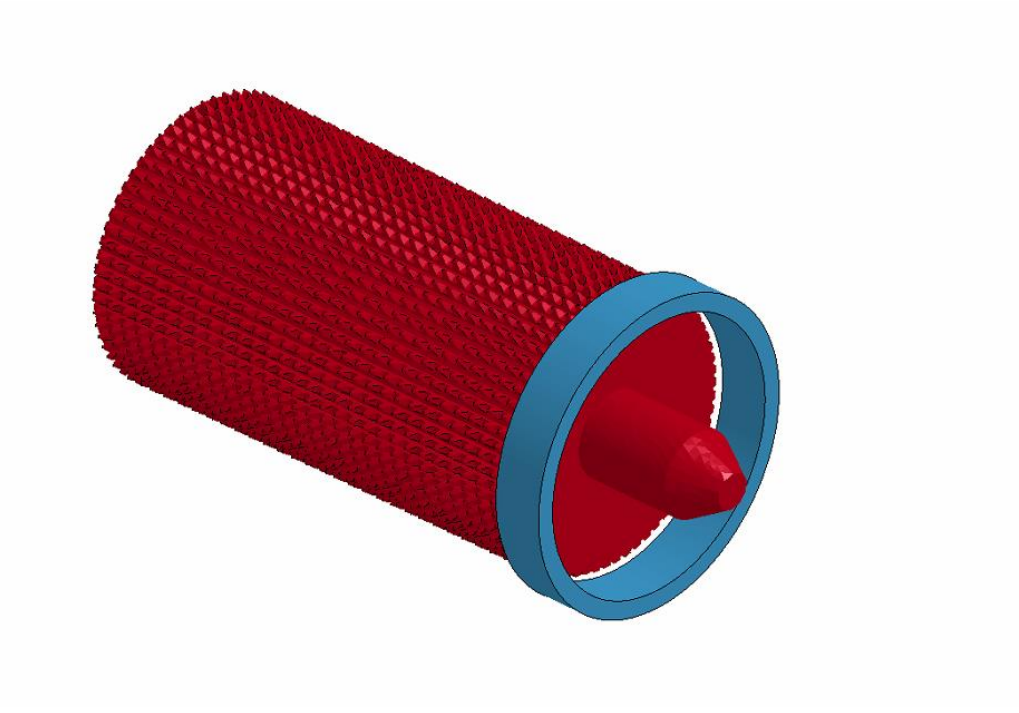
Şekil 5.2. Sabit bir alüminyum (AISI AL 6061-T6) levhaya, hareketli küre malzemenin çarpıp malzeme koparma analizi

Broşlama simülasyonu için temel adımları kurgulayarak modellemesi yapılan ve analizlerin sonucunda elde edilen simülasyon verilerini incelendikten sonra, talaş kaldırma operasyonunu tekil bir sistem üzerinden (bir kesici uç ile sabit parça yüzeyinden talaş kaldırma biçiminde) modelledi. Temel hedef olan simülasyonu yapılacak broşlama operasyonu; talaş kaldırarak şekillendirme işleminde kullanılan, talaşlı imalatta seri üretim teknolojilerinden bir tanesidir. Kurgulanan talaş kaldırma simülasyonunda meydana gelen gerilme, gerinim ve deformasyon analizleri incelenerek, broşlama ile talaş kaldırma sırasında meydana gelebilecek olası durumlar tek bir yüzeyden basitçe incelemiş oldu.

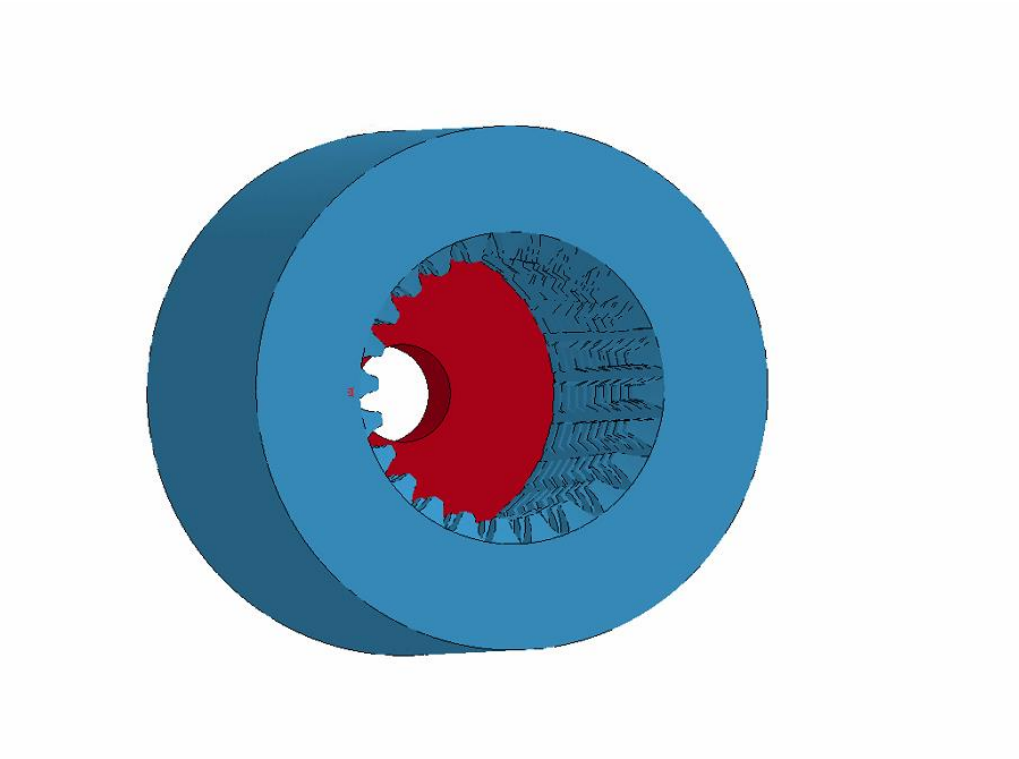


Şekil 5.3. Sabit çelik bir malzemeden (AISI 1006 STEEL), hareketli kesici bir kama ile talaş kaldırma operasyonu

Talaş kaldırma operasyonu simülasyonu ardından, broşlama operasyonunun simülasyon çalışmalarının yapması için altyapı çalışmaları (çarpışma, parça koparma ve talaş kaldırma) tamamlamış oldu. Literatür araştırmaları neticesinde, broşlama yönteminde en iyi çalışan malzeme modelini, Johnson & Cook Malzeme modelini kullanarak, ANSYS Workbench içerisinde yer alan LS-DAYNA modülüne gerekli veriler işlendi ve diğer parametreler de tanımlandıktan sonra analizleri çözdürerek, simülasyonları yapıldı. Yapılan simülasyonlarda, daha önce modelleri çıkarılarak (KISSsoft ile diş analizleri yapılarak), CAD (SolidWorks) programları ile üç boyutlu modellenen tığlar kullanıldı. Seri üretime geçmeden önce, prototip üretimi ve kullanımı çok önemli bir deneyim kazanımı doğuracağından, prototipin tasarımı aşamasında yapılan analizler ile mümkün olan tüm sorunların elimine edilmesi hedefledi. Bu doğrultuda, ilk olarak iç broşlama için dişli açma simülasyonu çalışmaları yapıldı ve operasyon sırasında meydana gelen gerilme, gerinim ve kontak kuvvetleri incelendi. Ardından dış broşlama tığı ile de dişli açma simülasyonu yapılarak, ilk analizde olduğu gibi gerilme, gerinim ve oluşan kontak kuvvetleri üretim aşamasından önce incelemiş oldu. Böylece San-Tez projesi kapsamında üretilecek olan prototip, seçilen malzemeler ve tasarlanan tığ modellerinde oluşabilecek hatalar analiz sonuçları ile sınanarak, yüksek ek maliyet ve aşırı zaman kaybı meydana gelmeden tasarım aşamasında halledilmiş oldu.



Şekil 5.4. İç broşlama operasyonunun LS-DYNA ile modellenmesi

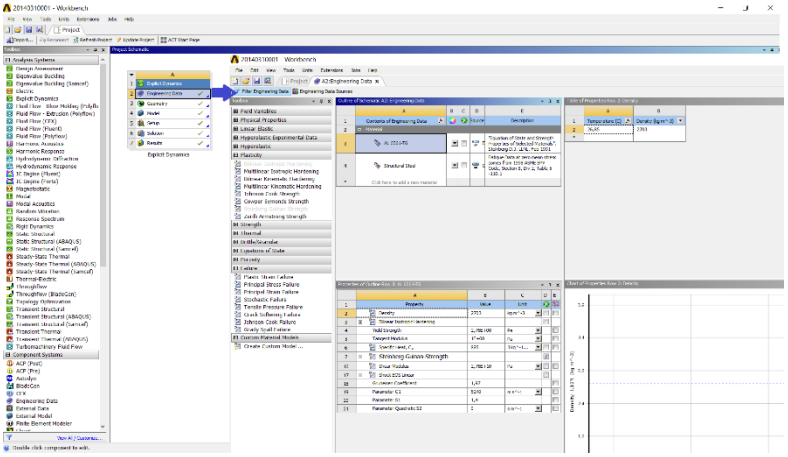


Şekil 5.5. Dış broşlama operasyonunun LS-DYNA ile modellenmesi

5.1. Temas – Çarpışma Analizi ve Simülasyonu

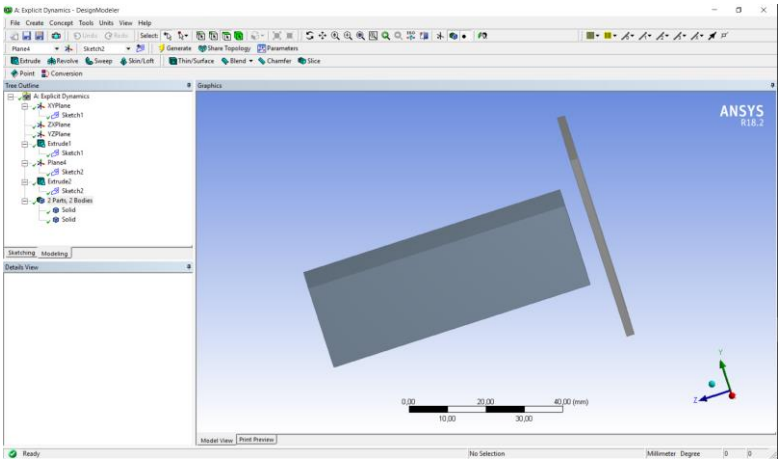
Kurgulanan ilk analizde; hareketli çelik bir plakanın belirli bir hızla, bir yüzeyinden sabitlenmiş, diğer yüzeyinden serbest hareket edebilen (AISI AL 6061-T6) şaft ile çarpması modellendi.

İlk olarak ANSYS Workbench modülünde, Analiz Sistemleri (Analysis Systems) menüsü içinden Ekspilisit (Açık) Dinamik (Explicit Dynamics) analizi kurgulamak üzere çalıştırıldı. Ardından kullanılacak malzemeler, malzeme kütüphanesinden seçilerek analize başlandı.



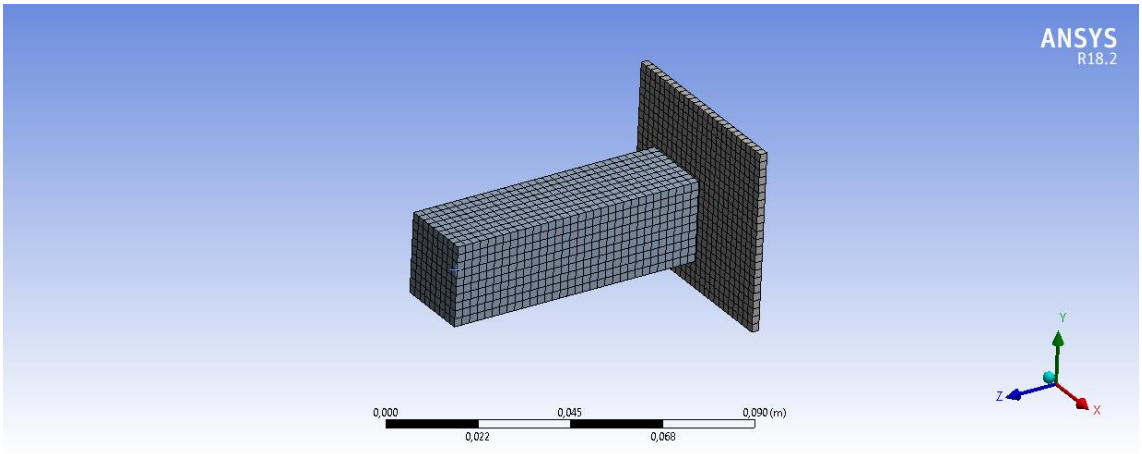
Şekil 5.6. ANSYS Workbench paket programı içinde malzeme seçilmesi

Kurgulanan analiz için ANSYS Workbench modülü içinde geometriler oluşturdu.



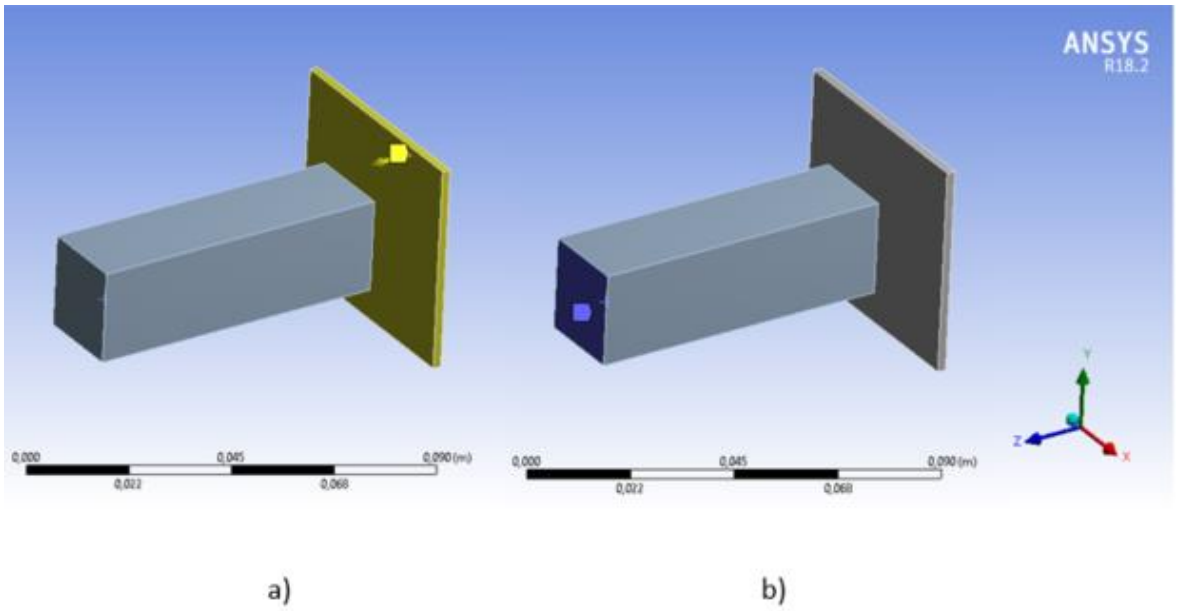
Şekil 5.7. ANSYS Workbench paket programı içinde geometrilerin oluşturulması

Ardından, malzeme kütüphanesinden seçilen malzemeleri (AISI AL 6061-T6) “Model” menüsü içinden, hareketli levhanın ve meydana gelecek deformasyonlarını izlemek istediğimiz şaftın (AISI AL 6061-T6) malzeme özellikleri tek tek tanımladı. Diğer aşamada ise iki malzemenin birbiri ile olan teması “Connections” menüsü içerisinden tanımladı. Sonlu elemanlar analizinin en önemli parçalarından olan ve çözüm istenen geometrilerde sonlu elemanlar metodu ile elemanlar oluşturma işlemini, geometrilerin temasının tanımlanmasının ardından “Mesh” menüsü içerisinden, geometriler seçerek gerçekleştirdi.



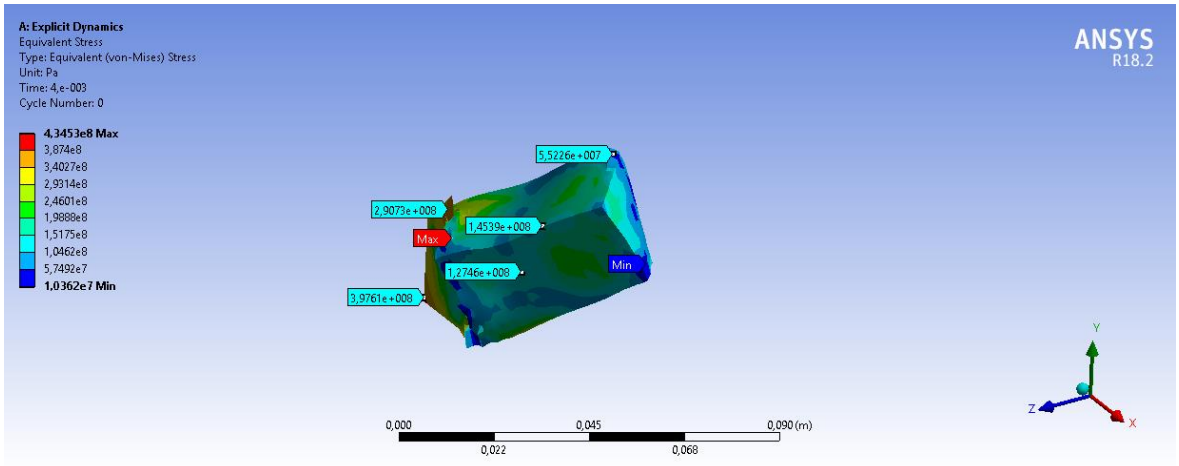
Şekil 5.8. ANSYS Workbench paket programı içerisinde sonlu elemanlar (Mesh) oluşturulmuş yüzeyler

Böylelikle, değişimlerin gözlemleyeceği sabitlenmiş şaft üzerinde 3455 adet eleman ve 4878 düğüm noktası olan sonlu elemanlar oluşturmuş oldu. Diğer bir aşamada, “Eksplisit Dinamik (Explicit Dynamics)” menüsü altından, analiz ayarlarını (birim sistemleri, zaman vs.), hareketli parçanın hızı, tüm geometrilerde sabit ve serbest olan yüzeyler ve alanlar tanımladı. Ardından “Çözüm (Solution)” menüsü altından çözümü istenilen nicelikler tanımlanarak, analiz başlatıldı.



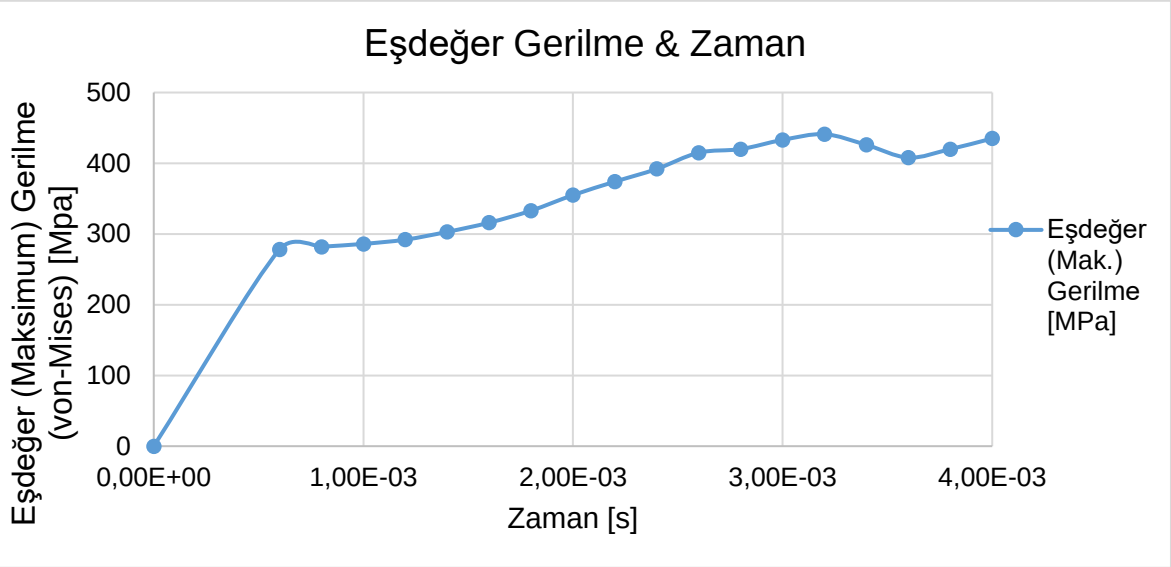
Şekil 5.9. ANSYS Workbench paket programı içerisinde tanımlanmış hız ve sabit yüzeylerin gösterimi

Kurgulanan analiz, belirli bir süre (4E-3s) devam etti ve meydana gelen maksimum eşdeğer von-Mises gerilmesi oluşumları ve maksimum eşdeğer gerinimleri gözlemledik. Sabit alüminyum şaft üzerinde meydana gelen gerilme oluşumları aşağıdaki gibi meydana gelmiştir.



Şekil 5.10. Alüminyum şaft üzerinde meydana gelen gerilmelerin dağılımı

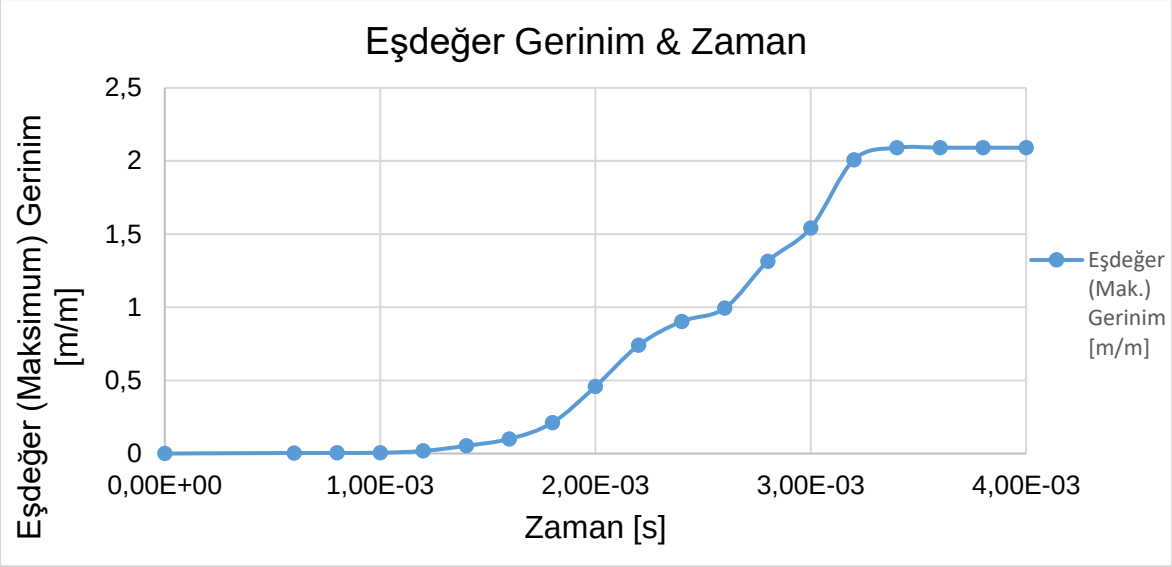
Analiz sonucunda, alüminyum plakada sabitlenen yüzeyde daha yüksek gerilmelerin oluştuğu gözlemlendi. Aşağıdaki Şekil 5.11'de zamana bağlı eşdeğer gerilme dağılımını görebiliriz.



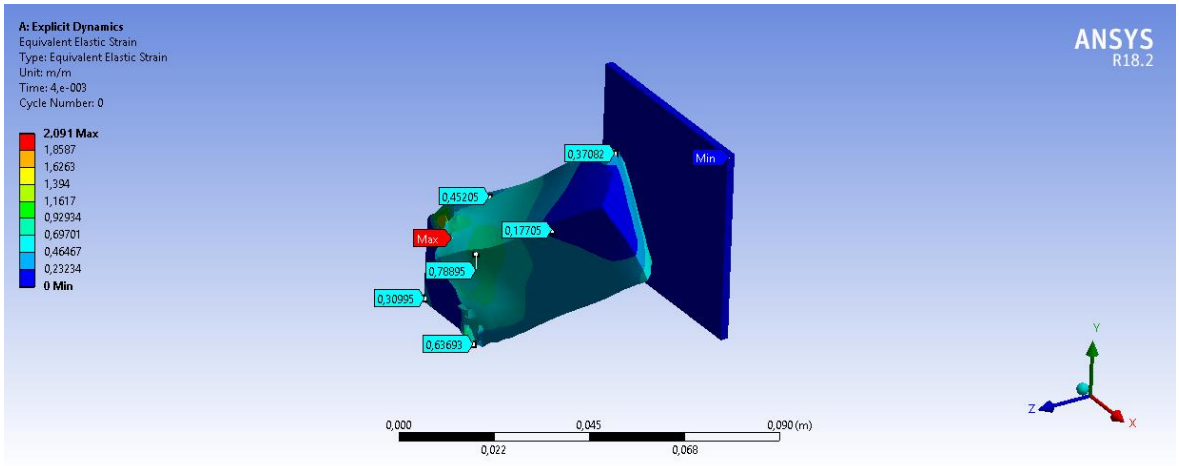
Şekil 5.11. Şaftın (AISI AL 6061-T6) üzerinde meydana gelen maksimum eşdeğer gerilmenin (von-Mises) zamana bağlı değişimi

Şaftın sabitlenmiş yüzeyindeki gerilme 435MPa seviyesine ulaştığını gözlemleniyor. Bu noktada malzemenin maksimum akma gerilme değeri aşılmıştır (AISI AL 6061-T6 24°C $Sy = 276\ \mathrm{MPA}$). Sabit plakada oluşturulan sonlu elemanlar simetrik olmadığı için burkulmanın da meydana geldiği gözlemlenmiştir

Kurgulanan bu analizde, diğer bir önemli olan parametre ise; malzemede oluşan eşdeğer gerinim değerleri incelediğinde ise aşağıdaki verilere ulaşıyor.



Şekil 5.12. Şaftın (AISI AL 6061-T6) üzerinde meydana gelen maksimum eşdeğer gerinimin zamana bağlı değişimi



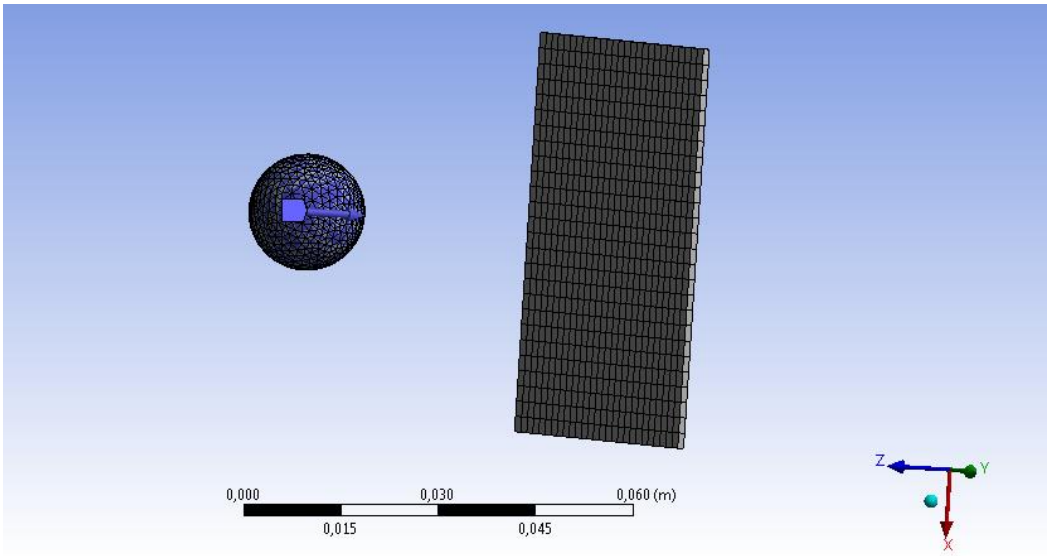
Şekil 5.13. Alüminyum şaft üzerinde meydana gelen eşdeğer gerinimlerin dağılımı

Sonuç olarak kurgulanan bu analizde, modelde meydana gelen maksimum eşdeğer gerilme ve maksimum eşdeğer gerinimlerin nerelerde daha yoğun oluşabileceği ve hangi boyutta sorun yaratabileceği, Eksplisit Dinamik modelin ANSYS Workbench modülü içinde çalışma prensipleri ve verilerin elde edilmesi ortaya konmuş ve kavramış oldu.

5.2. Parça Koparma Analizi ve Simülasyonu

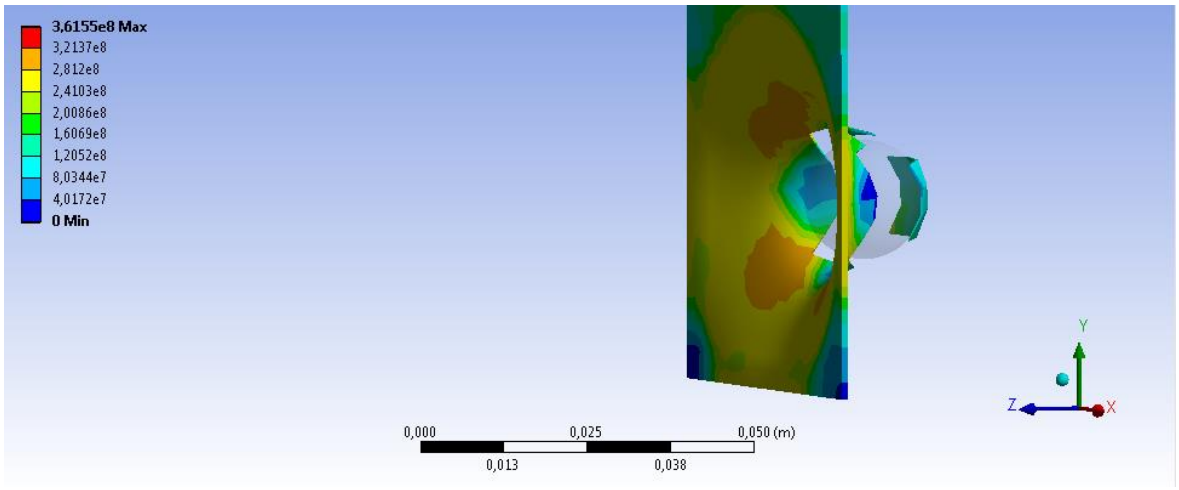
Broşlama simülasyonunu kavramak için modellenen bu ikinci analiz, ana hedefe temel oluşturacaktır. Analizde; talaş kaldırma operasyonun basit bir versiyonu biçiminde düşünerek, hareketli bir kürenin, sabit bir plakadan parça koparması inceledi. Kurguda, hareketli çelik küre sabit bir hız ile, kenarlarından sabitlenmiş alüminyum (AISI AL 6061-T6) plakaya çarpıp, plakadan parça koparması durumu analiz edildi.

Bir önceki kurguda modellendiği şekilde, analiz ayarlarında yapılan tüm ayarlamaları bu analiz için de aynı sırada tek tek uyguladı.



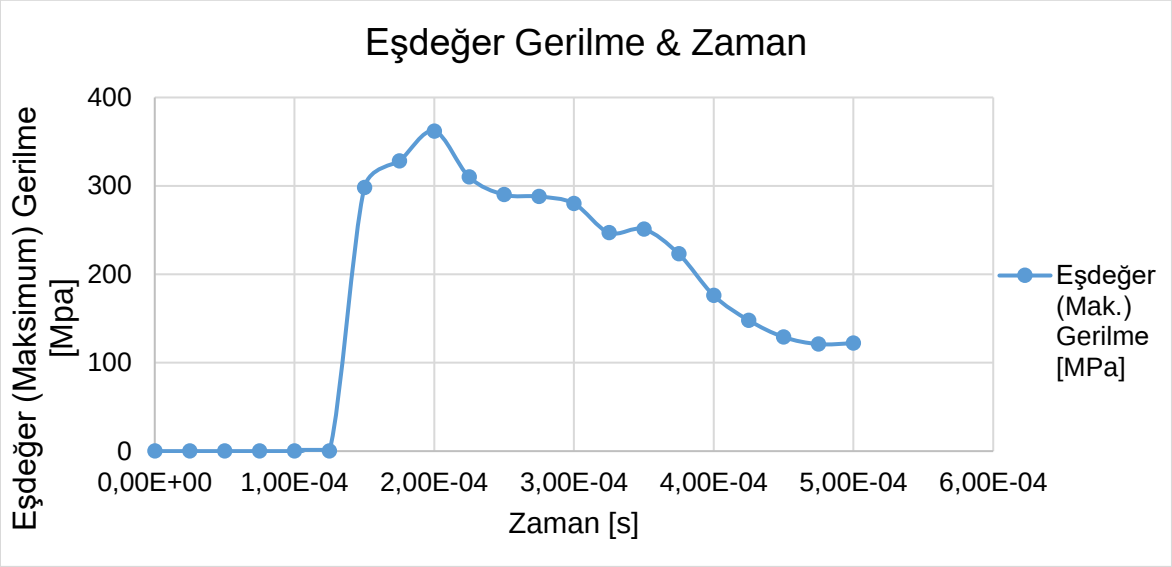
Şekil 5.14. Alüminyum (AISI AL 6061-T6) levha ve çelik küre malzeme üzerinde oluşturulmuş sonlu elemanlar (Mesh)

Değişimlerin gözleneceği, sabit alüminyum (AISI AL 6061-T6) plakanın üzerinde 8061 adet eleman ve 3109 düğüm noktasından oluşan sonlu elemanlar oluşturuldu. Kurgulanan bu analiz, belirli bir süre (5E-4s) devam etti ve meydana gelen maksimum eşdeğer von-Mises gerilme oluşumları ve maksimum eşdeğer gerinimleri gözlemledi. Alüminyum (AISI AL 6061-T6) plaka üzerinde meydana gelen gerinimler aşağıdaki gibidir;



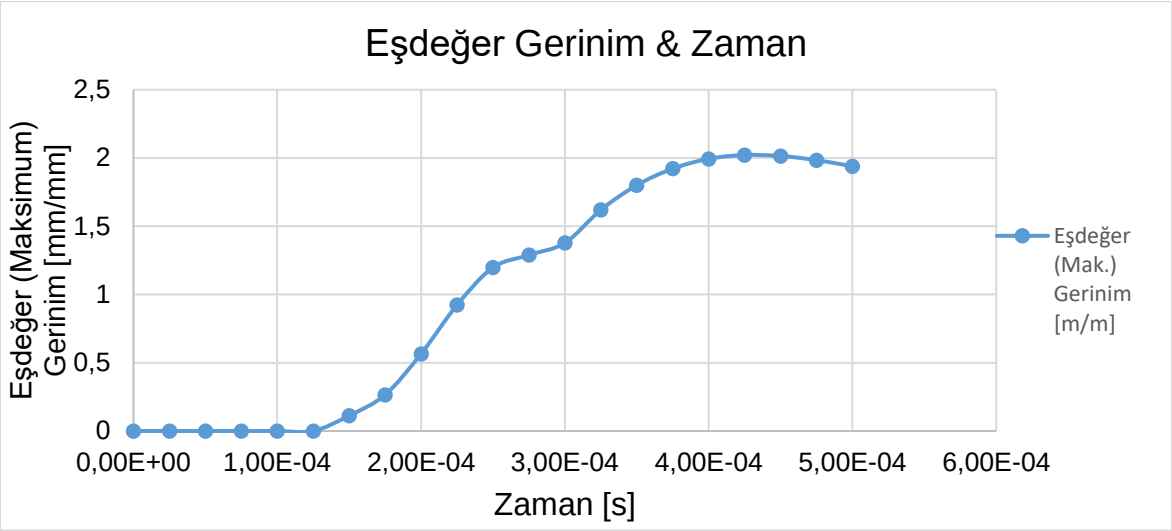
Şekil 5.15. Alüminyum (AISI AL 6061-T6) plaka üzerinde meydana gelen eşdeğer von-Mises gerilmeler

Analiz sonucunda, alüminyum (AISI AL 6061-T6) plakada meydana gelen zamana bağlı maksimum eşdeğer von-Mises gerilme dağılımı Şekil 5.16'dan incelenebilmektedir.



Şekil 5.16. Alüminyum plakada meydana gelen (AISI AL 6061-T6) maksimum eşdeğer (von-Mises) gerilmenin zamana bağlı değişimi

Elde ettiğim veriler değerlendirildiğinde; sabitlenmiş plakadan (AISI AL 6061-T6) parçanın koptuğu andaki gerilme değeri 310MPa'dır. Bu da malzememizin 24°C deki çekme direncine denk gelmektedir. Kurgulanan analizde, alüminyum (AISI AL 6061-T6) plakada meydana gelen maksimum eşdeğer gerinimin zamana bağlı değişimi aşağıdaki (Şekil 5.17) gibidir.



Şekil 5.17. Alüminyum plakada (AISI AL 6061-T6) meydana gelen maksimum eşdeğer gerinimin zamana bağlı değişimi

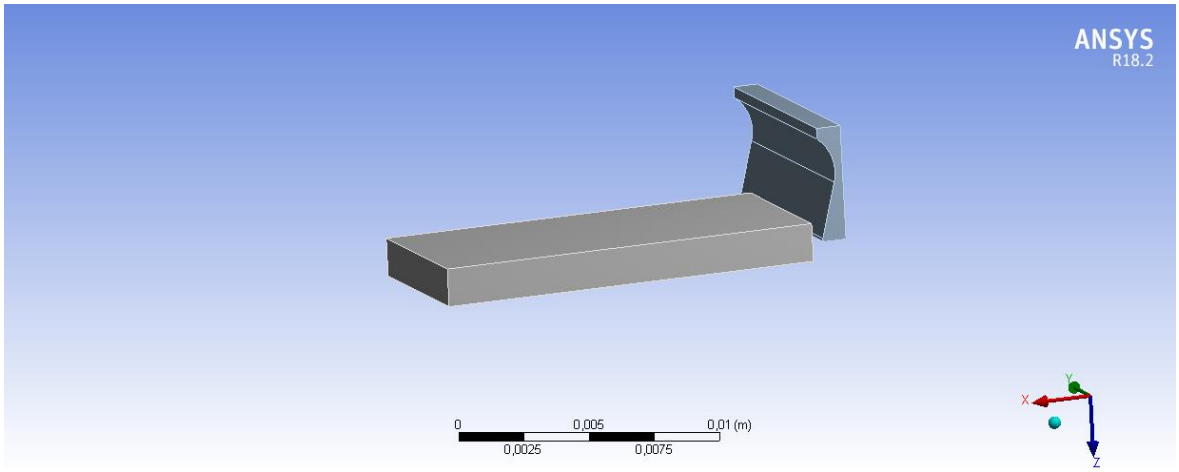
Kurgulanan analizde; gerinim değerinin 0,923 m/m ulaştığı anda parça kopmasının gerçekleştiği görülmektedir. Bu analiz ile talaş kaldırmak için kurgulanan ana modellemeye temel oluşturuldu. Analizleri yapılan modellemeler ile, çarpma ve parça koparma durumlarını ayrı ayrı incelenerek, talaş kaldırma operasyonu ve broşlama operasyonunun temel çalışma prensiplerini ve ANSYS paket programı içinde çalışma ilkeleri kavranmış oldu.

Birçok fiziksel durumu içinde barındıran talaş kaldırma ve broşlama operasyonları öncesinde, tek tek analizlerin nasıl sonuçlar verdiği irdeledi. Ana hedef olan dişli açma simülasyonu analizlerine başlamadan önce yapılan bu analizler, kullanılan modellerin ANSYS paket programı içerisinde çalışma ilkelerinin ve uygulanmasının kavranması adına önemli birer başlangıç oldular.

5.3. Talaş Kaldırma Analizi ve Simülasyonu

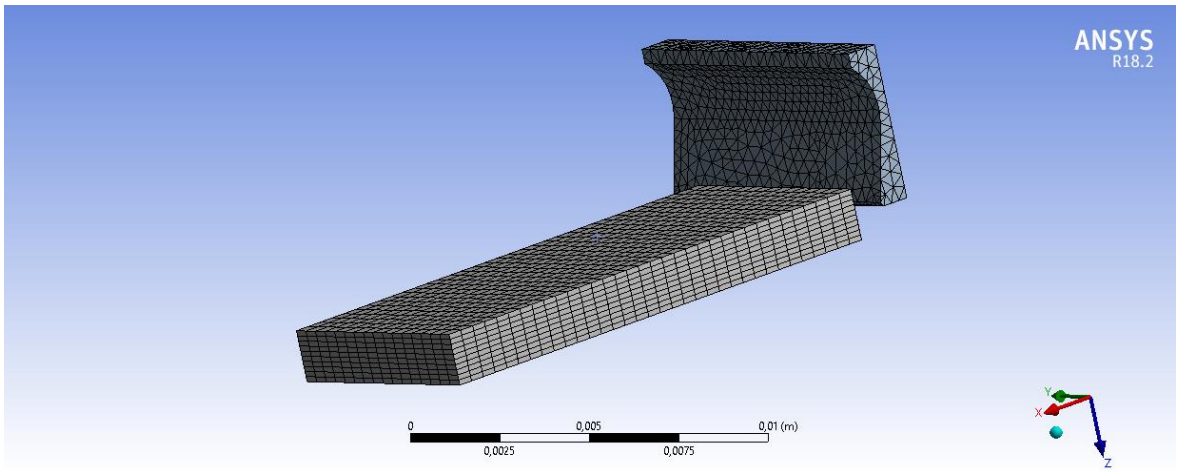
Temel hedef olan, simülasyonu yapılacak “Broşlama Operasyonu” daha öncede tanımlandığı şekilde; talaş kaldırarak şekillendirmede kullanılan, talaşlı imalatta seri üretim teknolojilerinden bir tanesidir. Bu kurguda; talaş kaldırma simülasyonu yapılarak broşlama simülasyonuna bir adım daha yaklaşmış olacak. Talaş kaldırma operasyonunu ANSYS Workbench modülü içerisinde kurgulanarak, analizi ve simülasyonu gerçekleştirildi. Analiz sonucunda meydana gelen gerilme, gerinim ve doğrusal deformasyonlar inceledi.

Analizi diğer analizlerde de olduğu gibi ANSYS paket programında kurgulandı. Talaş kalkacak parça için broşlama analizinde de kullanılacak çember dişliye ait çelik (AISI 1006 STEEL) seçilerek başlandı. Daha sonra kurgulanan analiz için CAD programında oluşturulan geometrik model ANSYS Workbench içerisine aktarıldı.



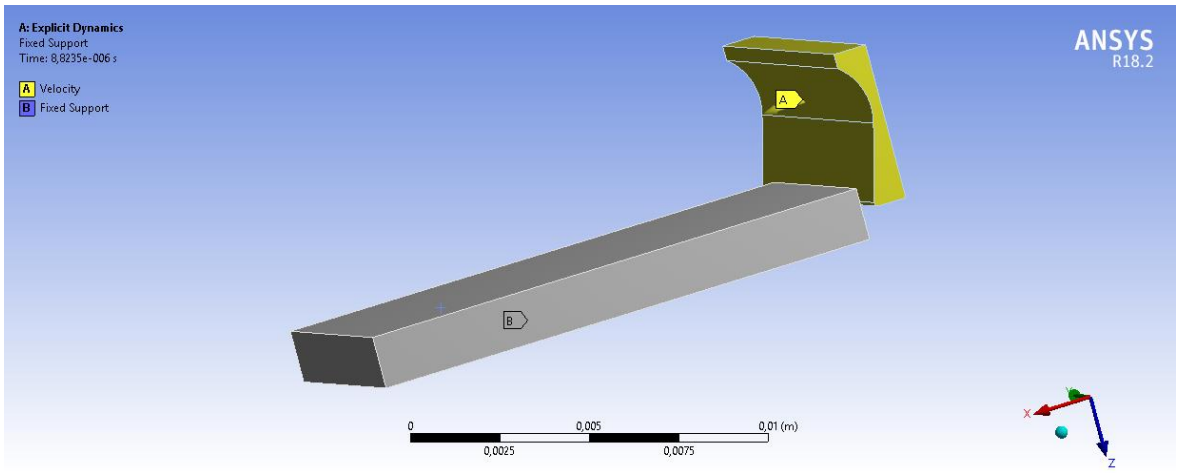
Şekil 5.18. Talaş kaldırma operasyonunun ANSYS Workbench içindeki kurgusu

Talaş kaldıracak bıçak ve talaş kaldırılacak çelik arasında ki bağlantı (Body Interaction) tanımladıktan sonra, geometriler üzerinde “Mesh” menüsü altında sonlu elemanları oluşturuldu. Talaş kalkacak malzeme üzerinde toplam 9580 adet sonlu eleman ve 7732 düğüm noktasından meydana getirildi.



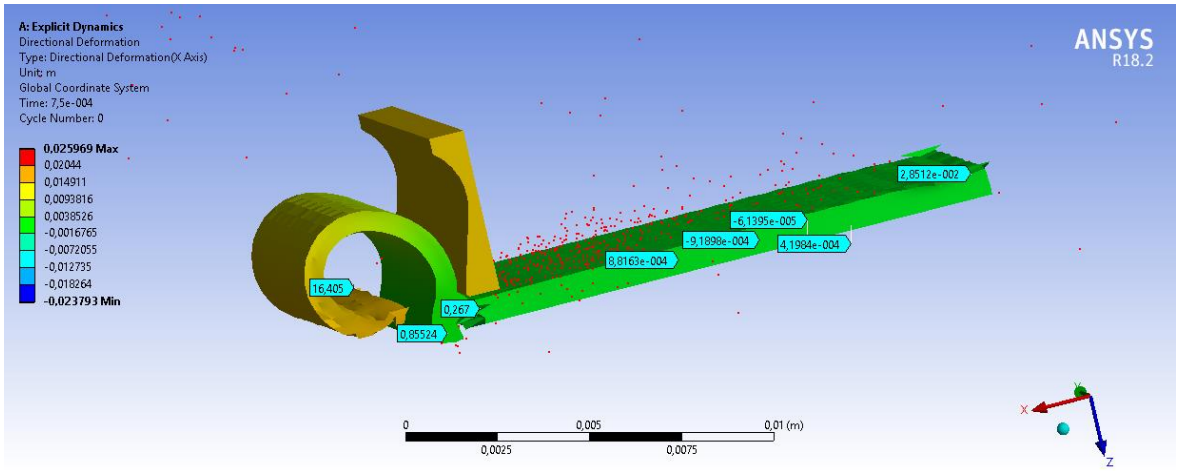
Şekil 5.19. Sabit plaka ve kesici bıçak üzerinde oluşturulmuş sonlu elemanlar

Sonlu elemanların tayininden sonra, hareket edecek kesici bıçağın hızı ve talaş kaldırılacak malzememizin pozisyonu (taban yüzeyi sabitliği) ayarlandı, analizi belirli bir süre (0,75E-3s) devam etti. Analiz ile X – ekseni (bıçağın hareket yönü) boyunca meydana gelen doğrusal deformasyonlar, maksimum eşdeğer (von-Mises) gerilme ve maksimum eşdeğer plastik gerinim değerlerinin zamana bağlı değişimleri irdelendi.



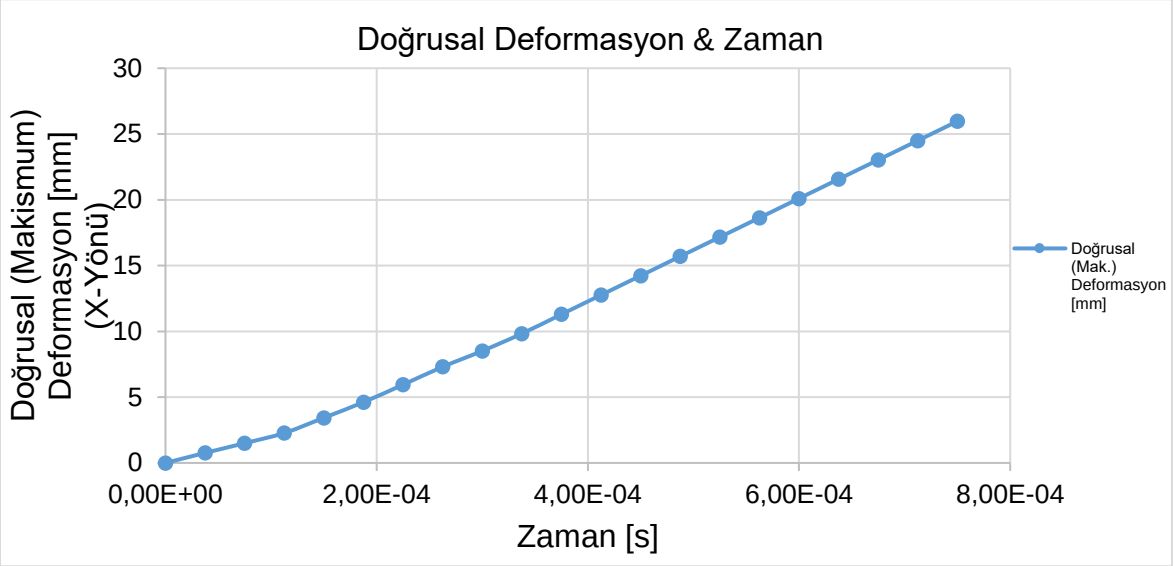
Şekil 5.20. Talaş kaldırma operasyonu modeli üzerinde tanımlanan durumlar

Analiz başlatılıp, çözümlere ulaştıktan sonra, ilk olarak X – Ekseni boyunca meydana gelen doğrusal deformasyonun zamana bağlı değişimi incelendi.



Şekil 5.21. Talaş kaldırılan parçada (AISI 1006 STEEL) X – Ekseni boyunca meydana gelen doğrusal deformasyonlar

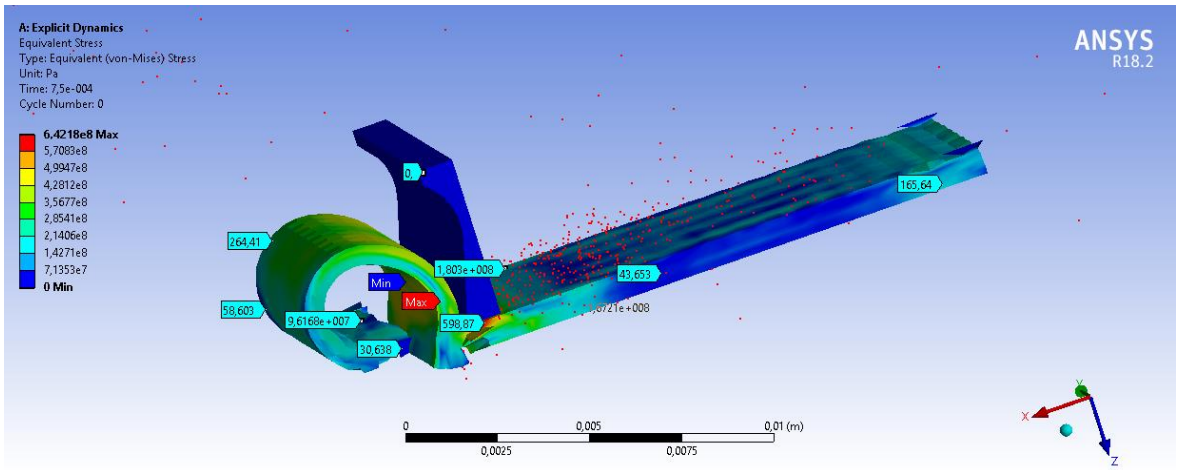
X – Ekseni boyunca meydana gelen doğrusal deformasyonların zamana bağlı değişimini Şekil 5.22'de görülmektedir.



Şekil 5.22. Talaş kaldırılan parçada (AISI 1006 STEEL) X – Ekseni boyunca meydana gelen doğrusal deformasyonların zamana bağlı değişimi

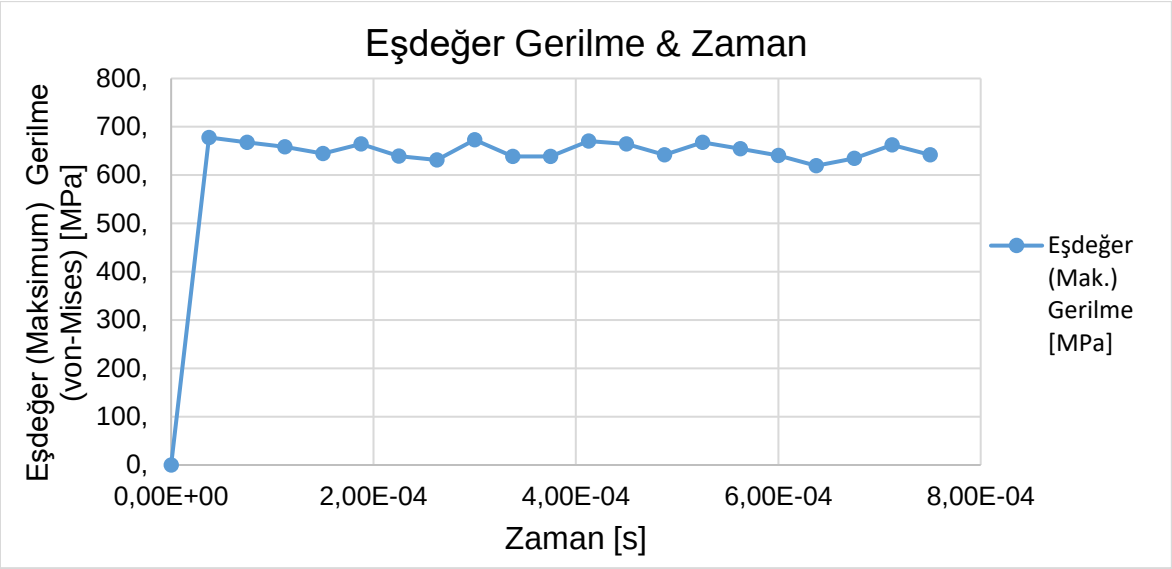
Kesici bıçağın hareket yönünde (X - Ekseni) meydana gelen deformasyonların zamana bağlı olarak lineer bir davranış gösterdiği Şekil 5.22'de görülmektedir. Bıçağın sabit $(20\,m/dk)$ hızla ilerlemesi ve talaş kaldırma sırasında meydana gelen sıcaklık değişimlerinin malzemenin mekanik özelliklerine önemli ölçüde etki eden değişikliklere neden olmadığı gözlemlendi. Teorik olarak kopma anındaki uzama oranının (30%) analizde de teorik olarak yakalandığını görülüyor.

İkinci olarak talaş kaldırılan malzeme üzerinde oluşan, maksimum eşdeğer gerilmenin (von-Mises) zamana bağlı değişimleri inceledi. Meydana gelen gerilmelere ait bazı kritik noktalar ve maksimum gerilmenin oluştuğu nokta belirledi. Bu değerler ve noktalar, sağlıklı bir operasyonda oluşabilecek kritik durumları ortaya koymaktadır.



Şekil 5.23. Talaş kaldırılan parça (AISI 1006 STEEL) üzerinde meydana gelen eşdeğer gerilmelerin (von-Mises) dağılımı

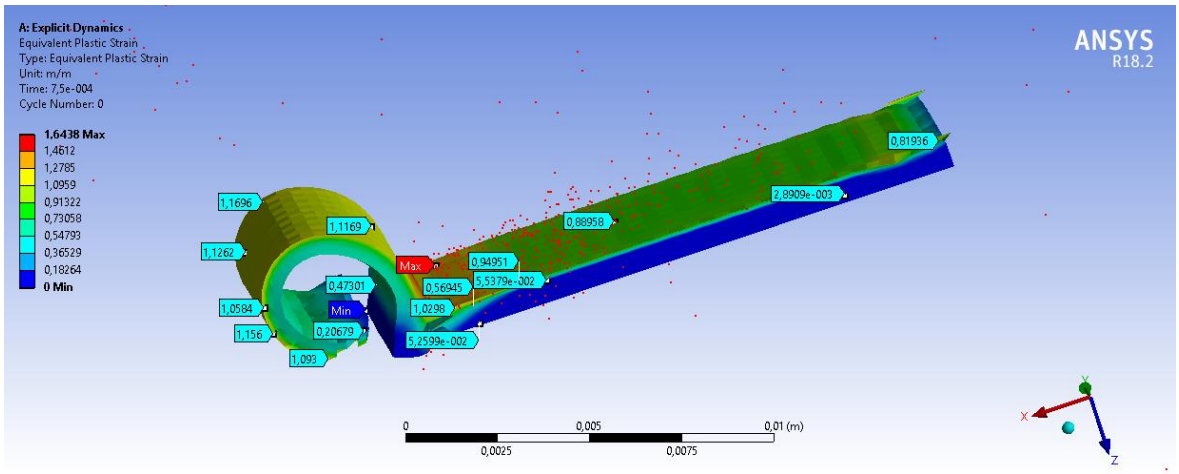
Analizde meydana gelen maksimum eşdeğer gerilmelerin (von-Mises) zamana bağlı değişimi Şekil 2.24'de incelenebilmektedir.



Şekil 5.24. Talaş kaldırılan parça (AISI 1006 STEEL) üzerinde meydana gelen maksimum eşdeğer gerilmenin (von-Mises) zamana bağlı değişimi

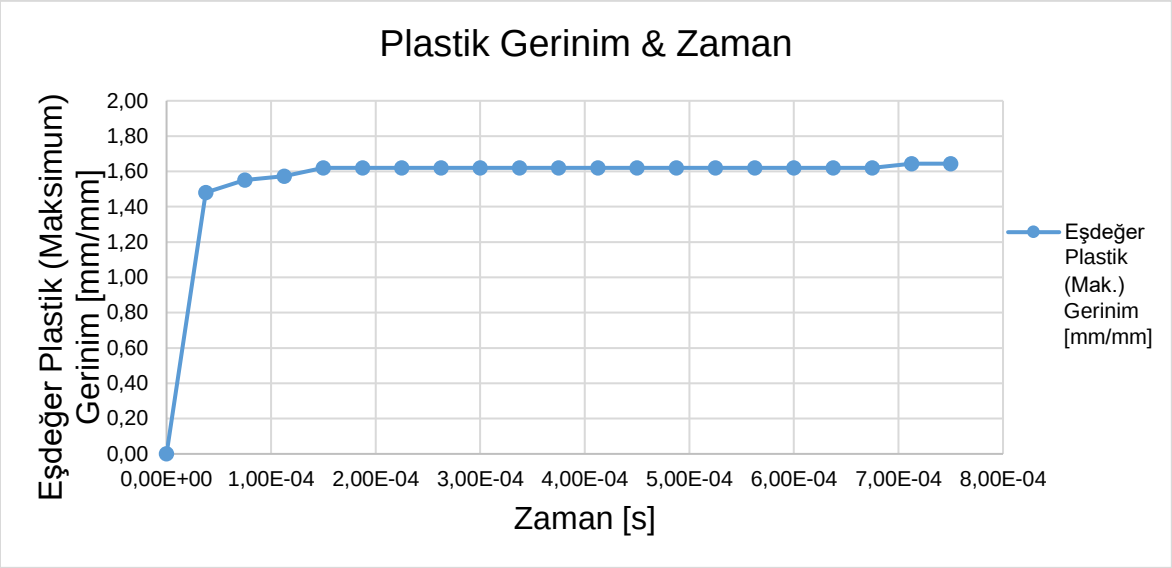
Talaş kalkan malzeme (AISI 1006 STEEL) üzerindeki en yüksek çekme dayanımının (330MPa) iki katından daha fazla bir gerilme oluştuğu ve talaş kaldırma operasyonu devam ederken oluşan gerilme değerinde zamanla küçük artma ve azalmaların meydana geldiği görülmektedir. Fakat en yüksek gerilme değerinin (677,95MPa) ilk temas anında meydana geldiği görülüyor. Bu durum, talaş kaldırma operasyonunda ilk temas anında yüksek kuvvete ihtiyaç duyacağını göstermektedir.

Talaş oluşan malzememiz üzerinde, son olarak maksimum plastik gerinimlerin zamana bağlı değişimleri incelendi. Meydana gelen gerinimlerin oluştuğu kritik noktaları ve maksimum plastik gerinimin oluştuğu noktayı, bu analizde de belirlendi. Şekil 5.25'de maksimum plastik gerinimlerin meydan geldiği bazı noktalar da görülmektedir.



Şekil 5.25. Talaş kaldırılan parça (AISI 1006 STEEL) üzerinde meydana gelen eşdeğer plastik gerinimlerin dağılımı

Kurgulanan talaş kaldırma operasyonu analizinde, meydana gelen maksimum eşdeğer plastik gerinimin zamana bağlı değişimi Şekil 5.26'da görülmektedir.



Şekil 5.26. Talaş kaldırılan parça (AISI 1006 STEEL) üzerinde meydana gelen maksimum eşdeğer gerinimin zamana bağlı değişimi

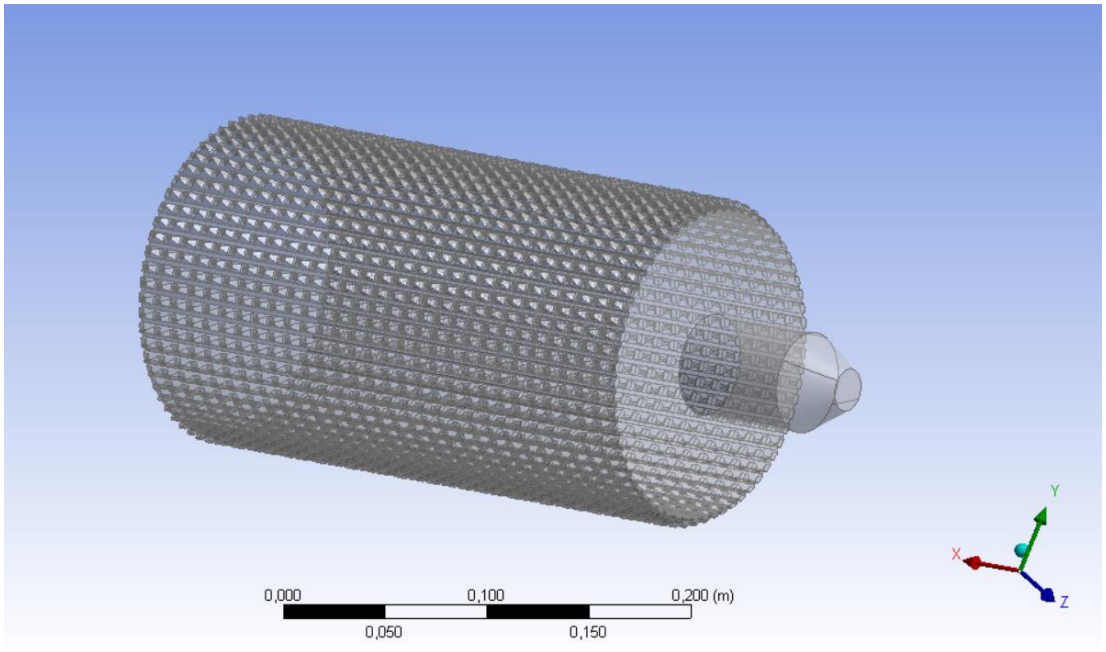
Talaş kalkan parçada (AISI 1006 STEEL) meydana gelen; maksimum eşdeğer plastik gerinim değerinin; parça ile bıçak teması başladıktan sonra artış gösterdiği, ardından belirli bir değere ulaştıktan sonra (teorik olarak 20%) sabit (1,62 mm/mm) devam ettiği görüldü. Analizin bu kısmında, maksimum eşdeğer plastik deformasyon değerinin, sürekli talaş oluşumu operasyonlarında, talaş kaldırma süreci boyunca sabit olacağını tespit edilmiş oldu. Bu durum talaş kaldırma operasyonunda, sürekli talaş oluşumunun yüksek hassasiyette ilerleyeceğini ortaya koymaktadır.

Kurgulanarak simülasyonunu yapılan talaş kaldırma analizi ve daha öncesinde yapılan (Bölüm 5.1 ve Bölüm 5.2) analizler, broş kesici takım ile yapılacak imalatın (broşlama) temel olarak tüm süreçlerini analizini ortaya koydu. Son yapılan analizide, kesici bıçağı, broş tığ ile güncelleyerek ve LS-DYNA modülü ve LS-PrePost paket programını kullanarak daha kapsamlı analizler ortaya koymak, tez çalışmasının ve beraberinde devam eden San-Tez projesinin hedeflerine ulaşmak mümkün hale geldi.

5.4. İç Yüzey Broşlama ile Çember Dişli Açma Analizi ve Simülasyonu

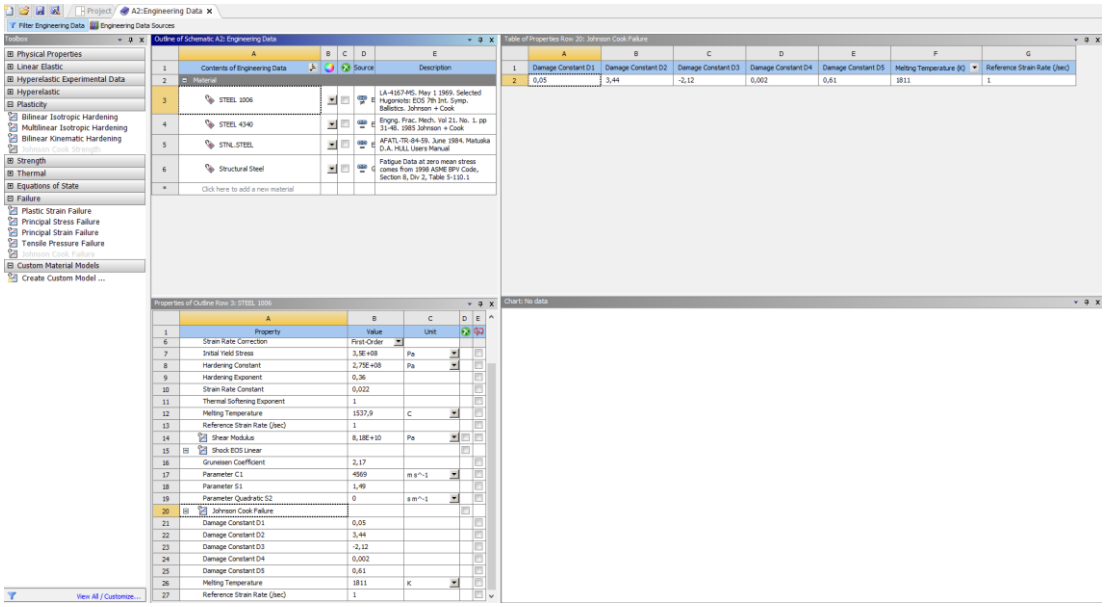
Broş ve broşlama tanımlarını hatırlayarak analize başlamakta fayda olacaktır. Bu bağlamda; “Broş üniversal olmayan, sadece işlenecek parçaya göre tasarlanan, malzemelerin dış yüzeylerini veya önceden açılmış bir deliğin iç yüzeyini şekillendirmek için bu alanlardan talaş kaldıran, üzerinde kademe kademe artış gösteren birçok kesici ağız, diş veya kenar bulunan bir kesici takımdır.” ve “Broşlama; broş ismi verilen kesici aletlerle genellikle doğrusal kesme hareketi uygulayarak iş parçasının içinden veya dışından talaş kaldırma işlemine denir.” Broş tığları genellikle doğrusal hareket ettirilerek kullanılır.

Çember dişli açmak için broşlama operasyonunda kullanılacak ilk broş tığ (AISI M2 HSS), San-Tez projesi kapsamında proje ortağı firma (ANMAK Ankara Makina Ve Dişli Sanayi) ile birlikte yapılan literatür araştırmaları, firmanın tecrübeleri ve sanayinin ihtiyaçları doğrultusunda CAD (Solidwoks) paket programları kullanılarak proje kapsamında tasarlandı. Tasarlanan broş tığ ile açılması planlanan çember dişlinin (AISI 1006 STEEL) ham halini de aynı şekilde yapılan araştırmalar neticesinde proje kapsamında belirledi.



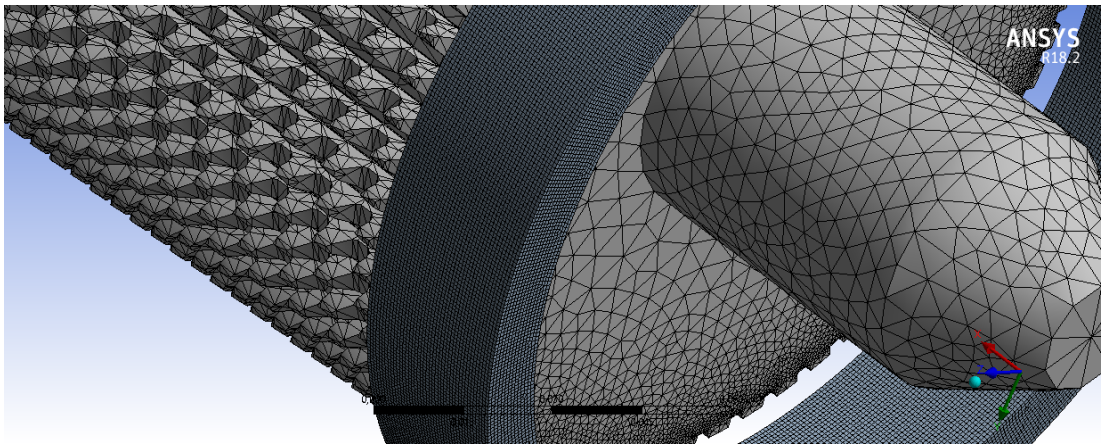
Şekil 5.27. San-Tez Projesi (01042.STZ-2011-2) kapsamında tasarlanan ilk broş tığ (AISI M2 HSS)

İç yüzey broşlama metodu ile çember dişli açma analizinde; ANSYS Workbench LS-DYNA modülü içerisinde, ilk olarak kullanılacak malzemeleri seçerek işe başlandı. Sürekli talaş oluşturan talaş kaldırma operasyonlarında, yapılan literatür çalışmaları sonucunda en iyi çalışan malzeme modeli olan Johnson & Cook malzeme modelinin kullanmasına karar verildi. Çember dişli (AISI 1006 STEEL) ve broş tığ (AISI M2 HSS) için Johnson & Cook malzeme modelinde (Eşitlik 3.12, 4.7 & 4.8) yer alan malzeme özellikleri (Tablo 4.1) ANSYS Workbench LS-DYNA modülü içerisinde tek tek işledi.



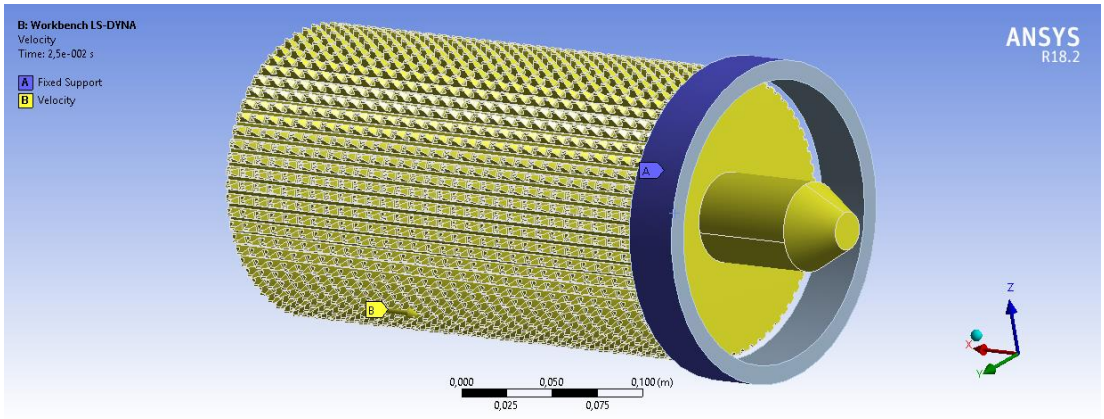
Şekil 5.28. ANSYS Workbench LS-DYNA modülü içerisine Johnson & Cook malzeme özelliklerinin tanımlanması

Johnson & Cook malzeme özelliklerinin tanımlanmasının ardından, ANSYS Workbench LS-DYNA modülü içerisinden, broş (AISI M2 HSS) ve çember dişli (STELL 1006) arasındaki teması “Connections” menüsü altında tanımlandı. Daha sonra sonlu elemanlar metodunun temel adımı olan; çözüm aranan yüzeylerde sonlu eleman oluşturma işi “Mesh” menüsü altında gerçekleştirildi. Oluşturulan sonlu elemanlar, daha iyi sonuçlar elde etmek ve hourglass modalarının oluşmasını önlemek amacıyla boyutları (sizing) ayarlandı. Elemanların boyutlarının küçük olması analizi hourglass etkiden de korumuş olacak (Bölüm 4.7).



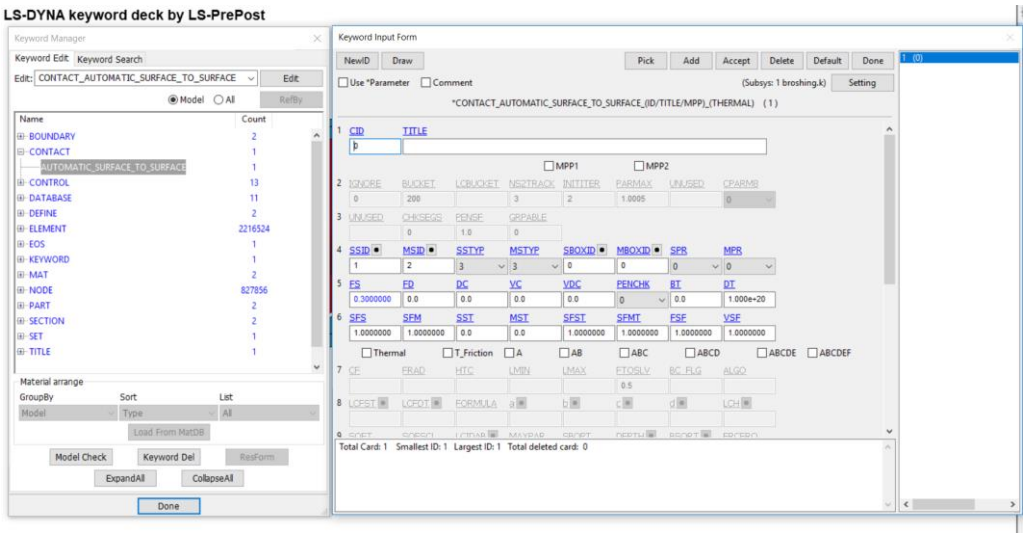
Şekil 5.29. Broş ve çember dişli üzerinde oluşturulmuş sonlu elemanlar

Broşlama analizi için gerekli koşullar olan, broşun tığının hızı ($30m/dk$) ve çember dişlinin dış yüzeyinden sabitlenme durumu tanımladı. Analiz ayarları menüsünden gerekli ayarlamalar yaptıktan sonra çözümünü istenilen nicelikler tanımladı. Daha sonra LS-PrePost programında kontrolleri sağlanmak üzere çözücü dosyası (“keyword file” “.k”) kaydedildi.



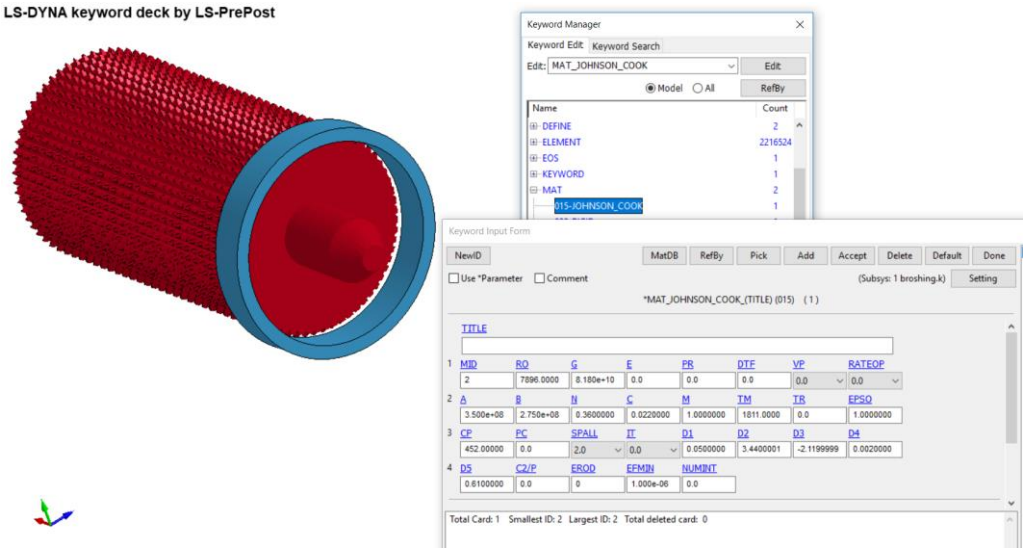
Şekil 5.30. Broş (AISI M2 HSS) ve çember dişlinin (AISI 1006 STEEL) analiz için ANYSY Workbench LS-DYNA modülü içinde tanımlanmış durumları

ANSYS Workbench LS-DYNA modülünde kaydedilen çözücü dosyası (“keyword file” “.k”) LS-PrePost programında açılarak, çözüm için gerekli veriler burada da tanımlandı veya kontrol edildi.



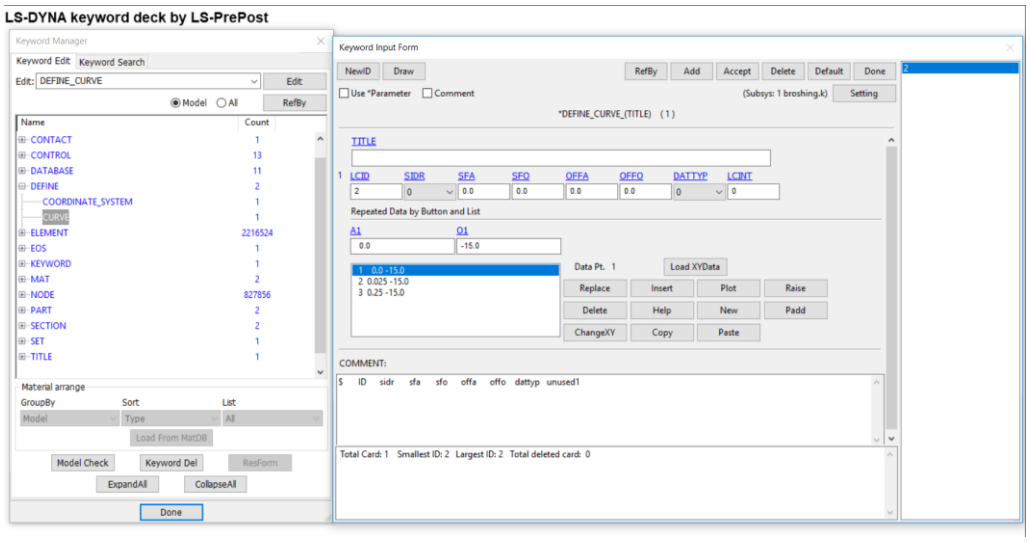
Şekil 5.31. LS-PrePost keyword manager içinde kontak tanımlama

Tablo 4.1'de bulunan, daha önce ANSYS içinde tanımlana verileri LS-PrePost içinde kontrol etmek için "Keyword Manager" menüsü içinde bulunan "MAT" menüsüne gidildi.



Şekil 5.32. Johnson & Cook malzeme modelinin LS-PrePost içinde tanımlanması

İlk olarak ANSYS Workbench LS-DYNA modülü içinde tanımlanan ve LS-PrePost üzerinden kontrol edilen verilerin denetimi, "Keyword Manager" menüsü içinde yer alan "DEFINE" sekmesi içinde ki "CURE" menüsü içinden de yapılabilir.

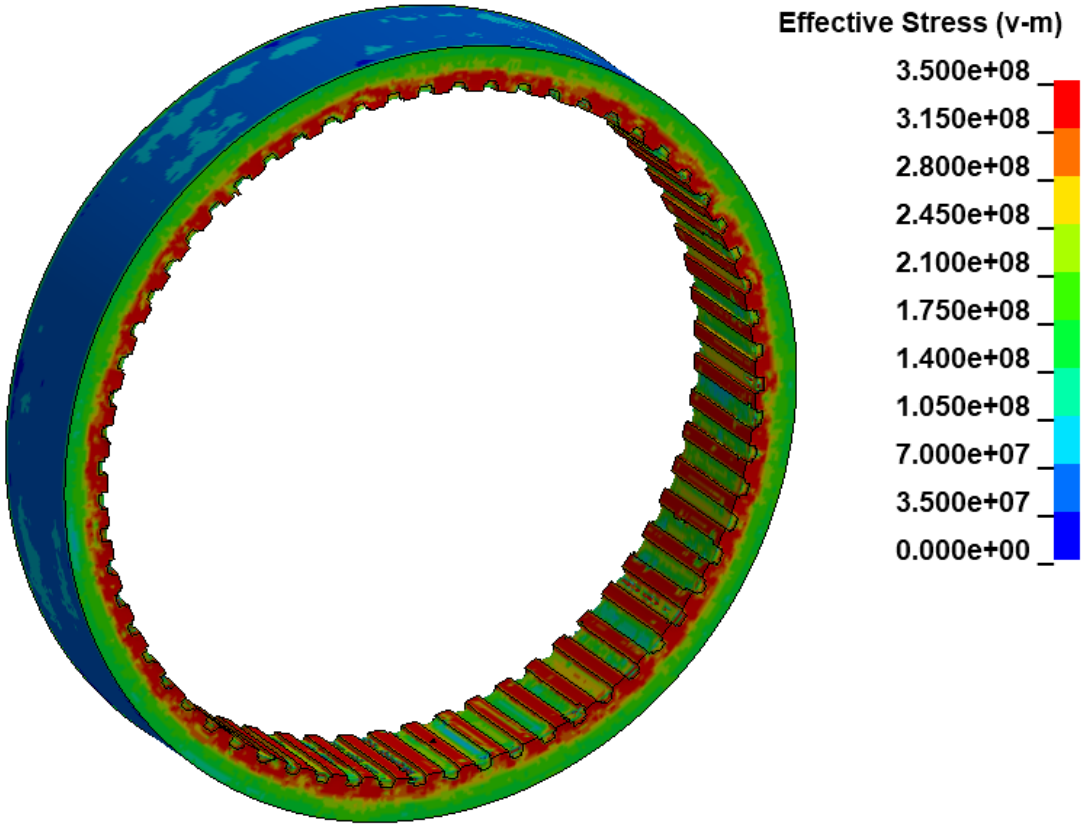


Şekil 5.33. LS-PrePost içerisindeki değişkenlerin denetimi

Tüm değişkenler tanımladıktan sonra, meydana gelen çözücü dosyası (“keyword file” “.k”) ANSYS Mechanical APDL Launcher içinde (LS-DYNA Solver) çözdürüldü. Sonlu elemanlar metodu kullanarak yapılan bu analiz; bünyesinde 2 tane Intel Xeon 2695 v4 işlemci(36C/72T), 128GB DDR4 Ram ve 2 tane Nvidia GTX 1080GPU barındıran Workstation PC ile gerçekleştirildi. Broşlama analizlerinin; karmaşık yapısı gereği kullanılan bu sistemde ortalama olarak 7 – 8 gün içerisinde çözüme ulaşılabildi. Analizler; bireysel hatalar (analiz ayarları veya veri hataları) ve elektrik kesintileri nedeninden dolayı bazen daha uzun zaman dilimine yayılarak çözüm verdi. Alınan sonuçlar doğrultusunda; oluşan gerilmelerin (von-Mises), plastik gerinimlerin ve kontak kuvvetlerin zamana bağlı değişimleri incelendi. Bu analizler sonucunda; imalatını yapılacak çember dişlilerin üzerinde meydana gelen durumlar gözlemlenerek, seçilen malzemelerin, broş tığların modellerinin doğruluğu ve gerekli kuvvet miktarları hakkında bilgi sahibi olundu. Bu bilgiler, San-Tez projesi kapsamında ANMAK Ankara Makine ve Dişli Sanayi firması ile rapor olarak paylaşıldı ve prototip üretimi aşamasında kullanıldı.

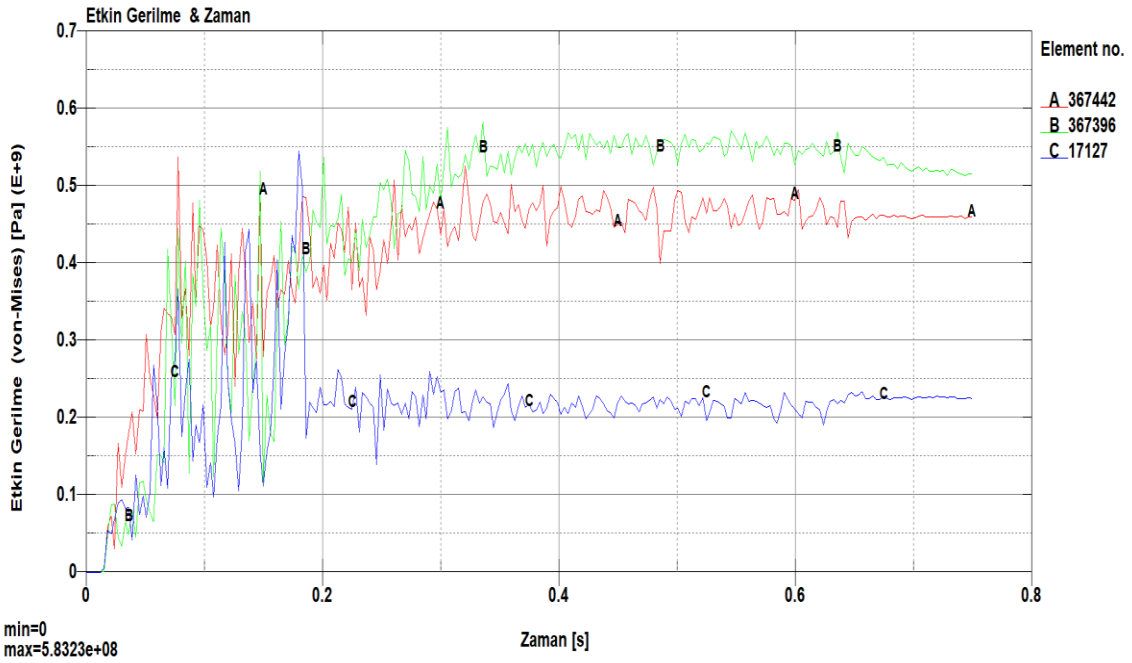
Talaş kaldırma analizi sonucunda, Şekil 5.34’de çember dişli (AISI 1006 STEEL) üzerinde oluşan gerilmeler (Pa) verilmiştir. Çember dişli üzerinde en yüksek gerilmenin, açılan dişlerin sivri uç noktasında oluştuğu, dişli gövdesine bakıldığında gerilmelerin daha küçük olduğu görülmektedir.

Çember dişlinin üzerinde diş açılan bölgelerde oluşan gerilmeler, malzemenin kopma dayanımının üstünde olduğundan sürekli bir talaş oluşumu bu kurguda mümkün olmuştur ve analiz başarı ile sonuçlanmıştır.

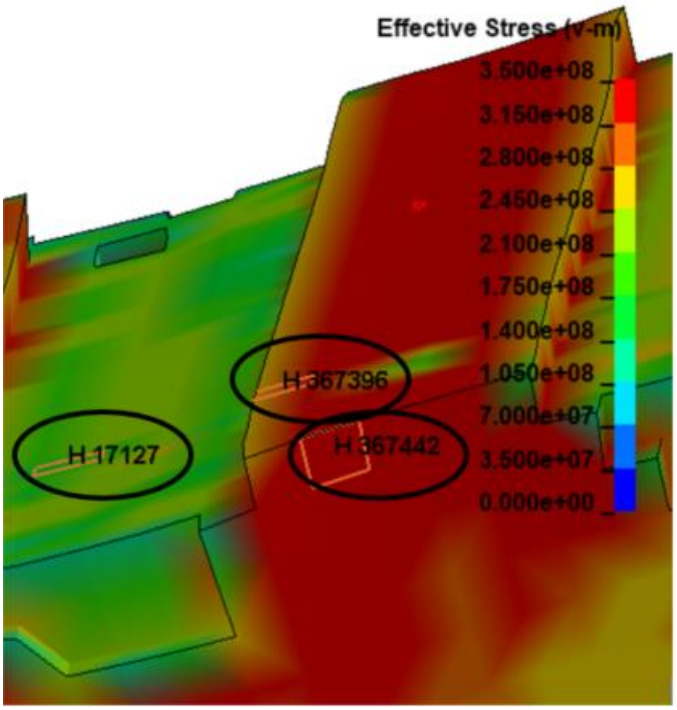


Şekil 5.34. Çember dişli (AISI 1006 STEEL) üzerinde meydan gelen etkin von-Mises gerilmeleri (Pa)

Şekil 5.35'de seçilen elemanlar üzerinde meydana gelen gerilmelerin (von-Mises) zamanla değişimini ve Şekil 5.36' da seçilen elemanların bölgelerini görebiliriz.



Şekil 5.35. Çember dişlide (AISI 1006 STEEL) seçilen elemanlar üzerinde meydana gelen etkin gerilmelerin (von-Mises) zamana bağlı değişimi



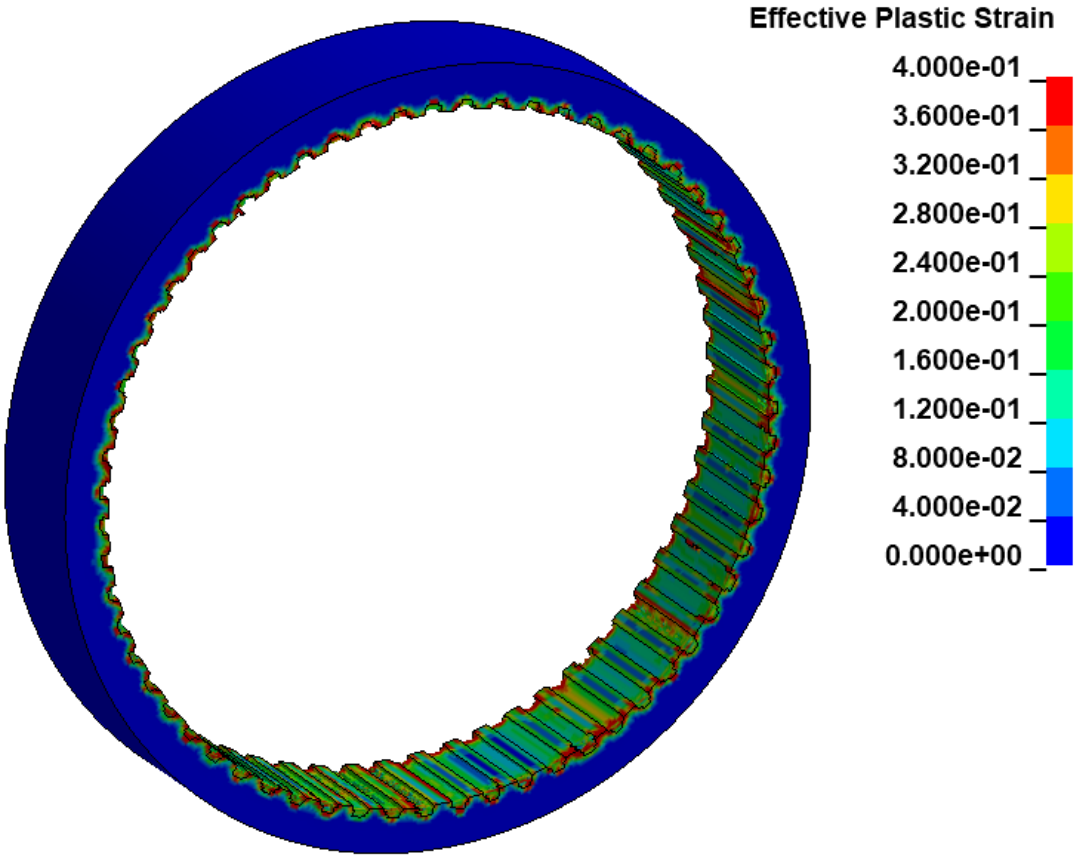
Şekil 5.36. Çember dişli üzerinde meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimin incelendiği elemanlar

Dişli yüzeyinde seçilen elemanlar (Şekil 5.36) üzerinde meydana gelen gerilmelerin (kalıcı gerilmeler) zamana göre değişimi Şekil 5.35 üzerinden incelenebilmektedir. İlk olarak, broş tığın (AISI M2 HSS), çember dişliden (AISI 1006 STEEL) parça koparabilmek için artan bir gerilme eğilimi oluşturduğu görülmektedir. Çember dişli için kopma gerilmesi geçilip, talaş kaldırma işlemi başladıktan sonra ise çember dişli üzerinde oluşan gerilme belirli bir aralıkta ve malzemenin kopma gerilme değerlerinin üzerinde seyrettiği görülmektedir. Başlık 5.3 altında incelediğimiz talaş kaldırma analizinde de elde edildiği grafik (Şekil 5.24) ile karşılaştırdığımızda aynı eğilimde bir grafik elde ettiğimizi görüyoruz. Bu durum talaş kaldırma analizimizin kompleks halde de (bir çok yüzeyden aynı anda talaş kaldırma durumunda) doğru olduğunu göstermektedir. Eğer yapılan analizde broş hızı daha düşük olsaydı ($v_b \leq 30\ m/dk$) meydana gelen sıcaklık sistemden hemen ayrılamayacak ve malzemelerin mekanik özellikleri etkilenerek hem kalıcı gerilmeler daha yüksek olacak hem de broş tığ daha hızlı aşınacaktır. Bu durum ürün kalitesini etkileyeceğinden yavaş operasyonlar da sisteme soğutma fonksiyonun eklenmesi ürün kalitesi açısından önemli olacaktır.

Broş tığ ilerledikçe, parça kaldırdığı yüzeyde de giderek yüzey hassasiyetinin arttırdığını; dişler her ilerlediğinde kopan parça durumuna göre gerilme değerlerinin artışı ve iki diş arasındaki sürede veya operasyon noktasından kopan parça miktarı azaldıkça (istenilen yüzeye göre pürüzsüzlük miktarı), gerilme değerlerinin düşüşü ile anlamak mümkün olmuştur. Çember dişlinin (AISI 1006 STEEL) üzerinde, özellikle sivri uçlarda, malzemenin en yüksek çekme dayanımının (330MPa) iki katından daha fazla bir gerilme oluştuğu gözlenmiştir.

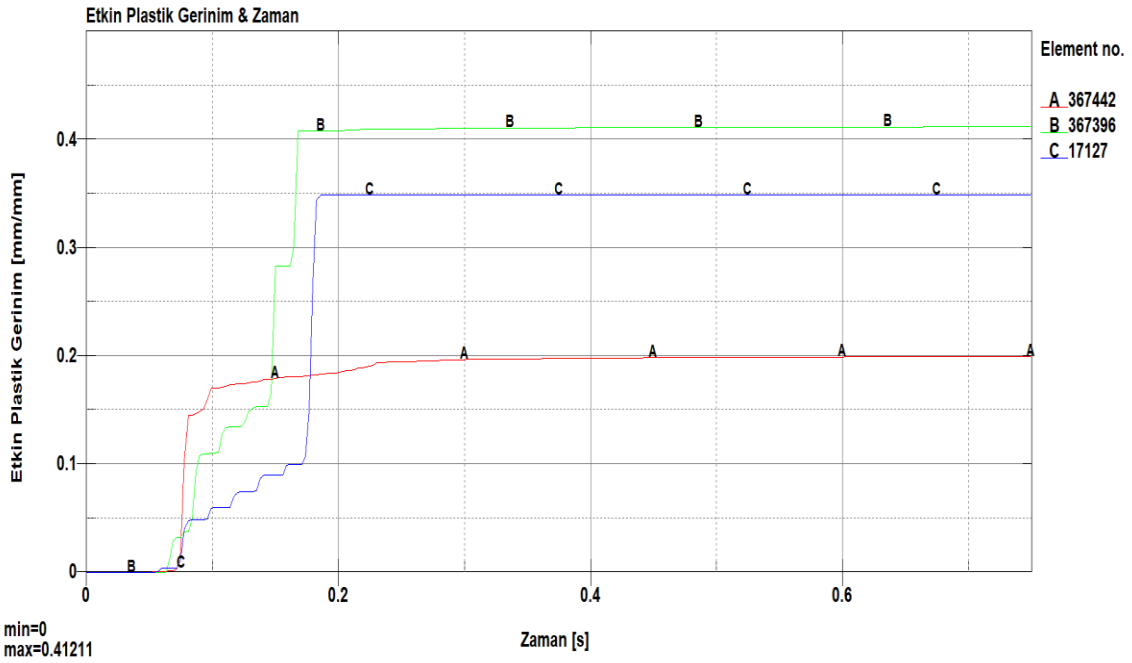
Bu analiz ile anlaşılmıştır ki, yapılan broş tığın dizaynı, yüksek hasiyette dişli açmak için doğru bir geometriye sahiptir. Yapılacak iç broşlama için, bu dizayna sadık kalınarak ve AISI M2 HSS kullanılarak imal edilecek broş tığ, prototip üretimi yapmak için uygun olacaktır. Operasyon hızının düşmesi söz konusu olursa, soğutma sistemi eklenerek, sıcaklık etkisi değerlendirilecektir.

Daha sonra; açılan çember dişli (AISI 1006 STEEL) üzerinden seçilen elemanlar (Şekil 5.39) üzerinde oluşan plastik gerinimlerin zamana bağlı değişimleri incelendi. Şekil 5.37'da açılan çember dişli üzerinde meydana gelen plastik gerinimler görülmektedir.

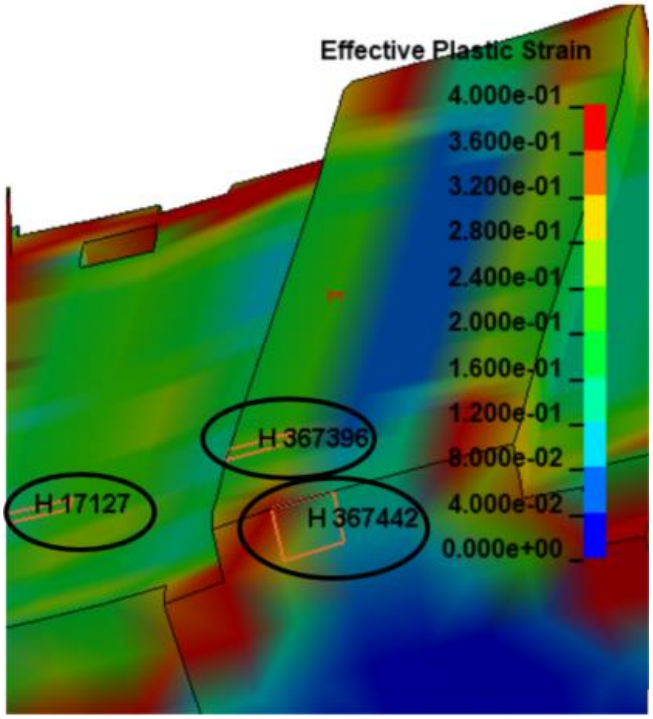


Şekil 5.37. Çember dişli (AISI 1006 STEEL) üzerinde meydana gelen etkin plastik gerinimler (mm/mm)

Broşlama operasyonu esnasında, açılan çember dişli üzerinde meydana gelen etkin plastik gerinimlerin zaman bağlı değişimini Şekil 5.38'de, gerinim-zaman incelemesi için seçilen elemanlar ise Şekil 5.39'da görülmektedir.



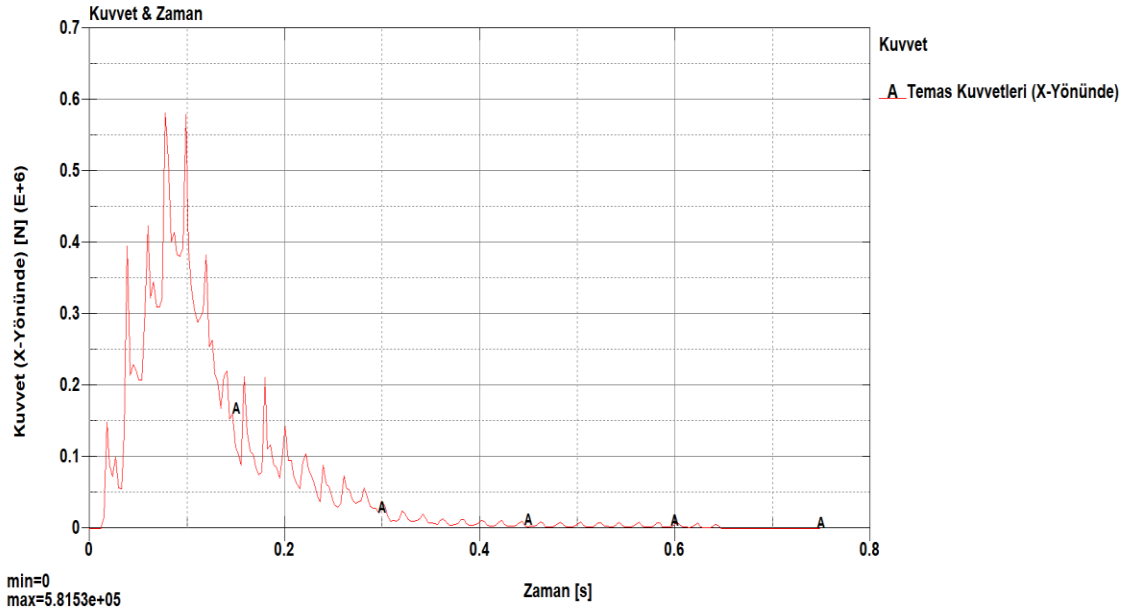
Şekil 5.38. Çember dişli (AISI 1006 STEEL) üzerinde meydana gelen plastik gerinimlerin zamana bağlı değişimi



Şekil 5.39. Çember dişli üzerinde meydana gelen gerinimlerin zamanla değişimin incelendiği elemanlar

Çember dişli üzerinde (AISI 1006 STEEL) meydana gelen; etkin plastik gerinim değerlerinin; seçilen elemanlar ile broş teması başladıktan sonra hızlı bir artış gösterdiği, ardından her birinin belirli değerlere ulaştıktan sonra sabit ilerlediği gözlemlendi. Analizin bu kısmında, plastik gerinim değerinin, talaş kaldırma süreci boyunca, talaş kaldırma meydana gelene kadar artış gösterdiği ve parça kopması olduğu andan itibaren sabit ilerlediği tespit edilmiş oldu. Bu durum sürekli talaş oluşumunun meydana geldiğini ortaya koymaktadır. Başlık 5.3'de de tek bir bıçak ve yüzey ile yaptığımız analizden aynı sonucu elde etmiştik. Böylece; hem basit hem de karmaşık olan talaş kaldırma analizleri birbirlerini doğrulamış oldu. Sonuç olarak; talaş kaldırma operasyonunda, sürekli talaş oluşumunun yüksek hassasiyette ilerleyeceği bir kez daha ortaya konuldu.

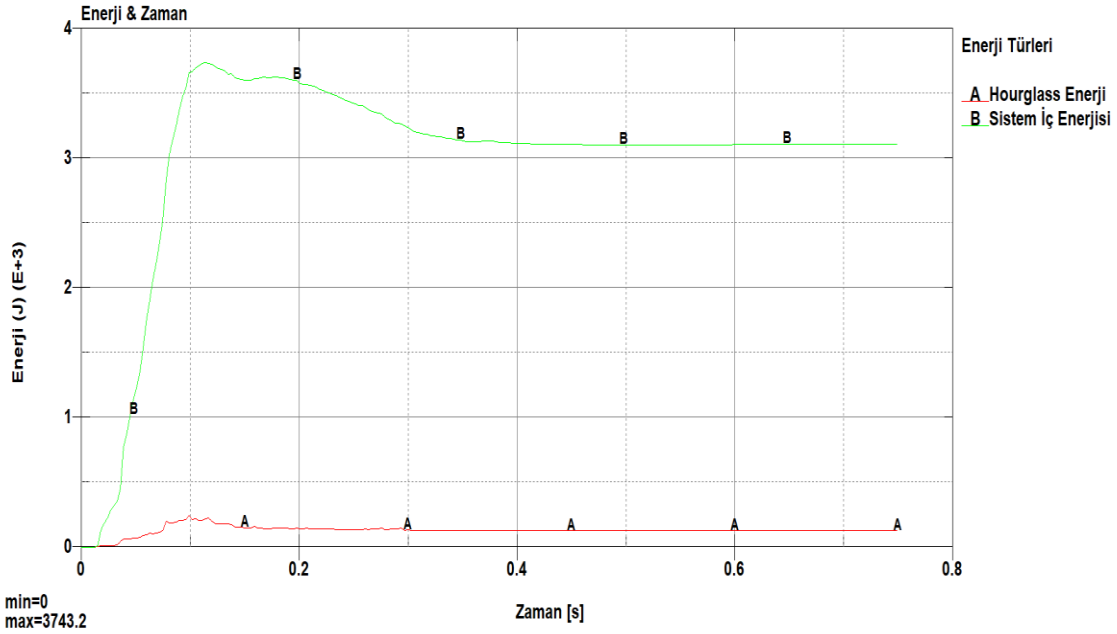
Broş tığın hareket ettiği X – Yönünde, açılan çember dişli ve broş tığı arasında oluşan kontak kuvvetleri, broş tığı itip çekecek hidrolik aksamın temini açısından büyük önem arz etmektedir. Bu bağlamda, kontak kuvvetlerini yenebilecek güçte bir hidrolik makine seçilmesi gerekmektedir. Proje kapsamında broş tığı itip-çekecek makina temin edilerek broş tığ üzerine yerleştirilecektir.



Şekil 5.40. Çember dişli (AISI 1006 STEEL) ve broş tığ arasında X - Yönünde oluşan kontak kuvvetlerin zamana bağlı değişimi

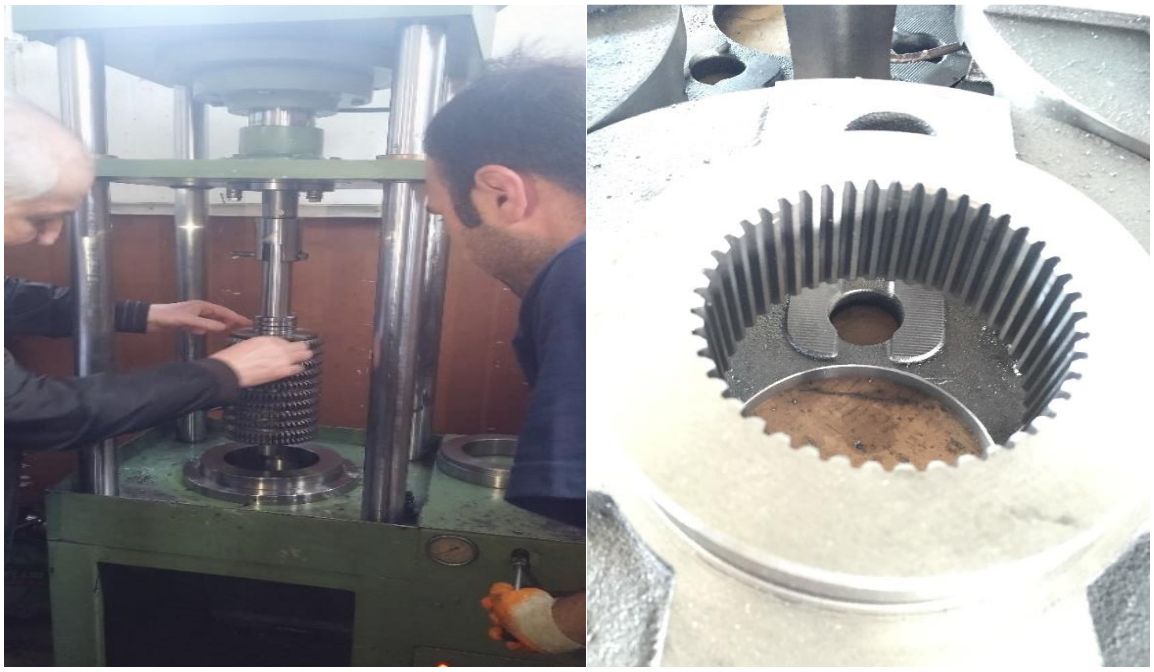
Şekil 5.40' da görüldüğü gibi, 46,54 kg olan broş tığı sabit hızla ($30\ m/dk$) hareket ettirerek diş açılan sistemde, X-Yönündeki kontak kuvvet değeri 582kN değerine ulaşmaktadır. Takım tezgâhı gücü, oluşabilecek diğer şartlarda (ısınma, körlenme vs.) göz önüne alınarak 582kN dan daha güçlü (piyasadaki mevcut kataloglar tarandığında ~60t güce sahip dikey broş tezgâhı seçimi uygun görünmektedir) seçilmelidir. Gücün gereksiniminin yüksek olmasının en önemli nedenlerinden biri de, kullandığımız broş tığımızın ağırlığı ve operasyon yüzey alanıdır.

Yapılan analizde elde edilen veriler ile daha önce yapılan basit talaş kaldırma analizi verileri kıyaslayarak analizin doğruluğu hakkında bir kanıya varmaya çalışıldı. Yapılan iç yüzey broşlama analizinin doğruluğu, yapılan analiz verileri içerisinden, Bölüm 4.7'de de bahse geçtiği biçimde hourglass enerji ile sistemin iç (internal) enerjisi kıyaslanarak da bir kanıya varmam mümkün ve daha doğru olacaktır. Hourglass enerji ve sistemin iç (internal) enerjisi aynı grafik üzerinden incelediğinde (Şekil 5.41); hourglas enerji, sistemin iç enerjisinin 5%'inden çok daha az olduğundan, sonlu elemanlar metodu ile yapılan analizin doğru ve gerçeğe çok yakın olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 5.41. Çember dişli açma analizinde sistem iç enerjisinin ve hourglass enerjinin zamana göre değişimi

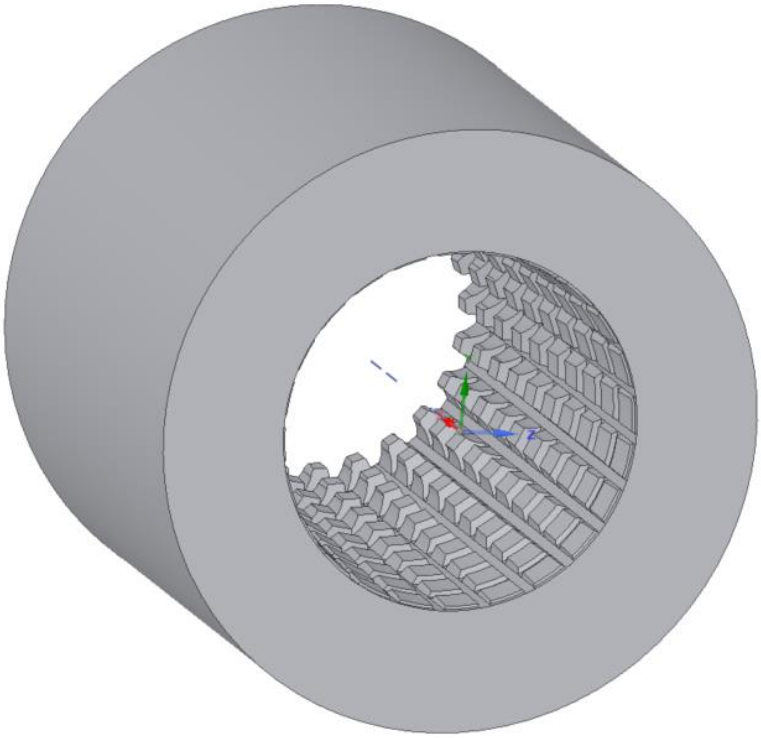
Şekil 5.42 yapılan analizin doğru ve gerçeğe çok yakın olduğunu ortaya koyuyor. Böylelikle analizden türetilen değer ve önerilerin prototip üretimi için gönül rahatlığı ile kullanmak üzere proje ortağı firmaya iletilmesinde bir sakınca kalmamıştır.



Şekil 5.42. İmalatı yapılan prototip takım tezgâhı ile çember dişli açma operasyonu ve açılan çember dişli [11]

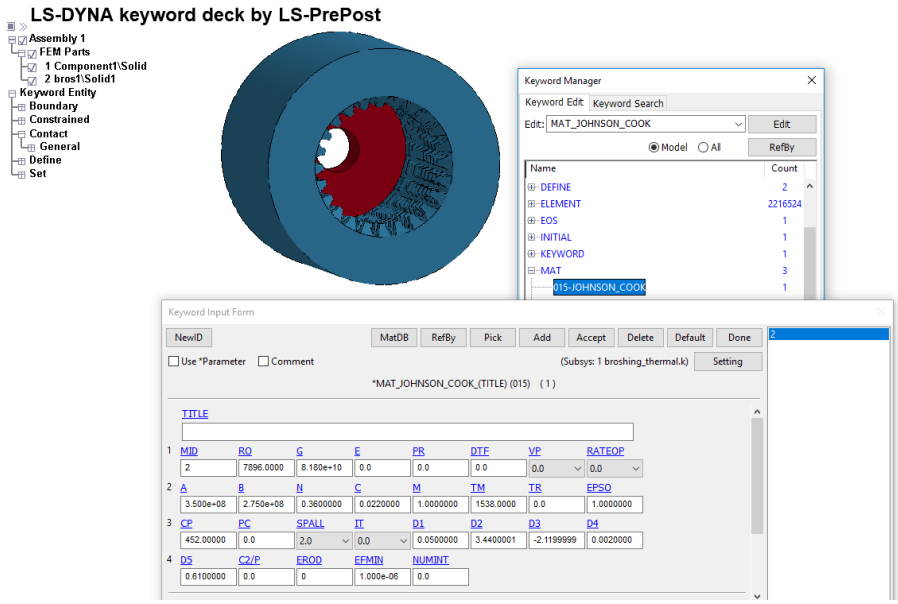
5.5. Dış Yüzey Broşlama ile Güneş Dişli Açma Analizi ve Simülasyonu

Broşlama operasyonunda kullanılacak ikinci broş tığ (AISI M2 HSS), San-Tez projesi kapsamında, projeyi ortağı firma (ANMAK Ankara Makina Ve Dişli Sanayi) ile birlikte, ilk tığ modelinde olduğu şekilde, yapılan literatür araştırmaları, firmanın tecrübeleri ve sanayinin ihtiyaçları doğrultusunda CAD (Solidwoks) paket programları kullanılarak proje kapsamında tasarlandı. Tasarlanan broş tığ ile açılması planlanan güneş dişlide (AISI 1006 STEEL) aynı şekilde proje kapsamında belirlendi.



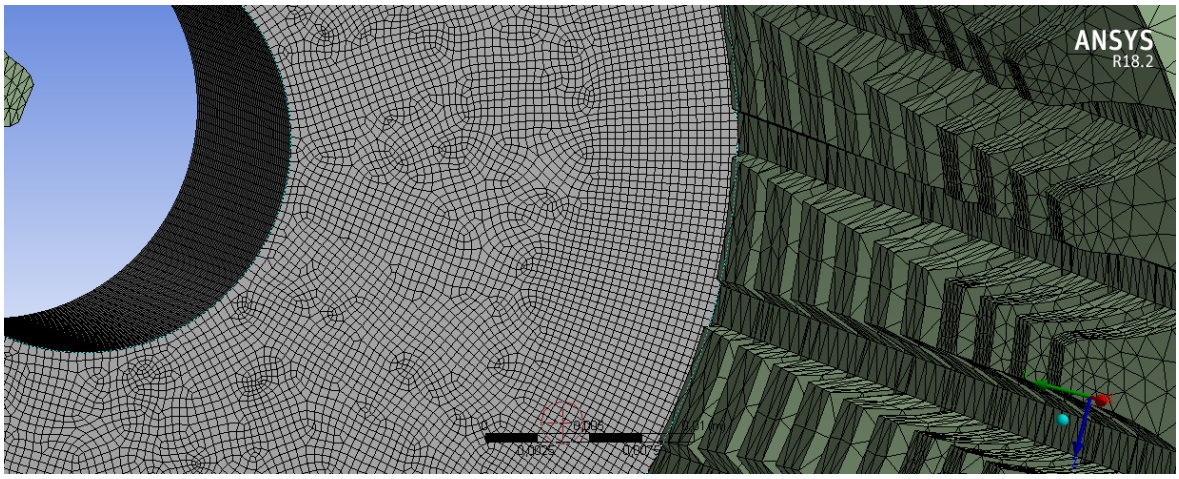
Şekil 5.43. San-Tez Projesi (01042.STZ-2011-2) kapsamında tasarlanan ikinci broş tığ (AISI M2 HSS)

Daha önce yapılan iç broşlama metodu ile çember dişli açma analizinde olduğu gibi dış yüzey broşlama ile güneş dişli açma operasyonunda da tüm analiz basamakları, ilk olarak ANSYS Workbench LS-DYNA modülü içerisinde ve devamında LS-PrePost paket programı içerisinde tek tek işlenip, kontrol edilerek başlandı. İlk analizde kullanılan malzemeler (AISI M2 HSS & AISI 1006 STEEL), ikinci analizde de aynı şekilde kullanıldı. Dış yüzey broşlama işlemi de iç yüzey broşlama işlemi gibi sürekli talaş oluşumunun gözlendiği bir operasyon olduğu için, bu operasyonda da Johnson & Cook malzeme modelini tercih edildi. Güneş dişli (AISI 1006 STEEL) ve broş tığ (M2 HSS) için Johnson & Cook malzeme modelinde (Eşitlik 3.12 ve 4.7) yer alan malzeme özellikleri (Tablo 4.1) sisteme tanımladı.



Şekil 5.44. Johnson & Cook malzeme modelinin LS-PrePost içinde malzemeler için tanımlanması

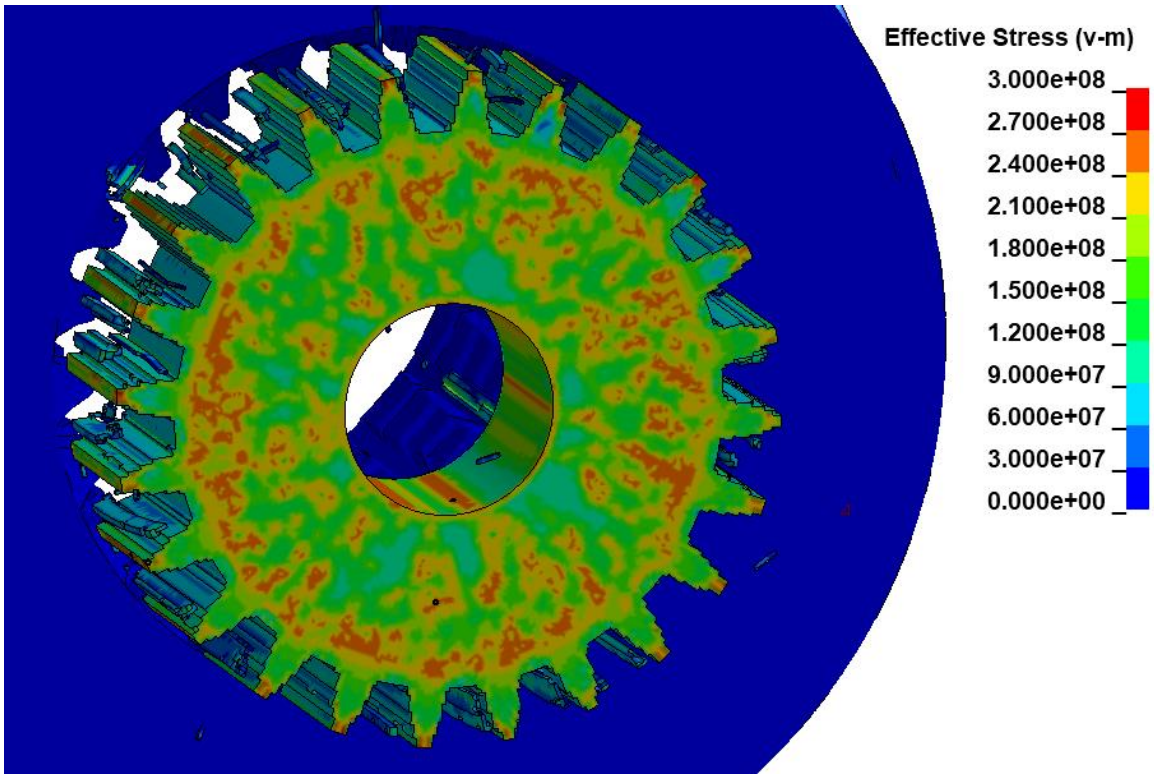
Analizde, yüzeyler arasında ki temas (“Contacts”) tanımladıktan sonra, sonlu elemanlar metodunun temel adımı olan; çözüm aranan yüzeylerde sonlu eleman oluşturma işini ”Mesh” menüsünden gerçekleştirildi. Oluşturulan sonlu elemanlar daha iyi sonuçlar elde etmek için, boyut (sizing) ayarlamaları yapıldı. Daha küçük boyutlu eleman kullanmak analizi hourglass etkiden de koruyacaktır.



Şekil 5.45. Broş tığ (AISI M2 HSS) ve açılacak güneş dişli (AISI 1006 STEEL) üzerinde oluşturulmuş sonlu elemanlar

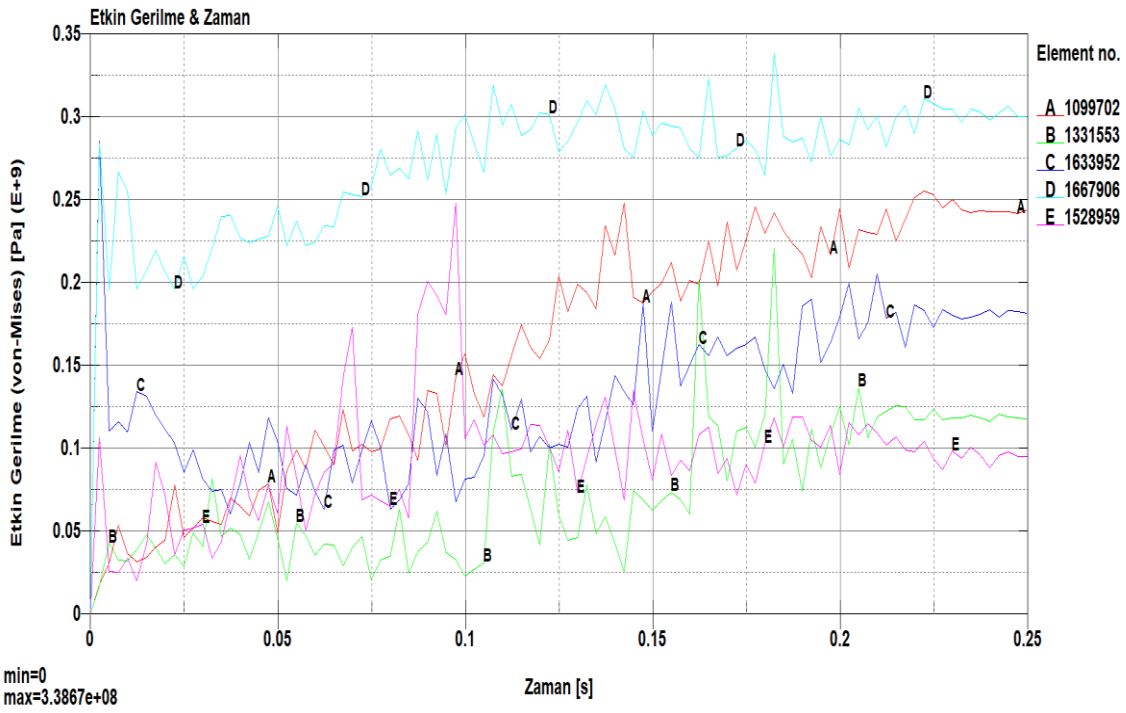
Dış yüzey broşlama ile güneş dişli açma operasyonu analizi için, operasyonu hızı ($30m/dk$) ve parçalı dış yüzey broşlama tığı için sabitlenme koşulları tanımlandı. Analiz ayarları menüsünden gerekli ayarlamalar yaptıktan sonra çözümü elde edilmek istenen nicelikler tanımlandı. Daha sonra LS-PrePost programında kontrolleri sağlanmak üzere çözücü dosyası (“keyword file” “.k”) kaydedildi. Tüm değişkenleri tanımlayarak, kontrolleri yapılıp ve oluşturulan çözücü dosyayı (“keyword file” “.k”) “ANSYS Mechanical APDL Launcher da LS-DYNA Solver” içerisinde çözdürdük. Dış yüzey broşlama analizide; karmaşık yapısı gereği ortalama olarak 7 – 8 gün içerisinde çözüm vermiştir. Alınan sonuçlar ile meydana gelen gerilmeler (von-Mises), plastik gerinimler ve kontak kuvvetleri incelendi. Analiz sonucunda; imalatını yapılacak güneş dişlilerin üzerinde meydana gelen durumlar incelenerek, seçilen malzemelerin ve broş tığ modelinin doğruluğu ile meydana gelen kontak kuvvetler ortaya kondu. Elde edilen sonuçlar ve yorumlar San-Tez projesi kapsamında ANMAK Ankara Makine ve Dişli Sanayi firması ile rapor şeklinde paylaşarak, üretimi hedeflenen güneş dişliler ile ilgili üretim aşamasında kullanıldı.

Broşlama operasyonu sonucunda, Şekil 5.46'da güneş dişli (AISI 1006 STEEL) üzerinde oluşan gerilmeler (Pa) görülmektedir. Güneş dişli üzerinde yüksek gerilmelerin, dişlerin sivri uç noktalarında oluştuğu, dişli gövdelerine bakıldığında gerilmelerin uç kısımlara göre daha düşük olduğu görüldü. Güneş dişli üzerinde diş açılan bölgelerde oluşan gerilmeler, malzemenin kopma dayanımının üzerinde olduğundan sürekli bir talaş oluşumunun bu kurguda mümkün olduğu görüldü ve analiz başarı ile sonuçlandı.

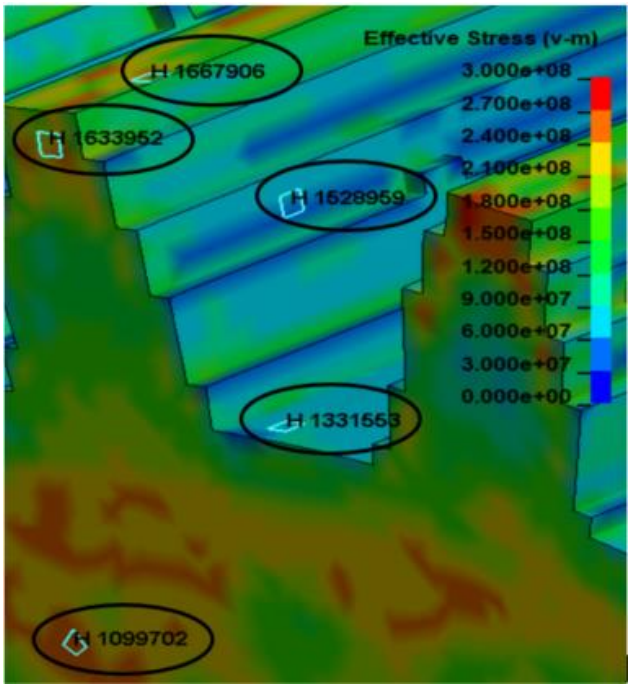


Şekil 5.46. Güneş dişli (AISI 1006 STEEL) üzerinde oluşan gerilmeler (von-Mises) (Pa)

Broşlama operasyonu esnasında, açılan güneş dişli üzerinde oluşan gerilmelerin (von-Mises) zamana bağlı değişimi Şekil 5.47'de, gerilme-zaman ilişkisi için seçilen elemanlar ise Şekil 5.48'de görülmektedir.



Şekil 5.47. Güneş dişli (AISI 1006 STEEL) üzerinde meydana gerilmelerin (von-Mises) zamana bağlı değişimi



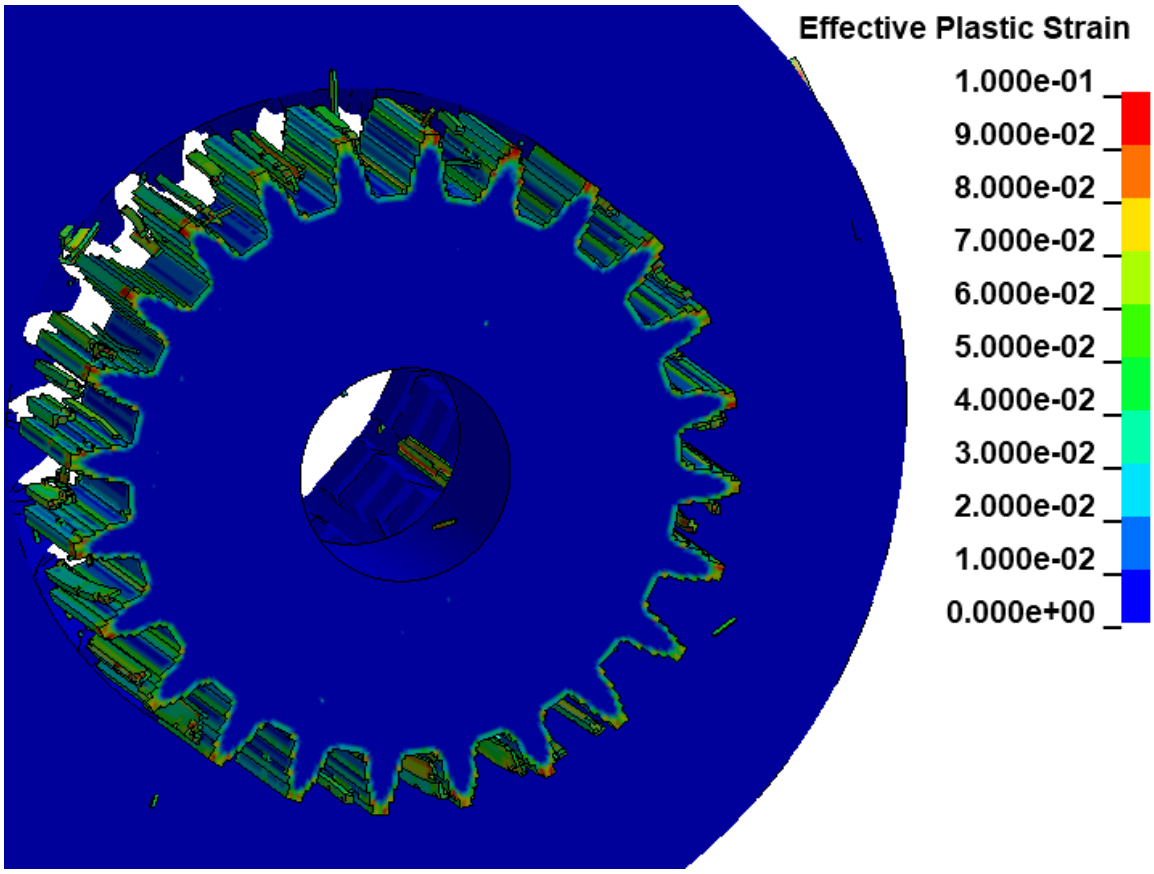
Şekil 5.48. Güneş dişli üzerinde meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimin incelendiği elemanlar

Dişli yüzeyinde seçilen elemanlar üzerinde meydana gelen gerilmelerin zamana göre değişimi Şekil 5.47'den incelediğinde; ilk olarak broş tığın (AISI M2 HSS), güneş dişli üzerinden (AISI 1006 STEEL) parça koparabilmek için artan bir gerilme eğilimi oluşturduğu, açılan dişlerin üzerinde, kopma gerilmesi geçilip talaş kaldırma işlemi başladıktan sonra güneş dişli üzerinde oluşan gerilmelerin belirli bir aralıkta seyrettiği görülmektedir.

Broşun kesici dişlerinin boyutlarının geometrik bir oranda büyümesi, açılacak güneş dişlinin her ilerlemesinde gerilme değerlerinin biraz daha artmasına ve iki diş arasında geçen sürede veya operasyon noktasından parça koptuğu anda (istenilen yüzeye göre pürüzsüzlük miktarı artışı) gerilme değerlerin düşmesinden, hassas yüzeye sahip dişler açtığı anlaşılmaktadır. Analiz neticesinde görülmüştür ki, güneş dişli açılacak ring ilerledikçe, parça kalkan yüzeylerinde, istenilen geometriye ulaşılmış ve hassas bir diş açma operasyonu gerçekleştirilmiştir. Eğer yapılan analizde güneş dişli ilerleme hızı daha düşük olsaydı ($v_{GD} \leq 30\ m/dk$) meydana gelen sıcaklık sistemden hemen ayrılamayacak ve malzemelerin mekanik özellikleri etkilenerek, hem kalıcı gerilmeler daha yüksek olacak hem de broş tığ daha hızlı aşınacaktır. Bu durum, ürün kalitesini etkileyeceğinden yavaş operasyonlar da sisteme soğutma fonksiyonun eklenmesi ürün kalitesi açısından önemli olacaktır.

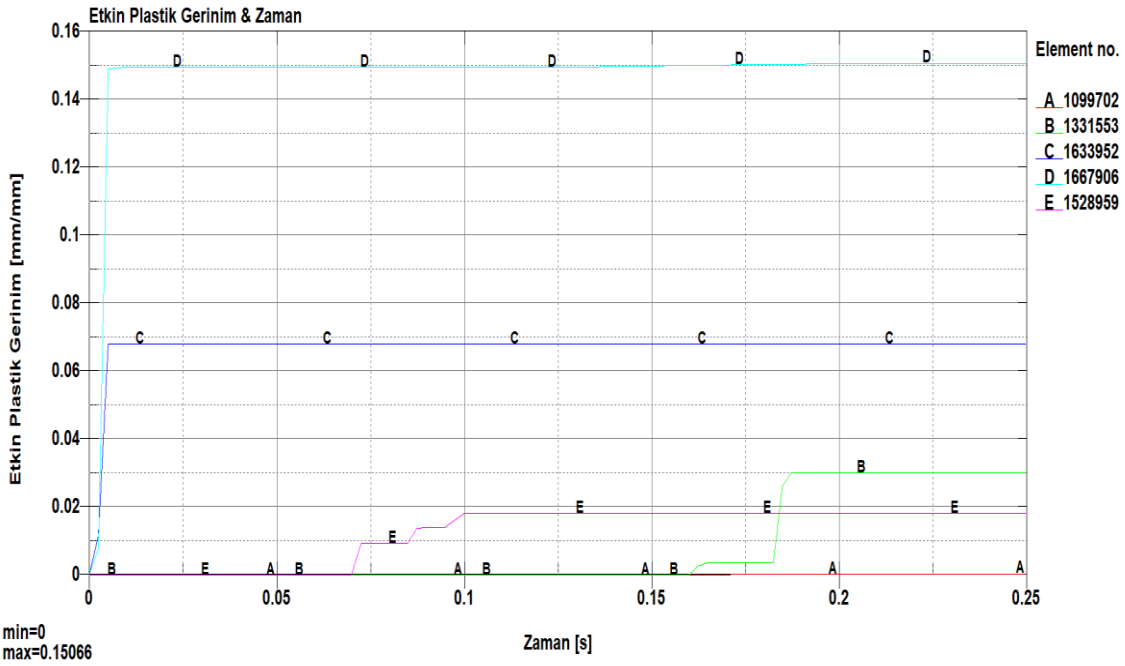
Analiz sonucunda, broş tığ dizaynının, yüksek hasiyette güneş dişli açmak için doğru bir geometriye sahip olduğu anlaşılmıştır. Yapılacak dış yüzey broşlama işlemi için, tığ dizayna sadık kalınarak ve malzeme olarak AISI M2 HSS kullanılması doğru bir tercih olacaktır. Operasyon hızının azalması söz konusu olacak olursa, soğutma sistemi eklenerek, sıcaklık etkisi de değerlendirilecektir.

Açılan güneş dişli (AISI 1006 STEEL), üzerinde seçilen elemanlarda meydana gelen plastik gerinimlerin zamana bağlı değişimleri inceledi. Şekil 5.49'da açılan güneş dişli üzerinde meydana gelen plastik gerinimler görülmektedir.

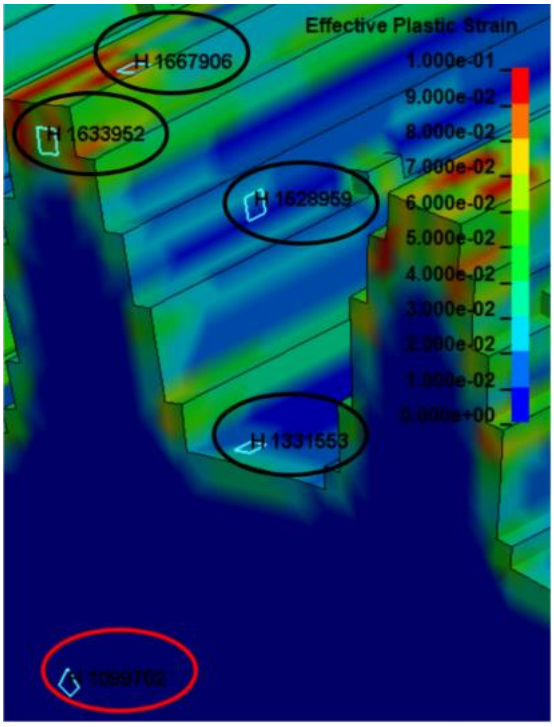


Şekil 5.49. Güneş dişli (AISI 1006 STEEL) üzerinde oluşan plastik gerinimler

Güneş dişlide (AISI 1006 STEEL) meydana gelen plastik gerinim değerlerinin; seçilen elemanlar ile broş tığın teması başladıktan sonra hızlı bir artış gösterdiği, ardından belirli bir değerlere ulaştıktan sonra sabit devam ettiği görüldü. Güneş dişli açma operasyonunda, mevcut broş tığ ile sürekli talaş oluşumunun yüksek hassasiyette ilerlediği tespit edilmiş oldu. Şekil 5.50'de seçilen elemanalar üzerinde oluşan zamana bağlı gerinim dağılımları ve Şekil 5.51'de gerinim zaman ilişkisi göstermek için seçilen elemanlar görülmektedir.

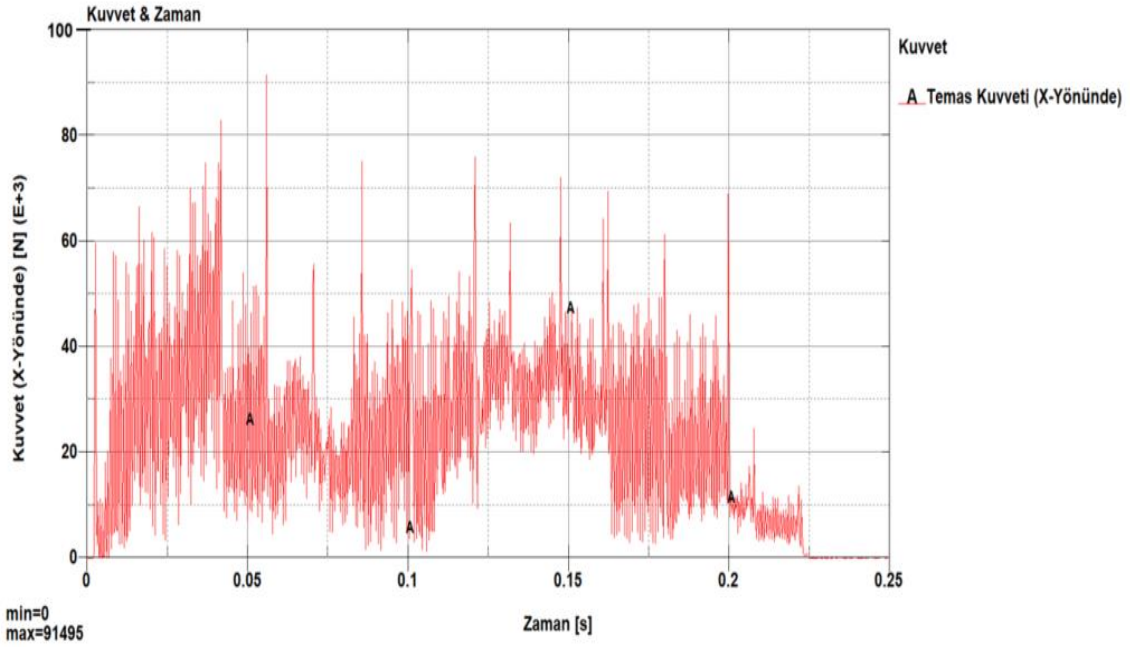


Şekil 5.50. Güneş dişli (AISI 1006 STEEL) üzerinde oluşan gerinimlerin zamana bağlı değişimi



Şekil 5.51 Güneş dişli üzerinde meydana gelen gerinimlerin zamanla değişimin incelendiği elemanlar

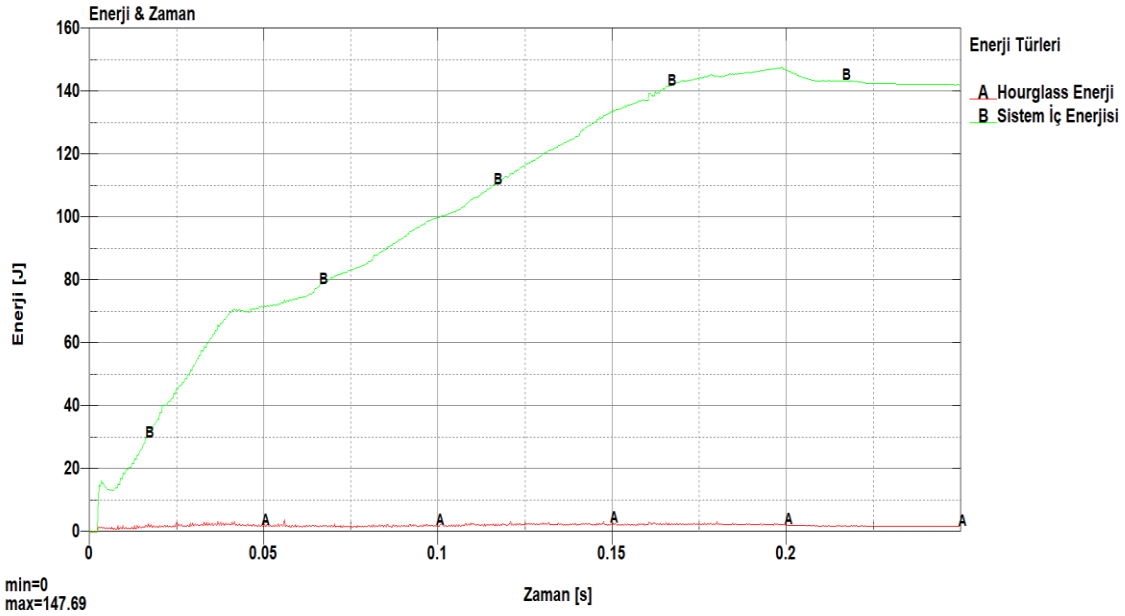
Operasyonda, açılacak 0,46kg ağırlığındaki güneş dişlinin hareket ettiği X – Yönünde, sabit broş ve açılan güneş dişli arasında meydan gelen kontak kuvvetleri, açılacak dişli malzemesini itecek hidrolik aksamın temini açısından, iç yüzey broşlama analizinde olduğu gibi büyük önem arz etmektedir. Bu bağlamda, kontak kuvvetlerini yenebilecek güçte bir hidrolik makine seçilmesi gerekmektedir.



Şekil 5.52. Güneş dişli (AISI 1006 STEEL) ve broş tığ arasında X - Yönünde oluşan kontak kuvvetlerin zamana bağlı değişimi

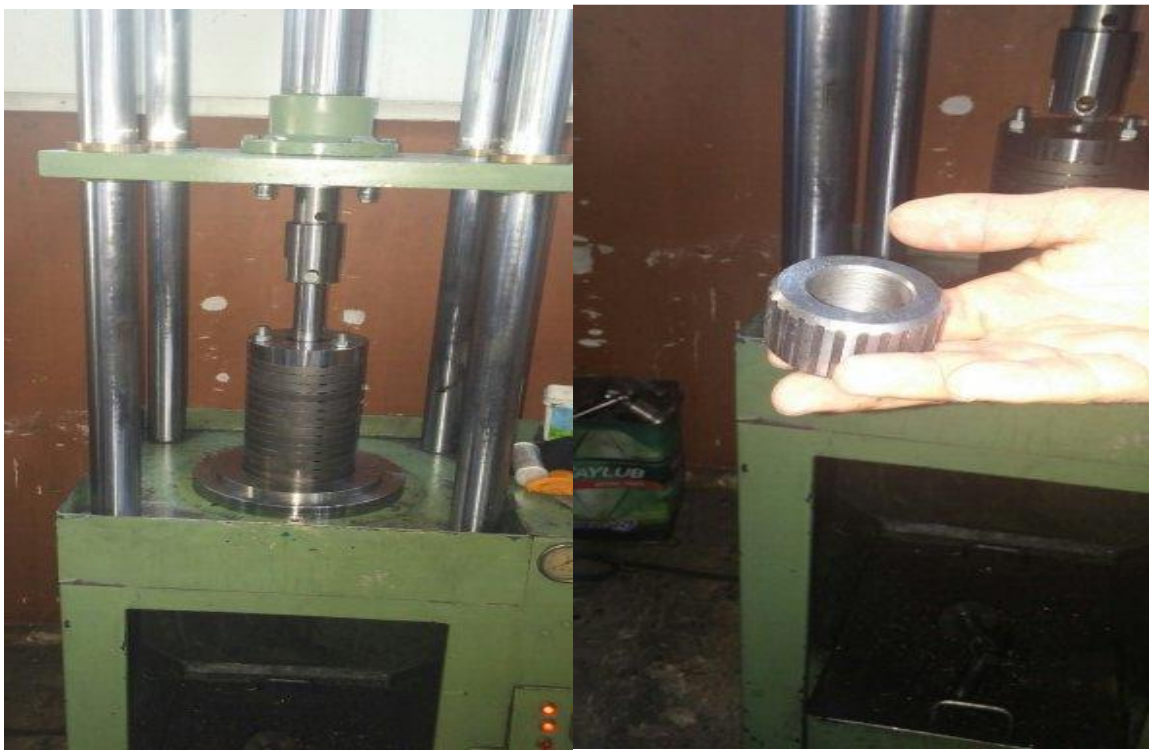
Şekil 5.52' de görüldüğü gibi kontak kuvvetlerinin değeri 92kN değerlerine ulaşmaktadır. Takım tezgâhı gücü açısından sonuç çember dişli açma operasyonunda ki kuvvetler ile karşılaştırıldı ve daha çok kuvvet gerektiren operasyona göre bir seçim yapıldı. Çember dişli açma operasyonunda 582kN gibi bir kuvvet söz konusu iken burada oluşan temas kuvvetleri ona oranla çok düşük kalmaktadır. Bu nedenle kesici takım hidrolik mekanizması 582kN üzeri olarak (~60t'luk güce sahip dikey broş tezgâhı) seçilmelidir.

İç yüzey broşlama analizinde olduğu gibi dış yüzey broşlama analizinde de analizin doğruluğu hakkında, hourglass enerji ile sistemin iç (internal) enerjisini kıyaslayarak bir kanıya varmaya çalışıldı. Hourglass enerji ve sistemin iç (internal) enerjisi aynı grafik üzerinden incelediğinde (Şekil 5.53); hourglas enerjinin, sistemin iç enerjisinin 5%'inden çok daha az olduğunu görülüyor. Bu durum, sonlu elemanlar metodu ile yapılan analizlerin doğru ve gerçeğe çok yakın olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.53. Güneş dişli açma analizinde sistem iç enerjisinin ve hourglass enerjinin zamana göre değişimi

Şekil 5.3 incelendiğinde, analizin doğru ve gerçeğe çok yakın olduğunu açıkça görülüyor. Böylelikle analizden türetilen değer ve önerileri prototip üretimi için gönül rahatlığı ile kullanmak mümkün oldu



Şekil 5.54. İmalatı yapılan prototip takım tezgâhı ile güneş dişli açma operasyonu ve güneş dişli [11]

6. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÖNERİLER

San-Tez projesi (01042.STZ-2011-2) ile koordine bir şekilde ilerlemiş olan, broş kesici takım tasarlamak için dişli açma simülasyonlarını hedefleyen bu çalışmada, fiziksel olarak birçok durumu içeren (elastik ve plastik şekil değiştirme temelli, sürtünme, talaş kaldırma, talaşın kırılması ve büzülmesi, işlenen parça yüzeyinin sertleşmesi vs.) dişli açma operasyonunu kurgulamak için öncelikle dişli açma operasyonunda meydana gelecek durumlar (temas, çarpma, parça kaldırma, talaş kaldırma) ve analizde kullanılacak malzeme modeli ve matematiksel analiz metotları (Explisit (açık) Dinamik Analiz ve Johnson & Cook Malzeme Modeli) tek tek incelenerek, analizlerde kullanıldı.

Çalışmalara, temas – çarpışma analizi ile başlandı (Bölüm 5.1), kurgulanan bu modelin ANSYS Workbench modülü içinde çalışma prensibinin ortaya konması önemliydi. Kurgu yapılırken broş tığın, hareketi sırasında açılacak çember dişliyle olacak temasından – çarpmasından ilham alındı. Malzemede meydana gelen, gerilme ve gerinimlerin dağılımları ile maksimum (kritik) noktada oluşan gerilme ve gerinim davranışlarını incelendi (Şekil 5.11 & Şekil 5.12).

Daha sonra, dişli açma simülasyonunda talaş kaldırma operasyonunun en önemli adımlarından bir tanesi olan, malzemeden parça koparma analizi kurgulandı (Başlık 5.2). Analiz kurgulanırken broşlama işlemi sırasında açılacak dişliden broş tığın talaş kaldırması işleminden ilham alındı. Malzemeden parça kaldırmak için gerekli şartlar (malzemenin kopma gerilmesinin aşılması durumu), analiz modelinin bu kurguda çalışma durumunu ve ANSYS Workbench içinde çözümü incelendi. Parça kopan malzemede meydana gelen, gerilme ve gerinimler; maksimum noktada oluşan gerinim ve gerilmeler, kopma davranışını incelenerek, malzemede meydana gelen değişimler değerlendirildi (Şekil 5.16 & Şekil 5.17).

Yapılan bu iki analiz ile talaş kaldırma operasyonu için temel iki basamak kurgulamış oldu ve ANSYS içerisinde çalışma prensibi kavrandı. Analizleri gerçekleştirirken seçilen model ve analiz ayarları iyice öğrenildi. Kazanımlar ardından, bir nevi iki analizimizin birleşimi olan, sadece bir kesici bıçak kullanılarak, bir yüzeyden talaş kaldırma operasyonunu kurgulandı (Başlık 5.3). Kurgulanan talaş kaldırma operasyon da hareket eden kesici bıçağın, sabit plakaya çarparak, parça kaldırması (koparmasını) hedeflemiştir. Bu hedef tam da daha önce kurgulanan iki analizin birleşimini oluşturmaktadır. Talaş kaldırma operasyonunun çözümü yapıldığında, broşlama işlemi ile dişli açma operasyonunda da hedeflenen şekilde, sürekli talaş oluşumuna ulaşıldı. Talaş kaldırılan plakada meydana gelen gerilme – gerinim değerleri, maksimum noktada oluşan gerilme – gerinim değerleri (Şekil 5.24 & Şekil 5.26), doğrusal deformasyonları (Şekil 5.22) incelendi. Parça kaldırma esnasında (sürekli talaş oluşumu), meydana gelen gerilme dağılımları davranışı, gerinim dağılımları davranışı kavramış oldu.

Talaş kaldırma analizi iyice kavradıktan sonra, artık birkaç yüzeyde aynı anda talaş kaldıran bir sistem olan, broşlama analizine ve simülasyonuna geçildi. Broşlama simülasyonunda, yapılan literatür çalışması sonucu, sürekli talaş çıkaran sistemlerde, en iyi çalışan malzeme modeli olan, Johnson & Cook malzeme modeli kullanıldı. İç yüzey broşlama metodu ile çember dişli açma ve dış yüzey broşlama metodu ile güneş dişli açma analizleri yapıldığında (Bölüm 5.4 & Bölüm 5.5), açılan dişlilerde meydana gelen gerilme ve gerinim dağılımları (Şekil 5.35, 5.38, 5.47 ve Çizelge 5.50), çember dişli açma analizinde, broş tığ ve güneş dişli açma analizimizde açılacak ham güneş dişli malzememizin ilerleyişi ile oluşan (X-Yönü) kontak kuvvetlerin (Şekil 5.40 & Şekil 5.52) analizi yapıldı. Yapılan analizlerin sonucunda elde edilen veri ve yorumlar, San-Tez Proje ortağı olan ANMAK Ankara Makine ve Dişli Sanayi firmasına ve San-Tez izleme jürimize teknik rapor olarak sunuldu. Proje ortağı firmaya sunulan sonuçlar doğrultusunda broş tığlarının üretimi yaptırılarak, broş tezgâhı sağlandı ve yapılan denemelerde, sorunsuzca dişlilerin açıldığı görüldü.

Tez çalışması neticesinde elde edilen veriler doğrultusunda, en genel değerlendirmeler ve öneriler aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

i. Proje başlangıcında yapılan literatür araştırmaları, firmanın tecrübesi ve piyasanın ihtiyacı göz önünde tutularak dizaynı yapılan iç yüzey ve dış yüzey broşlarının, yapılan analizler ve simülasyonlar neticesinde sürekli talaş kaldırarak, hassas ve kaliteli yüzeyler oluşturduğu, diş geometrilerinin dişli açma operasyonları sırasında herhangi bir soruna neden olmadığı görüldü. Çalışma neticesinde, tasarlanan broşların üretilmesinde her hangi bir sorun olmadığı, proje ortağı firmaya teknik rapor ile iletildi.

ii. Yapılan literatür araştırmaları ile dizaynı yapılan broşların için seçilen malzemenin (AISI M2 HSS), herhangi bir deformasyona maruz kalmadan, parça koparabildiği görüldü. Böylelikle tasarlanan broşların AISI M2 HSS (DIN 1.3343 HSS) çeliğinden yapılmasında herhangi bir sorun olmadığı proje ortağı firmaya teknik rapor ile iletildi.

iii. Operasyonlarda kullanılacak broşlama takım tezgâhının, yapılan analizler ile elde edilen sonuçlar doğrultusunda; her iki broşlama operasyonunu da rahatlıkla yapabilecek (582kN~59,35t) güçte seçmesi gerekmektedir. Analiz sonuçlarına bakıldığında prototip için en az 582kN'dan daha büyük güce sahip takım tezgâhına ihtiyaç olduğu görülmektedir. Literatür ve piyasa araştırmaları, 60t'luk güce sahip dikey broş tezgâhlarının piyasada yaygın olarak bulunduğunu, dolayısıyla fiyatlarının da bu bağlamda makul olduğu gösterdi [60]. Broşlama operasyonu için seçilen dikey broş tezgâhın güç özellikleri teknik rapor ile proje ortağı firmaya iletildi.

iv. Operasyon hızı ve talaş oluşumuyla sistemden parçaların uzaklaşmasının etkileri, malzemelerin mekanik özelliklerini etkileyecek derecede sıcaklık oluşumunu meydana getirmez. Operasyonun daha yavaş hızlarda yapılması gerektiği durumlarda, sıcaklık etkisinden korunmak için kesme sıvıları (soğutma sıvıları, yağları vs) kullanılan bir sistemin tasarıma dâhil edilmesi gerektiği teknik rapor ile proje ortağı firmaya iletildi.

v. Yapılan çalışma neticesinde proje ortağı firmaya iletilen teknik raporlar ışığında broş tığlar ürettirilip, hidrolik dikey broş tezgâhı satın alındı ve dişli açma operasyonları sorunsuzca yapıldı.

KAYNAKLAR

[1] State of the Art Broaching, William R. Stott, http://www.geartechnology.com/issues/0811x/broaching.pdf (Şubat, **2018**).

[2] Broaching Machine manufacturing & sale company date, http://www.august-berghaus.de/en/services/broaching-machines/ (Şubat, **2018**).

[3] A New Trend in Broaching Technology, Ken Nemec, http://www.gearsolutions.com/article/detail/5491/a-new-trend-in-broaching-technology (Şubat, **2018**).

[4] KUTAY, M. Güvem, Dişli Çarklar, Genel İsviçre, Baden, 2010, http://www.guven-kutay.ch/disliler/12_00_disliler_genel.pdf (Şubat, **2018**).

[5] MAAG Taschenbuch, MAAG.Zahnräder Aktiengeselschaft CH-8023 Zürich / Schweiz, **2010**.

[6] Richard G., Budynas and Keith J., Nisbett, Shigley's Mechanical Engineering Design, 8th. Edition, McGraw-Hill Companies, **2008.**

[7] Akkurt M., Kent M., Makina Elemanları, Birinci Cilt, 2.Baskı, Birsen Yayınevi, **1986.**

[8] Alsaran A., Makine Elemanları II Ders Notları, T.C. Kars Kafkas Üniversitesi, **2018**.

[9] Anonim, Özel üretim teknikleri, Dişli üretim metotları, https://www.makinaegitimi.com/makine-elemanlari/disli-carklar/disli-cark-uretim-yontemleri.html, (Mart, **2018**)

[10] Kısa M., Özel Üretim Teknikleri, Furkan Ofset, Bursa, **2002**.

[11] Yıldırım B., Yalçın M.K., Ustaoğlu E., 01042.STZ-2011-2 Kodlu San-Tez Projesi Teknik Raporu, Ankara, Eylül, **2015**.

[12] Anonim, Talaşlı İmalatın Tarihçesi, http://dogamak.com/Haber/26/Talasli-imalatin-tarihcesi (Mart, **2018**).

[13] Budynas, Richard G., Advanced Strength and Applied Stress Analysis, Second Edition, McGraw-Hill Companies, **1999.**

[14] Ay, İ. (t.y)., Strain Ölçme Ders Notları, Konstrüksiyon ve İmalat ABD, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, **2016**.

[15] Oxley, P.L.B., "Mechanics of Machining, An Analytical Approach to Assessing Machinability", Halsted Press, New York, **1989.**

[16] Şahin, Y., Talaş Kaldırma Prensipleri-1, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, Türkiye, **2000.**

[17] Astakhov and Shvets, The Assessment of Plastic Deformation İn Metal Cutting, *Journal of Matarial Processing Technology*, Vol. 146, pp. 193-202, **2004.**

[18] Pereira and Lerch, Effects of Heat Treatment on The Ballistic İmpact Properties Of Inconel 719 For Jet Engine Fan Containment Applications, *Int. J. Of Impact Engineering*, Vol. 25, №8, pp. 715-733, **2001.**

[19] LAL G.K., Introductions to Machining Science, Lee and Shaffer 1951, pp. 58, *New Age Internatıonal Publisher*, **2003.**

[20] Lee, An Experimental And Theoretical Investigation for Machining of Hardened Alloy Steel, PhD Thesis in School of grinding force mathematical model, *CIRP Annals Manufacture Technology*, Vol. 29, pp. 245-249, **2001.**

[21] Wen Li, Efficiency of Manufacturing Processes Wince 200 Spring, *International Publishing Switzerland*, **2015.**

[22] Marinov B., Hr. Hristov, G. Voukov, Dynamic Sizing of the Links of a Multi-Cylinder Engine, Reduced to a Two-Mass System, *Mechanics of Machines Magazine*, Vol. 28, №4, **1999**.

[23] Sartkulvanich and Altan, Effects Of Flow Stress And Frıctıon Models In Fınıte Element Sımulatıon Of Orthogonal Cuttıng - A Sensıtıvıty Analysıs, Machining Science and Technology An International Journal Vol. 9, **2005**.

[24] Abukhshim NA, Mativenga PT, Sheikh MA, Heat Generation And Temperature Prediction In Metal Cutting: A Review And Implications For High Speed Machining. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* Vol.46, pp. 782-800, **2006.**

[25] Sadik, M. I. and Lindstrom, B., The Role of Tool–Chip Contact Length in Metal Cutting", *J. Mater. Processing Technol.,* Vol. 37, pp. 613–627, **1993.**

[26] J.E. Childs, A.T. Curns, M.E. Dey, L.A. Real, L. Feinstein, et al., Predicting the local dynamics of epizootic rabies among raccoons in *the United States Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, Vol.97, pp. 13666-13671, **2000**.

[27] Kurt A., Talaş Kaldırma Sırasında Oluşan Kesme Kuvvetleri Ve Mekanik Gerilmelerin Deneysel Olarak İncelenmesi Ve Matematiksel Modellerinin Oluşturulması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2006.**

[28] Şeker, U., Takım Tasarımı Ders Notları, Sayfa 32, **1997**.

[29] Aslantaş, K., Metal Kesme Teorisi Ders Notları, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, Bölüm 7, Sayfa 11, **2009.**

[30] Zorev, N. N., Inter-relationship between shear processes occurring along, tool face and shear plane in metal cutting, *International Research in Production Engineering*, pp.42-49, New York: ASME, **1963.**

[31] Shaw, M.C., Cook, N.H., Smith, P.A., The mechanics of three-dimensional cutting operations, *Transactions of The ASME*, Vol.74, pp. 1055–1064, **1952**.

[32] Merchant M.E., Mechanics of The Metal Cutting Process II. Plasticity Conditions in Orthogonal Cutting, *J Appl Phys* Vol.16, №6, pp. 318–324, **1945.**

[33] Jaspers, S. P. F. C., Metal Cutting Mechanics and Material Behavior, PhD thesis, Technische Universiteit Eindhoven, **1999.**

[34] Boy, M., Kesme Parametrelerine Bağlı Olarak Talaş Arka Yüzey Sıcaklığının Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2004.**

[35] Trent, E.M., Metal Cutting and the Tribology of Seizure: II. Movement of Work Material Over the Tool in Metal Cutting, Wear Vol. 128, pp. 46-64, **1988**.

[36] Shaw, M.C., Metal Cutting Principles, Oxford University Press, London, pp. 594, **1984.**

[37] Young, H.T., and Chou, T.L., Modelling of Tool/Chip Interface Temperature Distribution in Metal Cutting, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 36, №11, pp. 931–943, **1994**.

[38] Lazoglu I., Altintas Y., Prediction of Tool And Chip Temperature in Continuous and Interrupted Machining, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* Vol.42, №9, pp. 1011-1022 197, **2002.**

[39] A.J.R. Smith, J.A. Armarego, Temperature Prediction in Orthogonal Cutting with A Finite Difference Approach, *Annals of CIRP*, **1981**.

[40] İren M., Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Bu Yöntemin Sınır Değer Problemlerine Uygulanması, Nisan, **2018.**

[41] Topçu, M., ve Taşgetiren, S., Mühendisler İçin Sonlu Eleman Metodu, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Denizli, Ders Kitapları Yayın No: 007, Sayfalar 225-230, **1998**.

[42] Fish, J., Belytschko, T., A First Course in Finite Elements, John Wiley & Sons, Chichester, England, pp. 1-9, **2007**.

[43] Ledley, R.S., Huang, H.K., Linear Model of Tooth Displacement by Applied Forces, *J Dent Res*., Vol.47, pp. 427-432., **1968**.

[44] Farah, J.W., Craig, R.G., Finite Element Stress Analysis of a Restored Axisymmetric First Molar. J Dent Res., Vol. 53, pp. 859-866, **1974**.

[45] Güler M.S., Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, **2013**.

[46] Kara F., Yüksek Lisanas Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar, **2010**.

[47] Fevacı, M.C., Sonlu Elemanlar Metodu ile Modellemede Temel Prensipler, *Mühendis ve Makina*, Vol.470, **1999**.

[48] Kurtay T., Sonlu Elemanlar Yöntemine Giriş, İ.T.Ü. Makina Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul, **1980**.

[49] Arıkan M.A.S., Sonlu Elemanlar Metodunun Mühendislikte Uygulamaları, Orta Doğu Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, **2018.**

[50] Asmussen, E., Peutzfeldt, A., Class I and Class II Restorations of Resin Composite: An FEM Analysis of The Influence of Modulus of Elasticity on Stresses Generated by Occlusal Loading, *Dent Mater*., Vol. 24, pp. 600-605, **2008**.

[51] Knight, C.E., The Finite Element Method in Mechanical Design, PWS-KENT Publishing Company, Boston, **1993.**

[52] RADIOSS, Radioss Theory Manual 13.0, Large Displacement Finite Element Analysis, USA, **2014.**

[52] Liyan, Y.E., Xifeng, L.I., Chen, J., Numerical Simulation And Experimental Study Of 304 Metastable Austenitic Stainless Steel in Cup Drawing, *National Engineering Research Center of Die & Mold CAD*, Shangai Jiao Tong University, **2013**.

[53] Björkström, D., Farkas, L., FEM Simulation of Electrohydraulic Forming, Kungliga Tekniska Högskolan, Vol.T-03, **2008.**

[54] R.M'Saoubi, High-Speed Shear Tests for The İdentification of The Johnson–Cook, ENSAM-Paris: PhD. Thesis; **1998**.

[55] Bathe, K.J., Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall Inc.,USA, **1982**.

[56] Ugural, A.C., and Fenster, S.K., Advanced Strength And Applied Elasticity, 3rd Edition, Printice Hall, New Jersey, pp. 28-31, **1995.**

[57] Belytschko T., Shau-Jen Ong J., Kam Liu W., Kennedy J. M., Hourglass Control In Linear And Nonlinear Problems, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 43, Issue 3, pp. 251-276, **1984**.

[58] Çayıroğlu İ., Bilgisayar Destekli Tasarım ve Analiz (ANSYS), Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Karabük, Nisan, **2018**.

[59] Özdemir N.Ö., Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yorulma Mekaniği ve Uygulamaları, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bitirme Çalışması, Trabzon, **2009**.

[60] Hidrosan Hidrolik Makine Sanayi Dikey Broş Tezgâhı (60t), https://makinecim.com/ilan_363899_60-Ton-Bros-Presi (Mayıs, **2015)**

[61] Kronenberg, M., Machining Science and Application – Theory and Practice fo Operation and Development of Machining Processes, 1st Edtion, Pergamon Press, UK, **1966.**

[62] Astakhov, V.P., Tribology of Metal Cutting, 1st Edition, ELSEVIER, UK, **2006.**

EKLER

A. SAN-TEZ Proje Onaylı Teknik Sonuç Raporu İçerik Özeti:

T.C.

BİLİM, SANAYİ ve TEKNOLOJİ BAKANLIĞI

BİLİM ve TEKNOLOJİ GENEL MÜDÜRLÜĞÜ

SAN-TEZ

PROJE TEKNİK SONUÇ RAPORU

PROJE KODU	01042.STZ-2011-2
PROJE ADI	Broş Kesici Takımları ve Broş Tezgâhı Tasarımı ve Prototip Üretimi
PROJE YÜRÜTÜCÜSÜ	Prof. Dr. Bora YILDIRIM
PROJE TEZ ÖĞRENCİSİ	Müh. Metin Koray YALÇIN
PROJENİN YÜRÜTÜLDÜĞÜ ÜNİVERSİTE	HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
PROJE ORTAĞI FİRMA	ANMAK ANKARA MAKİNA VE DİŞLİ SANAYİ - ENGİN USTAOĞLU

A. Projenin Çıktıları

A1. Yazılı Ürünler

Proje süresince toplam 3 adet teknik rapor yazılmıştır. Teknik rapor ANSYS ve LS-DYNA yazılımları yardımı ile yapılan simülasyonların teknik yorumlarını içermektedir. Prototip dizaynına ışık tutmuştur.

A2. Proje Sonunda Ortaya Çıkan Ürün Hakkında Bilgiler

Projede hedeflenen broş kesici takımları ve broş tezgâhı tasarımı ve prototip üretimi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Bu üretimlerle ilgili yapılmış olan AR-GE çalışmaları ve deneyimler çok başarılı olduğu gibi üniversite ve firma açısından önemli kazanımlar elde edilmiştir. Projede üretimi hedeflenen Broş Tezgâhı; Hidrolik, Yatay ve Dikey Sistemli olarak imal edilmiş ve sorunsuz şekilde çalışmaktadır. Bu tezgâhların imalatı firmanın öz kaynakları ile gerçekleştirilmiş olup, daha da geliştirilmesi için çalışmalar sürdürülmektedir. Broş Kesici Takımların imalatında çok başarılı neticeler elde edilmiş olduğu gibi, prototip üretimin dışında çok hassas ve özellikli broş kesici takımların imalat çalışmaları sürdürülmektedir.

A3. Firma Tarafından Sağlanan Faydalar

Broş tığı ve tezgâhı üretimi hakkında uzmanlaşma sağlanmış olup yan ihtiyaçlar giderildikten sonra yurtiçi ve yurtdışı pazarlara açılabilme konusunda önemli adımlar atılmıştır. Projenin bakanlıkça belli bir süre durdurulması ve bütçesinde kesintiye gidilmesi nedeniyle bazı zorluklar yaşanmış olmasına rağmen proje başarıyla gerçekleştirilmiş ve oldukça iyi netice alınmıştır. Proje firmaya önemli faydalar sağlamıştır. Broş Tezgâhı ve Broş Kesici Takımları(tığları) imalatında çok önemli deneyimler kazanan firma, ileri teknoloji ürünü olan bu üretimleri kendisi yapar konuma gelmiştir. İç ve dış piyasaya dişli üretimi yapan firma bu teknoloji ile daha seri daha kaliteli ve üretim maliyeti düşük dişli üretimine kavuşacaktır. Bu üretimlerle ilgili broş kesici takımlarının imalatı devam etmektedir. Firma, piyasanın ihtiyacı olan her türlü broş (tığlarını) yapar konuma geldiği gibi, broş tezgâhlarını da CNC kontrollü olarak yapacak duruma yaklaşmış bulunmaktadır. Bu konudaki AR-GE çalışmaları devam etmektedir. Bu üretimlerin devreye girmesi ile firma satışlarında 40-50% oranında bir artış olması beklenmektedir.

A4. Proje Çıktısının Ticarileşmesi Hakkında Bilgiler

Proje çıktıları henüz ticarileşmemiştir. Proje çıktısına iç ve dış piyasada çok ihtiyaç bulunmakta ancak fiyatlarının çok yüksek oluşu nedeni ile her firma sahip olamamaktadır. Firmamızın amacı ve şu anki çalışmaları öncelikle kendi üretimlerinde kullanmak suretiyle her türlü testten geçirildikten sonra piyasaya sunulması yönündedir.

A5. Üniversite Tarafından Elde Edilen Kazanımlar

Öncelikle yüksek lisans öğrencisinin yaptığı broşlama simülasyonu sayesinde danışman hocamız ve tez öğrencisi explisit (açık) dinamik programının kullanımını ileri düzeyde öğrenmiştir. Bu bilgi diğer öğrencilere de aktarılacaktır. Tez öğrencisi, danışman ve firma işbirliği sayesinde bir broşlama tezgâhı prototipi ortaya konulmuştur. Böyle bir tezgâhın dizaynı ve ortaya çıkarılması oldukça zor ve meşakkatlidir dolayısıyla firmanın tecrübelerinden çokça yararlanılmıştır.

A6. Firma Görüşü

Öncelikle üniversite ile işbirliği içinde çalışmanın kazanımları, kolaylaştırıcı unsurları ve akademik desteğin önemi kavranmıştır. Özellikle Amerika'da uygulanan bu yöntemin doğruluğu bizzat tecrübe edilmiştir.

Teknik olarak yeni bir fikir üzerinde çalışmanın birçok kazanımı olmuştur. Proje üzerinde ilerledikçe yeni fikirler oluşmuş olup ürün tasarımı konusunda uzmanlık kazanılmıştır.

Sorun çözme yeteneği gelişmiştir. Her çıkan zorlukta yeni ufuklar açılmış olup ticari kazanç sağlayacak yeni iş fikirleri de oluşmuştur. Proje aşamasında tasarlanan düşüncelerin gerçeğe dönüşmesiyle ayrı bir motivasyon oluşmuştur.

Firmamız; dâhili dişli açmada en ileri teknoloji olup, üretimi oldukça zor ve hassas olan projede çıktımızı başarıyla gerçekleştirmenin kıvancını yaşamaktadır. Kısıtlı bir zaman ve bütçe ile gerçekleştirdiğimiz prototip üretimlerden oldukça iyi neticeler almış olduk. Ancak bunlardan çok daha önemlisi, edinmiş olduğumuz bilgi birikimi ve öz güvenle çok daha gelişmişlerini yapacak duruma gelmiş olmamız ve bu güveni taşımamızdır. Başlangıçta kendi üretimimize önemli katkılar sağlayacak olan bu proje çıktıları, seri üretime geçildiğinde başka imalatçı firmalara ve ülke ekonomimize büyük kazançlar sağlayacaktır.

A6.1. Çıktıların Proje Ortağı İhtiyacını Karşılama Durumu

Henüz proje aşamasında tasarlandığı andan itibaren dışa bağımlılığı azaltma yolunda önemli adımlar atılmıştır. İmalat sürelerinde önemli kazançlar sağlanmış ve üzerinde çalıştıkça daha da geliştirilecek bir konu olduğu kavranmıştır.

Bu teknoloji, firmamızın çok arzu ettiği fakat fiyatlarının yüksekliği nedeniyle üretime sokamadığı yeni üretim aracıydı. Projemiz ile ortaya çıkan ürünün; yurtiçi ve yurtdışındaki fabrikalara seri üretimini yaptığımız dâhili (iç) dişlilerin imalatında kullanılması hedeflenmektedir. Bu teknolojiye geçilmesi ile firmanın üretim kapasitesi oldukça artacağı gibi, üretim maliyeti düşecek ve rekabet şansı yükselecektir. Firma imalatların bu teknolojiye geçmek için üretimini yaptığı dişliye göre broş kesici tığlarını yapması gerekmektedir. Yüksek adetli işlerden başlayarak bu tasarım ve imalatları devam etmektedir.

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı	: Metin Koray YALÇIN
Doğum Yeri	: Ankara
Medeni Hali	: Bekar
E-posta	: mky@mkygrup.com
Adresi	: Kavaklıdere Mah. Esat Cad. Kozlar İş Merkezi No:61 Kat 1 No:18 Çankaya - Ankara / TÜRKİYE (MKY Mühendislik Maden Makine San. Ve Tic. Ltd. Şti.)

Eğitim

Lise	: Ankara Keçiören İncirli Lisesi
Lisans	: Hacettepe Üniversitesi - Maden Mühendisliği Bölümü

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce	: İyi Seviye

İş Deneyimi

Team Prevent İş Sağ. ve Güv. Ltd. Şti.	(2011 - 2013)	İş Güv. Uzmanı
PROIS İş Sağ. ve Güv. Hizmetleri	(2013 - 2014)	Projeler Koor.
MKY Mühendislik Mad. Mak. Ltd. Şti.	(2014 -)	Kurucu

Deneyim Alanları

Maden Mühendisliği Alanı
Cevher Hazırlama (Kırma, Öğütme, Serbestleştirme, Tane karakterizasyonu)
İş Sağlığı ve Güvenliği (B Sınıfı İş Güv. Uzmanı)
Kalite (Baş Denetçi)
Çevre (Çevre Görevlisi)
Enerji (Dünya Enerji Konseyi – Türk Milli Komitesi Üyesi)

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

Proje Türü	: San-Tez Projesi
Proje Kodu	: 01042.STZ-2011-2
Proje Adı	: Broş Kesici Takımlar ve Broş Tezgâhı Tasarımı ve Prototip Üretimi
Bütçe	: 886.900,00-TL

Tezden Üretilmiş Yayınlar
-

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar
-

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 29/05/2018

Tez Başlığı / Konusu: BROŞ KESİCİ TAKIMLARIN DİZAYNI İÇİN DİŞLİ AÇMA SİMÜLASYONU

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 141 sayfalık kısmına ilişkin, 04/05/2018 tarihinde tez danışmanım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %5 'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

1- Kaynakça hariç
2- Alıntılar dahil
3- 5 kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

29.05.2018

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

Adı Soyadı:	Metin Koray YALÇIN
Öğrenci No:	N10228117
Anabilim Dalı:	Makina Mühendisliği ABD
Programı:	Makine Mühendisliği
Statüsü:	☒ Y.Lisans ☐ Doktora ☐ Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Prof. Dr. Bora YILDIRIM

Unvan, Ad Soyad, İmza)