

**Döküm Poliamid (Kestamid) Dişlilerin Yorulma Ömürlerinin  
ve Aşınma Davranışlarının Belirlenmesi**

**Program Kodu: 1001**

**Proje No: 110M690**

**Proje Yürütücüsü:  
Dr. Hilal CAN**

Araştırmacı:  
Dr. Fatih Cemal CAN

Bursiyerler:  
Berkant DİNDAR  
Samet REÇEL

EYLÜL 2015  
DENİZLİ

## ÖNSÖZ

**Bu proje kapsamında son yıllarda kendinden yağlamalı özelliği ile dikkati çeken kestamid dişlilerin yorulma davranışları incelenmiştir. Plastiklerin dökülebilmeleri için belli bir basınç gerekmektedir. Atmosfer koşullarında da dökülebilen plastik türü olan Kestamidler diğer plastiklere göre yüksek mukavemet değerlerine sahiptir. Proje TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.**

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	ii
ÇİZELGELER LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	3
3. BS 6168 STANDARDINA GÖRE EĞİLME GERİLMESİ HESABI	11
4. ANSYS'DE MODELLEMENİN YAPILMASI	18
5. DENEYLER	27
5.1. FZG Dişli Test Cihazı Tasarımı	27
5.2. Deney Sonuçları	30
6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	36
KAYNAKLAR	38

## ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 1. Dişli yapımında kullanılan plastiklerin çeşitli mekanik özellikleri	1
Çizelge 2: BS 6168 standardından elde edilen çeşitli teğetsel kuvvete göre sınır çevrim sayıları	14
Çizelge 3. Poliamid 6-çelik dişli kombinasyonu için hesaplar	15
Çizelge 4: Poliamid- Polioskimetilen(asetal) dişli çiftinin çeşitli diş sayısı, devir sayısı, modül durumlarında ömür değerleri	16
Çizelge 5: Hesaplamalarda kullanılan malzeme özellikleri	17
Çizelge 6: BS6168'e göre ömür değerleri ve diş dibi gerilmeleri	17
Çizelge 7. Modifiye edilmiş dişlilerin ve modifiyesiz dişlinin ANSYS analizi	26
Çizelge 8: Düz deney dişlilerin özellikleri	30
Çizelge 9: HDPE düz dişli deney verileri	30
Çizelge 10: Deney dişlilerinin çevrime bağlı olarak 750 d/dk hızdaki sıcaklık değerleri	32
Çizelge 11. Kestamid numunelerin yorulma değerleri	34
Çizelge 12. BS 6168 standartına göre teorik hesaplama ve ANSYS simülasyon sonuçları	35

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Yağlamasız PA66 dişlinin çelik eş dişli kombinasyonu ile Wöhler diyagramı	11
Şekil 2. Yağlamasız POM dişlinin çelik eş dişli kombinasyonu ile Wöhler diyagramı	12
Şekil 3. Düz dişlinin detay resimleri	18
Şekil 4. ANSYS analizinde kullanılan delikli numuneler	19
Şekil 5. Diş boyunca ve dik yönde deliklere sahip dişlinin bir dişindeki delikler ve konumları	19
Şekil 6. 2000 N'luk teğetsel yükte kestamid dişlinin ömrü	20
Şekil 7: Diş boyunca 3 mm tek delikli numunenin çeşitli yüklemelerde ANSYS analizi	21
Şekil 8: Diş boyunca 2 mm ve 4 mm iki delikli numunenin çeşitli yüklemelerde ANSYS analizi	22
Şekil 9: Diş boyunca 3 mm ve 5 mm iki delikli numunenin çeşitli yüklemelerde ANSYS analizi	23
Şekil 10: Diş genişliği boyunca 2 mm delikli numunenin çeşitli yüklemelerde ANSYS analizi	24
Şekil 11: Deliksiz numunenin çeşitli yüklemelerde ANSYS analizi	25
Şekil 12: Dişli test cihazının şematik görünümü	27
Şekil 13: Deney düzeneğinin görünüşü	28
Şekil 14 Kapline açılan kama kanalları	29
Şekil 15. Hasara uğramış HDPE dişli	31
Şekil 16: 28,86 ve 20,6 Nm için çeşitli pozisyon değişiminin meydana geldiği çevrim sayıları,	31
Şekil 17: Deney dişlilerinin çalışma sıcaklık değişimi	32
Şekil 18. Deneylerde kullanılan kestamid numuneler	33
Şekil 19. Wöhler eğrileri	35

## **ÖZET**

**Bu projede, kendinden yağlamalı özelliklere sahip Kestamidden üretilmiş dişlilerin yorulma dayanımları incelenmiştir. Kestamid atmosfer koşullarında dökülebilen bir poliamid türüdür ve döküm poliamid adı ile anılmaktadır. 25 tane dişli ile yapılan deneylerde belirli pozisyon değişimleri için çevrim sayıları bulunmuştur. Deneyler esnasında bir diğer projede tasarlanmış dişli test cihazı kullanılmıştır. Deney sonuçları teorik hesaplamalar ve ANSYS sonuçları ile karşılaştırılmıştır. ANSYS'deki modellemede ve BS 6128 standardına göre yapılan teorik hesaplamalarda kestamide ait veriler olmadığı için modelleme ve hesaplamalar Poliamide göre yapılmıştır. Kestamid dişlilerde en belirgin olarak dişliler çalışırken ısı oluşumunun yüksek olmamasıdır. Polyamide göre yüksek yorulma dayanımı değerleri elde edilmiştir. ANSYS ile elde edilen sonuçlarla deney sonuçları uyumludur.**

**Anahtar Kelimeler: Kestamid, Döküm Poliamid, Yorulma**

## **ABSTRACT**

**In this project, fatigue strength of gears made of CESTAMIDE, which is self-lubricated polymer, investigated. Atmospheric conditions and the cast polyamide Cestamide with the name of a type called a cast-polyamide. In the experiments with 25 different gears were tested a several the position changes. Another project, designed gear tester was used during the experiments. ANSYS experiment results and the theoretical calculation results were compared. In the ANSYS modeling and theoretical calculations made in accordance with BS 6128 is not cestamide data for modeling and calculation, since the calculations made by based on the polyamide. Cestamide running gears gears as the most significant heat generation is not high. Polyamide higher than the fatigue strength values were obtained. Experimental results are consistent with the results obtained using ANSYS.**

**Keywords: Cestamide, Cast Polyamide, Fatigue**

## 1. GİRİŞ

Kestamid poliamid monomerlerinin caprolactam ile polimerizasyonu ile oluşmaktadır. Dişli üretiminin döküm yönetmi ile üretilmesi mümkündür ancak ilk kalıp maliyeti yüksektir. Bunun yanı sıra her bir modül ve diş sayısına göre yeni kalıpların gerekliliği maliyet açısından önemlidir. Çalışma esnasında tek modül ve tek diş sayısında deneyler gerçekleştirilecek olmasına rağmen kullanılacak dişli sayısının oldukça az olması nedeni ile talaşlı imalat ile üretim tercih edilmiştir. Öncelikli amaç kestamid dişlilerin yorulma davranışlarını belirlemektir. Ayrıca uygun sıcaklık ve proses verileri üretici firmalarca gizli tutulmakta, laboratuvar ortamında dökümü gerçekleştirmek için kimya alanında uzman ile denemeler yapılarak uygun şartların belirlenmesi gerekmektedir.

Kestamidin en önemli özelliği sertliğinin ve darbe mukavemetinin yüksek olmasıdır. Kestamid, metallere nazaran oldukça ucuzdur. Bunların yanı sıra sürtünme katsayısının düşük olması ve ekonomik olması metallere ikame bir ürün olmasını sağlar. Kimyasal dayanımın iyi olması ve kolay işlenebilmesi ayrıca artı bir özelliktir. Bu özellikleri sayesinde döner ve kayar hareketli makine parçalarının ve ekipmanların yapılmasında demir, çelik, alüminyum, bronz ve birçok plastiğin yerini almıştır. Kestamidlerin ergime sıcaklıklarının poliamidlere göre daha düşük olması nedeniyle kestamidler daha iyi dayanım ve tokluk değerlerine sahiptir. Çizelge 1’de poliamid esaslı dişlilerin çeşitli özellikleri verilmiştir.

Çizelge 1. Dişli yapımında kullanılan plastiklerin çeşitli mekanik özellikleri

Malzeme	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Akma Dayanımı (MPa)	Çekmede elastisite modülü (GPa)	Çekmede kopma uzaması (%)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Eğilmede elastisite modülü (GPa)
Poliamid 6	1120-1140	62-90	1,4-2,8	100-320	34-97	2,8
Poliamid 6/6	1130-1150	76-83	2,6-3,2	60-300	41-110	21,4-4,1
Kestamid	1150	55-85	1,7-3,5	25-50		

Kestamid malzemeler, dişli malzemesi olarak da sıkça kullanılmakla birlikte kestamid konusundaki çalışmalar 2000’li yılların ortalarından itibaren başlamıştır. Genel anlamda plastik dişlilerin hesap yöntemlerinde belirli kabullerle hesaplamalar yapılmaktadır. Bu yöntemlerden biri olan BS 6168 standardında da belirli devir sayısı ve ilerleme hızı ile polioksimetilen (POM-asetal) dişliler ve poliamid 6 dişlilerin çelik eş dişli ile çalışmaları



durumlarında Wöhler eğrileri elde edilmiştir. Çalışma içerisinde BS6168 standardına göre hesaplanan değerler yer almaktadır.

ANSYS'de modellenen deney numunelerinin pek çok mekanik özelliğini tahmin edebilmek mümkündür. ANSYS'de çeşitli durumlar için modelleme yapılarak deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Dişliler güç ve hareket iletim elemanlarıdır. Dişlilerin hasar mekanizmaları diş dibinden kırılma, yorulma ve aşınma şeklinde oluşmaktadır. Dişli malzemeleri kullanım yerlerine göre dökme demir, çelik, alüminyum, plastik gibi malzemelerden oluşabilmektedir. Plastik dişliler, korozyona dayanıklıdırlar, hafiftirler kolay üretilebilirler ve yağlama olmaksızın çalışabilirler. Bu avantajlar plastik dişlilerin kullanım alanlarını arttırmaktadır. Özellikle korozyona uğramamaları ve yağlamasız çalışabilmeleri gıda endüstrisinde, bunun yanı sıra gürültünün ön plana çıktığı ev ve ofis araçlarında sıkça kullanılmaktadırlar. Plastik dişlilerin bahsedilen avantajlarına rağmen kullanımlarını sınırlayan en önemli dezavantajı ise dayanım değerlerinin düşük olmasıdır. Plastik dişlilerin düşük dayanım değerlerini arttırmak için literatürde yapılmış çalışmalar boyutsal değişiklikler ve malzemeye dayalı değişiklikler şeklinde iki ana başlık altında toplanabilir Can (2004).

### 2.1 Boyutsal Değişiklikler

Boyutsal değişiklikler, dişlinin temel büyüklüklerinin değiştirilmesi yada tamamen profilin değiştirilmesi şeklinde olabilir. Plastik dişlilerin ömrünü arttırmak amacıyla yapılabilecek en basit çözüm aynı yüke maruz kalacak daha büyük bir dişli yapmaktır. Boyutların büyütülmesi sadece modülün büyütülmesi anlamında değildir. Modülün büyütülmesi dışında basınç açısının düşürülmesi ile de diş dibi kalınlığı değiştirilebilmektedir. Silecek motoru tasarımında dişli profili değiştirilerek yorulma dayanımının arttığı belirlenmiştir. Plastik dişli çarkın dişleri daha kalın ve daha geniş olarak düşünülerek dişli kutusunun %50 daha fazla moment taşıması sağlanmıştır Birley vd. (1988).

Diş modifikasyonunun temas anında dişe gelen yüklere göre, temas çizgisi boyunca kalınlığın artırılması prensibine göre yapılan çalışmada diş boyunca ısının düştüğü ve ısıl yorulmanın ortadan kalktığı belirlenmiştir. Poliamid dişlilerde havalandırma kanalları açılarak yapılan çalışmada dişte oluşan sıcaklıkların düştüğü ve ısıl yorulmanın oluşmadığı bulunmuştur Düzcükoğlu (2009a, 2009b).

### 2.2 Malzemeye Dayalı Değişiklikler

Malzemeye dayalı değişiklikler ise yüksek dayanımlı malzeme seçilmesi ya da takviye malzeme kullanılması şeklindedir.

### **2.2.1 Yüksek Dayanımlı Malzeme Seçimi**

Dayanımı daha yüksek bir malzemenin kullanılması ile yorulma dayanımında artış gözlenmektedir. Ancak bu çoğu zaman fiyat artışını da beraberinde getirmektedir Can (2004).

SKP (sıvı kristalli plastik) dişliler enjeksiyon kalıplama yoluyla üretilmiş, dişli ömrü, dişlerdeki aşınma, diş profili değişimleri ölçülerek, poliasetal dişlilerin aynı şartlarda test edilmesi ile elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Dişlilerde kullanıldıklarında mükemmel performans gösteren yüksek mekanik dayanımlı MC polimidin (nylonun) ömür, aşınma deneyleri yapılmıştır. Nylonun diğer bir çeşidi olan MXD 6 naylon için de eğme yorulması deneyleri gerçekleştirilmiştir. Poliimid dişliler ile yapılan deneyler bu dişlilerin yüksek sıcaklık ortamlarında mükemmel özellikler gösterdiklerini ortaya koymuştur. Bu dişlilerin üretim maliyetlerinin fazla olması nedeniyle yüksek dayanım, iyi bir ısı dayanımı ve ekonomik olan aramidlerle yapılan dişlilerle aynı deneyler yapılarak bu iki malzemeye ait tasatım verileri tanımlanmıştır. Deneyler iki atmosferik çevrede oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir Tsukamoto vd., (1993, 1995a, 1996)

### **2.2.2 Takviye Malzeme Kullanımı**

Takviye malzeme kullanımı farklı bir plastiğin ana malzemeye takviyesi ve farklı malzemenin takviyesi şeklinde olduğu belirlenmiştir. %50 poliasetal ve %50 poliüretan içeren malzemedan yapılmış dişlilerin poliasetal dişlilerden daha düşük gürültülü çalışmasına rağmen dayanım açısından bir artış sağlanmamıştır. Poliamid 6 ve SKP oluşan kompozitin düşük yüklemelerde iyi performans gösterdiği, optimum SKP oranı, ergiyik için optimum sıcaklık bulunmuştur. %30 SKP içeren poliamid 6' ya epoksi ilavesi ile asetal dişlilere göre 1,2 katlık dayanım artışı tespit edilmiştir. %10' dan daha fazla oranda başka bir plastikte takviye edilen poliamidin gürültüyü azalttığı ancak diş aşınması ve ömürlerinin azaldığı belirlenmiştir. Politetrafloretillen (PTFE) takviyesi yapılan poliamid 66 ve poliasetalin aşınma ve sürtünme performanslarının takviyesiz polimerlere göre daha üstün olduğu belirlenmiştir. PTFE takviyesi kullanımıyla takviyesiz poliamid 66' da görülen yüzey kırılması engellenmekte ve sürtünme düşmektedir Tsukamoto vd. (1991, 1995b); Kurokawa vd. (1999); RAO vd.(1998).

Ek malzeme takviyesi olarak en fazla takviye malzeme olarak karbon elyaf ve cam elyaf kullanılmaktadır. %30 karbon elyaf takviyeli poliamid, %35 cam elyaf takviyeli poliamid ve

%35 cam elyaf takviyeli MoS2 içeren poliamid ve takviyesiz poliamiddan yapılmış dişliler belli test karakteristikleri altında deneye tabi tutulmuş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda 20-45 Nm arasındaki momentlerin 10 milyon devirden fazla devir sayıları için plastik dişliler yoluyla iletilebileceği, yağlama şeklinin yorulma dayanımını oldukça etkilediği, cam elyaf takviyeli poliamid dişlilerin çelik dişlilerle eşlenmelerinde kabul edilemez aşınma olduğu, MoS2 ilavesinin aşınmayı azalttığı ve karbon elyaf takviyesinin kabul edilebilir aşınmayla yüksek moment iletimine izin verdiği bulunmuştur. Naylon 6 dişlilerin karşılaştırmalı yorulma dayanımları incelenmiştir. Farklı takviyelerle enjeksiyon kalıplama ile üretilmiş naylon 6 dişlilerin Wöhler eğrileri çeşitli yağlama durumları altında (kuru, gres, püskürtme ile yağlama) ve farklı eşleme kombinasyonları (plastik/plastik ve çelik/plastik dişliler) için belirlenmiştir. Tsukamoto ve arkadaşları, poliasetal ana malzemeye cam elyaf, karbon elyaf ve potasyum titanat takviyeleri ile elde edilen kompozit dişlilerde diş aşınması, diş yüzeyindeki sıcaklık, diş profilinin değişimi ve gürültü seviyesini incelemişlerdir. Polikarbonat dişlilerde çeşitli takviyeler ve poliasetele rijitliği artırırken kaymayı düşüren talk takviyesi ile yorulma dayanımlarındaki değerlerin değişimi incelenmiştir Crippa ve Davoli (1995); Gosavi ve Chikate (1996).

Polipropilen matriks içerisine enjeksiyon kalıplama öncesi çekilip, enjeksiyon yapıp katılma gerçekleşikten sonra bırakılan yaylar ile diş dibine belli miktarda öngerilme oluşturulması düşünülmüştür. Takviyeli ve takviyesiz olarak üretilmiş dişliler dakikada 45 devir yapan test cihazında deneye tabi tutulmuş ve aynı gerilme genliği altında öngerilmeli dişlilerde 30 kata kadar ömür artışı elde edilmiştir. Öngerilme verilmeksizin yapılan yay takviyesi ile statik mukavemetinin %30' a kadar arttığı tespit edilmiştir Can (2004).

Plastiklerin çoğu, çatlağın yayılmasından değil; iç sürtünmeden meydana gelen ısı ve bu ısının iletilmemesi nedeniyle malzeme bünyesinde oluşan yumuşama ile hasara uğramaktadır. Plastiklerin iletilmemesi nedeniyle malzeme bünyesinde oluşan yumuşama ile hasara uğramaktadır. Plastiklerin viskoelastik özelliğinden dolayı değişken zorlamalarda gerilme ile şekil değiştirmeler aynı fazda değildir; şekil değiştirmeler gerilmelerin gerisinde kalmaktadır. Faz farkının değeri plastiklerin cinsine göre büyük ölçüde değişmektedir. Gerilme ile şekil değiştirme arasındaki faz farkının sonucu olarak her yük tekrarlanmasında, uygulanan mekanik enerjinin bir bölümü ısıya dönüştürülüp kaybolmaktadır. Bu kayıp histerezis kaybını ifade etmektedir. Her yük tekrarlanmasında meydana gelen ısı histerezisinin büyüklüğü, uygulanan gerilmeye ve malzemenin kayıp uygunluğuna ( $j_2$ )bağlıdır. Plastikler düşük ısı iletkenliğine sahip olduklarından tekrarlanan yüklemelerde

oluşan ısının büyük bir kısmı dışarıya iletilmekte ve her yük tekrarlanmasıyla kalan ısılar toplanmaktadır. Malzemede ısının oluşumu, sıcaklığın belirli bir değere yükselmesinden sonra oluşan ısı; kondüksiyon, konveksiyon ve radyasyon ile dışarıya iletilen ısı ile eşitlenirse; ısı dengesi kurulur ve sıcaklık sabit kalır. Bu durumda sıcaklığın etkisi altında malzeme dayanımında ve rijitliğinde bir azalma meydana gelir; ancak malzeme düşük değişken gerilmeleri taşıyabilir. Oluşan ısı, dışarıya iletilen ısıdan daha büyük olduğunda sıcaklık devamlı artar. Sıcaklığın belli değerinde, malzeme değerleri bozulur, yükü taşıyamaz hale gelir ve hasara uğrar. Buna ısıl yorulma veya yumuşama hasarı denir. Yüksek kayıp uygunluğuna ( $j_2 > 0,5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$ ) sahip plastikler, ısıl yorulma göstermektedirler. Bu guruba polipropilen, polietilen ve naylon girmektedir Kohan (1995).

Naylonun (poliamid, PA), en önemli dezavantajı su emme özelliğinin yüksek olmasıdır, bu naylonun özelliklerini ve boyutsal kararlılığını etkiler. Cam takviyesi bu problemi düşürür ve mükemmel dayanım değerleri ile birlikte darbeye dayanım getirir. En düşük kristalinite derecesine sahip olan naylon 6, en kolay işlenebilen poliamidir. Naylonun çok iyi yorulma dayanımı, iyi sürünme dayanımı, düşük sürtünme katsayısı ve oldukça iyi darbe dayanımı (kristalinite derecesine bağlı), iyi kimyasal dirençleri ve elektrik özellikleri vardır. Polimerizasyon sırasında kontrol edilebilen kristalinite derecesi naylonun rijitliğini, dayanımını ve ısıya karşı dayanıklılığını etkiler. Genellikle düşük kristalinite derecesi tokluğu, uzamayı ve darbe dayanımını yükseltir, fakat çekme dayanımı ve rijidliği azaltır. Önemli bir naylon çeşidi, kestamid (cast polyamide) olarak da adlandırılan dökülebilen naylondur. Birçok plastik ısının etkisi altında ve atmosfer basıncında döküm kalıbını doldurmak için yeterli derecede sıvı halini alamazlar. Bu nedenle bunlara şekil vermek için yüksek basınç gerekmektedir. Bu plastiklere ısı ve yüksek basıncın bir arada bulunduğu ekstrüzyon veya enjeksiyon yöntemleri uygulanır. Ancak bazı plastikler, atmosfer basıncında dökülebilen sıvı kıvamında bulunabilirler. Dökülebilen naylon, naylon 6 monomerlerinden elde edilir. Döküm poliamidler kuru kayma özellikleri nedeniyle silindirler ve kılavuzlar, yataklar, dişliler gibi bronz, pirinç, alüminyum ya da çelik parçalar yerine kullanılabilir. Magnezyum ya da sodyum içeren iki tip saf poliamid, sıvı ve katı yağ dolgululu poliamid türleri kestamid olarak adlandırılmaktadır. Atmosfer basıncında da sıvı halde bulunabilen kestamidler yarı mamül halinde satışa sunulmakta ve işlenerek kullanılmaktadır. Kestamidlerin ergime sıcaklıklarının poliamidlere göre daha düşük olması nedeniyle kestamidler daha iyi dayanım ve tokluk değerlerine sahiptir Callister (2002); Crawford (1987); Cowie, (1998).

Kestamidin en önemli özelliği sertliğinin ve darbe mukavemetinin yüksek olmasıdır. Kestamid, metallere nazaran oldukça ucuzdur. Bunların yanı sıra sürtünme katsayısının

düşük olması ve ekonomik olması metallere ikame bir ürün olmasını sağlar. Kimyasal dayanımın iyi olması ve kolay işlenebilmesi ayrıca artı bir özelliktir. Bu özellikleri sayesinde döner ve kayar hareketli makine parçalarının ve ekipmanların yapılmasında demir, çelik, alüminyum, bronz ve birçok plastiğin yerini almıştır. Özellikle ağır sanayi olmak üzere yüksek darbe dayanımı gerektiren ve üzerinde yüksek mukavemet uygulanacak yerlerde kullanılır. Yoğunluğunun düşük olması sebebiyle satın alma ve nakliye maliyetlerinin düşmesini sağlar. Son üreticinin bitmiş parçasını üretirken metal aksam yerine kestamid tercih etmesi, bitmiş parçanın daha düşük fiyatlı ve hafif olmasını, satış fiyatının ve nakliyesinin daha uygun hale gelmesini sağlar. Son üreticiye piyasasında maliyetlerini düşürmede ve pazar payını artırmada önemli katkı sağlar. Yağlama gerektirmemesi kullanım aşamasında bakım masraflarını da minimuma indirir. Yüksek aşınma ve darbe dayanımı, Kestamid' i uzun ömürlü kılar. Uzun kullanım ömrü de dikkate alındığında Kestamid'in söz konusu metallere bakarak avantajları ve üstünlükleri daha da artar. Kestamid, "Tak ve Unut" tipi bir malzemedir. Kestamidlerin ergime sıcaklıklarının poliamidlere göre daha düşük olması nedeniyle kestamidler daha iyi dayanım ve tokluk değerlerine sahiptir.

Saf ve içsel olarak yağlamalı kestamidlerin çeşitli test derecelerinde aşınma ve sürtünme özellikleri incelenmiştir. Yapılan çalışmada çeşitli yük aralıkları, çeşitli temas durumları (silindir-düz, düz-düz), temas alanları, iç yağlayıcıların etkisi ile elde edilen sürtünme ve aşınma değerleri karşılaştırılmıştır. Her numune grubu için yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Geniş aralık örnekleri için daha düşük aşınma ile katı yağlayıcı kompozitlerde deney numunelerinin aşınma davranışı düşük ve geniş temas alanı arasında önemli farklılık vardır Samyn vd. (2007).

Kang, S. ve Chung D. tarafından yapılan çalışmada %8'den daha az yağ ilavesi ile sürtünme özellikleri test edilmiştir. Çeşitli kayma hızı ve basınçlar altında yapılan deneylerde %6 sıvı ve %4 oranında katı yağ içeren döküm naylonun en düşük sürtünme katsayısına sahip olduğu tespit edilmiştir. Geniş kayma hızı aralıklarında optimum katı yağ katkılı naylonda katkısız naylona göre %400 daha geniş basınç-hız sınırı (PV limit) olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte yağ katkılı naylon katı yağ katkılı naylonla karşılaştırıldığında sıvı yağ katkısının basınç-hız sınırı, sadece düşük kayma hızı ve katı yağ takviyesinden daha düşük yağlayıcı olması durumunda daha yüksek olarak belirlenmiştir Kang ve Chung (2000, 2003).

Sürtünmede farklı test kademelerinin ve iç yağlayıcının verime etkisi incelenmiştir. Normal yükleme, temas geometrisi ve temas alanı şeklinde 3 farklı test kademesi kullanılmıştır. Çalışmada sodyum ilaveli saf polyamid (PA-Na), magnezyum ilaveli saf poliamid (PA-Mg),

sıvı yağ katkılı poliamid, hacim olarak homojen dağıtılmış sıvı yağ ya da delik yüzeylerinde sıvı yağla yağlanmış yüzey ve termoplastik katı yağlı polyamid olmak üzere 5 farklı grup numune ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Tüm kademelerde PA-Na numuneler, PA-Mg için hacim özellikleri nedeniyle PA-Mg numunelere göre daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptirler. Normal yükleme ile sürtünme katsayısının düşürülmesi elastik temasa bağlıdır. Katı yağlayıcılar geniş kademe testlerinde düşük sürtünme ile en uygun numune grubu olarak belirlenmiştir. Bu sıvı yağın sağladığı difüzyon ve göç mekanizmaları ile açıklanmıştır. Dolgulu poliamidler için düşük sürtünme katsayıları saf polyamidin değerleri ile temel olarak daha düşük yüzey enerjisi ve daha düşük adezyon açısından karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada sürtünme özelliklerini belirlemek için kestamid ve Pa-Na ve Pa-mg numunelerine mezo, küçük ve büyük ölçekli testler uygulanmıştır. Mezo test 1,15; 3,15; 5,15N' luk yükler altında 0,125, 0,50; 2, 8, 20 mm/s kayma hızlarında 1000 Hz' de küçük ölçekli testlerde 50, 100, 150, 200 N' luk yükler altında 300 mm/s kayma hızıyla 1000 Hz' de büyük ölçekli testlerde 250000, 450000, 675000, 900000 N' luk yüklerle 5 mm/s kayma hızında 400 Hz ile 140 saat çalıştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre yapılan bütün testlerde en iyi sürtünme davranışlarını PA-Mg göstermiştir. Ayrıca katı yağların küçük ölçekli testlerde petrol yağlarının mezo ölçekli testlerde etkili olduğu tespit edilmiştir Samyn ve Tuzolana (2007).

Termogravimetrik eğriler ergime sıcaklığının üzerinde ağırlık kaybı PA-Na için %3, PAo1 için %4 ve PA-Mg için %6 olarak bulunmuştur. Yumuşama sıcaklığı PA-Mg için 88 °C, PA-Na ve Pao1 için 95 °C olarak bulunmuştur. PA-Na ile karşılaştırıldığında PAo1'nun daha yüksek ağırlık kaybına uğradığı belirlenmiştir Yabe (2000).

Modülü 3.5 ve malzemeleri polyamid 66 ile AISI 8620 olan dişliler 12,02; 27,2; 37,5 (N/mm) yükler altında 1000 d/dak ile 720.000 devir çalıştırılmıştır. Çalışmada plastik temelli dişli çarklar ısı iletimi metal dişlere göre yüksek olmadığından çalışma esnasında diş üzerinde biriken ısı dişli hasarlarını hızlandırmaktadır. Plastik temelli dişli çarkların çalışma sırasında özellikle bölüm dairesi civarlarında ısı birikiminin daha fazla olması nedeni ile değişken yüklemelerden dolayı bu bölgedeki malzemenin mekanik özellikleri zayıflamakta ve diş termal hasara uğramaktadır. Plastik temelli dişli çarklarda diş üzerinde biriken ısıyı dağıtmak için ısı iletimi daha yüksek olan farklı dişli malzemesi ile çalıştırılması diş ömrünün arttırılmasına katkı sağlayacaktır. Diş yükünün ve çevre hızının uygun olduğu durumlarda diş yüzeyinde oluşan ısı artışının ani olarak yükselmemesi dişli servis ömrünü arttırmaktadır. Plastik dişli çarkların servis ömrünü arttırmak için yüksek diş yüklerinde diş yüzeyinde biriken ısıyı dağıtıcı değişik modifikasyonlar yapılarak yada ısı iletimi yüksek değişik katkı elyafları katılarak diş yüzeyinde oluşan hasarlar engellenebilir Düzcükoğlu vd. (2009).

Enerjinin iletimi esnasında verimin yüksek tutulmasına karşı zorlayıcı en büyük etken sürtünme ve meydana getirdiği aşınmadır. Bu olumsuz etkiler, diğer makine elemanlarında olduğu gibi dişli çarklar üzerinde de kendini göstermekte ve maddi açıdan ciddi kayıplara neden olmaktadır. Bu çalışmada dişliler üzerinde meydana gelen hasarlar ve sebepleri araştırılmıştır. Dişlilerde meydana gelen hasarlar çok sayıda faktörün bir araya gelmesi sonucunda ortaya çıkmaktadır. Yüzey işleme kalitesi, çalışma koşulları, diş yüzey basıncı, yağlama rejim cinsi, yağ sıcaklığı, yağlayıcı özellikleri, sürtünme katsayısı, dişli imalatında kullanılan malzeme gibi etmenler bu faktörler arasında sayılabilir. Bu parametreler arasında asıl problemi ise bakımsızlık nedeniyle dişlilerin yağsız kalmaları oluşturmaktadır. Dişlilerde en fazla görülen hasar pitting oluşumu, en tehlikeli hasar ise kırılma hasarı olarak tespit edilmiştir Kızılaslan vd. (2010).

Modülü 2 ve malzeme özellikleri naylon ile S45C çeliği olan dişliler 9,8; 19,6; 29,4 N/mm yükler altında %35-55 nem oranının da 1273 d/dak ile 1000000 devir birlikte çalıştırılarak diş yüzeyinde meydana gelen sıcaklıklar ölçülmüş dişliye delik açılması durumunda veya çelik pim eklenmesi halinde sıcaklığın 3-10 °C azaldığı görülmüştür. Bu sıcaklık düşüşü aşınmada %30' luk bir iyileşme sağlamış ve dişlinin servis ömrü % 415 artmıştır Kim (2006).

Modülü 2 olan polyamid 66 dişli çark 0.8, 1, 1.5 modüllerine sahip asetal dişlilerle eşleştirilmiş ve 1000 d/dak ile 7 - 16.1 Nm arasında 3 değişik yükte yüklenmiştir daha sonra devir sayısı ve dişlilerin özellikleri aynı tutularak bu deney asetal-asetal ve polyamid – polyamid şeklinde yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda asetal dişlinin aşınma dayanımının kritik tork geçildikten sonra aşırı bir şekilde arttığı görülmüştür Mao vd.(2009).

Naylon 6 dişli çarkın performansını iyileştirmek için yapılan bu çalışmada modül 6' ya sahip dişli çarkın diş kenarlarından çıkıntılar yapılarak dişli modifiye edilmiştir yapılan bu modifiye sayesinde dişlerin yüzey alanı artmış ve soğumaları kolaylaşmıştır. Deneyler 4.41 Nm, 6.62 Nm ve 8.82 Nm olmak üzere üç değişik tork altında, modifiyeli ve modifiyesiz dişliler çelik dişli ile çalıştırılarak yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda 4.41 Nm torca maruz kalan modifiyeli dişlinin diş sıcaklığı 28 °C modifiyesiz dişlinin diş sıcaklığı 33 °C 6.62 Nm' ye mağruz kalan modifiyeli dişlinin diş sıcaklığı 31 °C modifiyesiz dişlinin 41 °C ve son olarak 8.82 Nm torca mağruz kalan modifiyeli dişli 35 °C modifiyesiz dişlinin diş sıcaklığı 48 °C ölçülmüştür. Sonuç olarak bu yüklemelerde yaklaşık 5-15 °C sıcaklık farkı gözlenmiştir. Dişlere uygulanan yük arttıkça modifiyeli ve modifiyesiz dişli arasındaki sıcaklık farkının da arttığı görülmektedir. Bununla birlikte aşınmanında modifiyeli dişlide daha az olduğu ve artan



yüklerde aşınma miktarının modifiyeli ve modifiyesiz dişli arasında hızla arttığı belirlenmiştir İmrek (2009).

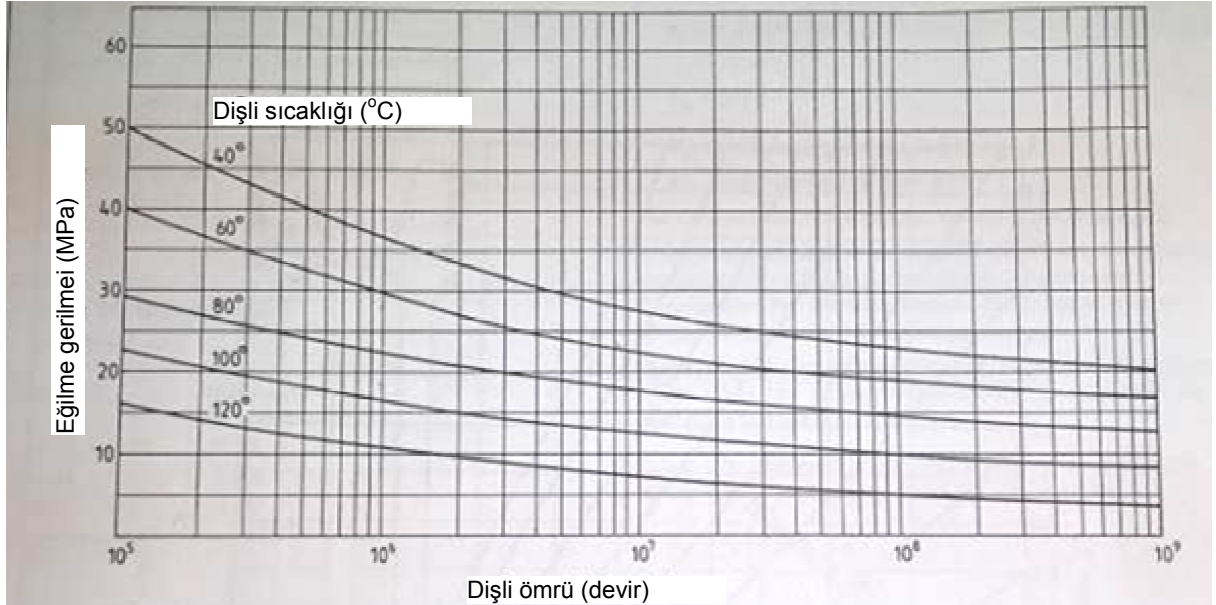
Yeni bir kompozit dizaynının denendiği çalışmada modül 2 ve diş sayısı 30 olan dişliden birisi asetale diğeri (yeni üretim deney dişlisi) %55 naylon, %30 cam lifi, %15 yağlayıcı olarak PTFE maddesidir. Dişlilere 1000 d/dak ile 1.000.000 devir yaptırılmış ve 7 ile 16,1 Nm arasında torklar uygulanmıştır. 7 Nm yük altında 1000000 devrin sonunda aşınma sadece 0,1 mm çıkmıştır. 8,5 Nm yük altında ise 0,5 mm olmuştur. 8,5 Nm dişlinin taşıyabileceği kritik yük olarak bulunmuş bu yükten sonra dişliler artan yüke göre aşınmaları aşırı bir şekilde artmaya başlamıştır ve 11 Nm üzerindeki yüklerde 1000000 devri tamamlayamamıştır MAO (2007).

Kuru sürtünme şartlarında kestamidin de aralarında bulunduğu dört farklı polyamidin ( POM-Delrin, Ertalyte PETP, Ertalon 6 PLA Cast Polyamide ve Devateks) tribolojik davranışlarının incelendiği çalışmada bu malzemeden yapılan yataklarda 40 mm çapında AISI 440C çeliğinden yapılmış mil çalıştırılarak deneyler yapılmıştır. Yapılan bu deneyler iki guruba ayrılmış ilk gurupta malzemelerin sürtünme davranışları, ikinci gurupta ise aşınma karakteristikleri incelenmiştir. İlk olarak yataklar 23 °C sıcaklıkta ve % 50 nem oranında 0,52 m/s, 1,04 m/s, 1,57 m/s, 2,09 m/s hızlarla 55 N, 75 N, 95 N, 115 N, 135 N, 155 N, 175 N' luk yüklerle yüklenerek sürtünme katsayıları belirlenmiştir. Deneylerin ikinci gurubunda ise mil yataklarının içinde 1.57 m/s hızla ve 95 N' luk yük altında 8' er saat çalıştırılmışlar ve her saat başında aşınma miktarları ölçülmüştür. Yapılan deneyler sonunda malzemelerin sıcaklıkları Ertalyte 85 °C, Devateks 65 °C, Ertacetal 60 °C, Kestamid 47 °C aşınma sonucu malzeme kayıpları ise Ertalyte 48,6 mg, Devateks 100,5 mg, Ertacetal 142,3 mg, kestamid 180,4 mg olarak tespit edilmiştir Feyzullahoğlu ve Saffak (2008)

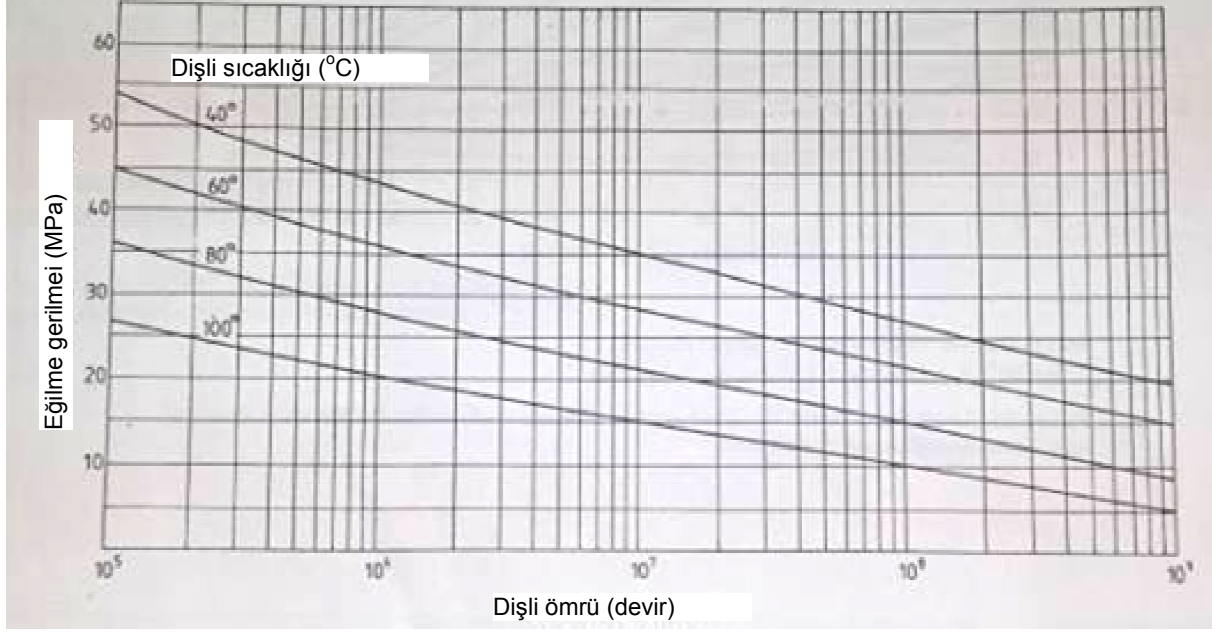
Kestamid ve türevlerinin kullanımına giderek daha fazla ihtiyaç duyulan günümüzde kestamidin değişik nem koşullarındaki yüzey direncini belirlemek için yapılmış çalışmada kestamid numuneleri 120 saat suda bekletilmiş ve 24 saat arayla yüzey dirençleri ölçülmüştür. Bu değerler kuru olarak  $7,58 \times 10^{10}$  devir, 24 saat sonra  $5,8 \times 10^7$  devir, 48 saat sonra  $3,96 \times 10^7$  devir, 72 saat sonra  $3,96 \times 10^7$  devir, 96 saat sonra  $3,33 \times 10^7$  devir, 120 saat sonra  $3,35 \times 10^7$  devir olarak belirlenmiştir. Çıkan değerlerden de anlaşılacağı gibi çevresel nem koşulları bu malzemenin yüzey direncini önemli ölçüde değiştirebilir bu yüzden olası en ıslak çalışma koşulları kabul edilmeli ve malzeme ona göre seçilmelidir Ando ve Kalacska (2000).

### 3. BS 6168 STANDARDINA GÖRE EĞİLME GERİLMESİ HESABI

Polimer dişliler için temel dairesi üzerindeki hasar eşsizdir. Isı etkisi ile yumuşama hasarı olarak tanımlanan bu hasar temel dairesi üzerindeki temas noktasında yüksek bölgesel sıcaklık oluşumu ile dayanımın düşmesi şeklinde tanımlanmaktadır. Temel dairesi üzerindeki yumuşamanın özellikle yağlamasız çalışan dişlilerde olduğu gözlenmiştir. Plastik dişlilerin hesaplarına ilişkin standartlarda temel dairesi üzerindeki hasar göz ardı edilmiş ve bu standartlar genellikle, plastik dişliler için yorulma hasarı niteliğindeki diğer üç hasar tipi olan diş dibinden kırılma, aşınma ve pullanmayı esas almışlardır. Cam takviyeli dişliler için çok az bilgi bulunmaktadır fakat gevrek hasar için çekme dayanımında artış olduğu çeşitli çalışmalarla belirlenmiştir. Ayrıca cam takviye malzeme ile aşınma öncelikli problemdir. BS6168 standardında modülü 3 olan PA66-çelik ve POM-çelik dişli kombinasyonlarının 10 m/s hızda Wöhler eğrileri ve temas gerilmesi hesabına yönelik eğrileri verilmiştir. Şekil 1'de yağlamasız durumda PA66-çelik dişli kombinasyonunun, Şekil 2'de ise POM-çelik dişli kombinasyonunun Wöhler eğrileri görülmektedir.



Şekil 1. Yağlamasız PA66 dişlinin çelik eş dişli kombinasyonu ile Wöhler diyagramı



Şekil 2. Yağlamasız POM dişlinin çelik eş dişli kombinasyonu ile Wöhler diyagramı

BS6168 standardında plastik dişlilerin diş dibinden kırılmaya göre hesaplamaları yapılırken sıcaklık ve yağlama etkisi göz önünde bulundurulmaktadır. Dönüştürülmüş temas oranı nem ve sıcaklığın değişimine göre hesaplanır BS 6168 (1987).

$$S = \frac{\sigma_{Flim}}{\sigma_{Fh}} \cdot Y_x \quad (1)$$

$Y_x$  : Boyut faktörü (modüle göre belirlenir)

$\sigma_{Flim}$  : Wöhler diyagramından çevrim sayısı ve sıcaklığa göre elde edilen yorulma dayanımı

$\sigma_{Fh}$  : Hesaplanan yorulma dayanımı

**S ≥ 1,25** olması istenir.

Hesapla yorulma dayanımının bulunması için;

$$\sigma_{Fh} = F_t \frac{Y_F Y_{\epsilon} K_A}{b.m} \quad (2)$$

formülü kullanılır. Burada;

$K_A$ : Uygulama faktörü

$Y_F$ : Eğilme için form faktörü

$Y_{\epsilon}$ : Eğilme için temas oranı faktörü olarak ifade edilmektedir.

$$Y_F = f(x) \quad (3)$$

X: Diş üstü modifikasyonu

$$X=0,02. (30-z_1) \quad (z_1+z_2<60 \text{ ise}) \quad (4)$$

$$Y_{\epsilon} = 0,2 + \frac{0,8}{\epsilon_{\alpha}} \quad (5)$$

$$\epsilon_{\alpha} = \frac{\sqrt{r_{amin1}^2 - r_{b1}^2} + \sqrt{r_{amin2}^2 - r_{b2}^2} - a_w \cdot \sin \alpha_w}{\pi \cdot m \cdot \cos \alpha_t} \quad (6)$$

$\epsilon_{\alpha}$ : Dönüştürülmüş temas oranı

$r_{amin}$ : Kaliteye göre diş üstü minimum yarıçapı

$r_b$ : Dönüştürülmüş temel dairesi yarıçapı

$a_w$ : İşlem sırasında merkezler arası uzaklık

$a_{th}$ : Merkezler arası uzaklığın ısı genleşme ile değişim miktarı

$\alpha_w$ : İşlem sırasında basınç açısı

Dişli çalışırken yüzeyde ve gövdede oluşacak sıcaklık aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{136P_t \mu (1+u)}{z_2 + 5} \left\{ \frac{1,71 \cdot 10^4 K_a}{bz_1 (vm_n)^{K_m}} + \frac{7,33 K_b}{A} \right\} + 5 \quad (7)$$

Burada,

$\theta_0$ : Çevre sıcaklığı (°C)

$K_a$ : Yağlama faktörü (yüzey sıcaklığı ile gövde sıcaklığı hesaplanırken farklı değerler kullanılmaktadır)

$K_b$ : Sürüş şekli (dişli kutusunun açık, kapalı veya kısmen kapalı olması) için düzeltme faktörü

$K_m$ : Dişli malzemesi faktörü

A : Dişli kutusu yüzey alanı (m) dir (BS 6168, 1987).

(7)'de verilen formülle elde edilen sıcaklığa göre dişli malzemesinin Wöhler grafiğinden  $\sigma_{Flim}$  belirlenir. PA 66 ve PA 6 için maksimum çalışma sıcaklığı yağlamasız durumda 90 °C olarak

verilmiştir. Sıcaklık hesabı ile hesaplanan hacim sıcaklığı dış dibinden kırılmaya göre hesapta, dış yüzey sıcaklığı ise temas gerilmesi hesabında kullanılır.

BS 6168 standardında verilen hesap yöntemine göre, PA66 için yapılan hesaplarla çeşitli yüklemelerde dişli kutusu açık, çalışma esnasında nem de bir değişiklik olmadığı kabul edilerek 4 farklı teğetsel kuvvete göre hesap yapılmış ve Çizelge 2'deki sonuçlar elde edilmiştir. PA66 için hesap yapılmasının nedeni ilgili standartta bu malzeme için Wöhler eğrisinin yapılmış olmasıdır. PA66'nın PA 6'dan farkı daha yüksek sıcaklıklara dayanıklı olmasıdır. PA66 için hesaplamalar kestamidin de yüksek sıcaklıklara dayanımı ile birlikte değerlendirildiğinde daha makul bir yaklaşımdır. BS 6168'de nem oranı, sıcaklık değerlerine göre verilmiş grafiklerden modifiye edilmiş değerler hesaplanmaktadır.

Çizelge 2: BS 6168 standardından elde edilen çeşitli teğetsel kuvvete göre sınır çevrim sayıları

m	z	n	D	Ft	V	M <sub>b</sub> (Nm)	P	F
6	17	500	102	1000	2,670354	51	2,670157	1
				1500	2,670354	76,5	4,005236	2
				1700	2,670354	86,7	4,539267	3
				2000	2,670354	102	5,340314	4

A m <sup>2</sup>	(Vm) <sup>KM</sup>	Gövde sıcaklığı °C açık sürüş	açık gövde Δ <sub>th</sub>	r <sub>th</sub>	a <sub>w</sub>	a <sub>th</sub>	a <sub>wmax</sub>	F
0,1	8,0083	62,55482	0,0026	0,1326	102	0,094844	102,0878	1
		79,83223	0,0032	0,1632		0,133967	102,0792	2
		86,74319	0,0042	0,2142		0,149616	102,1146	3
		97,10964	0,0054	0,2754		0,17309	102,1523	4

α <sub>w</sub>	ε <sub>α</sub>	Y <sub>F</sub>	x=0,26 Y <sub>F</sub>	σ <sub>H</sub>	σ <sub>lim</sub>	Devir sayısı	F
20,13488	1,501604	0,732764	2,51	10,21798	15,02644	10 <sup>9</sup>	1
20,12183	1,502836	0,732327		15,31784	22,52623	10 <sup>6</sup>	2
20,1759	1,497734	0,73414		17,4032	25,59294	2x10 <sup>5</sup>	3
20,23341	1,49231	0,736082		20,5285	30,18897	55000*	4

\* Wöhler eğrisi 10<sup>5</sup> çevrimden itibaren verildiği için eğri uzatılarak yaklaşık bulunan değerdir.

Standartta verilmiş Wöhler eğrisinde minimum 100000 devir için değer verilmiştir. 1700 N'luk teğetsel kuvvet için 200000 devir yorulma ömrüdür. Standartta göre PA dişlinin maksimum gövde sıcaklığı 90 °C olmalıdır. 1300 N luk teğetsel kuvvette 10<sup>6</sup> devir standartta göre

güvenilirdir. 2000 N'luk teğetsel kuvvet için ise 100000 devire ulaşamadığı hesaplanmıştır. 2000 N'luk teğetsel kuvvet için 100000 devirden daha az bir çevrim sayısı muhtemeldir. Eğri uzatılarak 2000N'luk teğetsel yük için 55000 civarında bir ömür değeri bulunmuştur. Çizelge 3'de poliamid 6-6 dişlinin çelik dişli kombinasyonunda BS 6168 standardına göre elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Çizelge 3. Poliamid 6-6/çelik dişli kombinasyonu için hesaplar

Malzeme	$Z_1$	$Z_2$	$\sigma F h_1$	m	n	$F_t$	$N_1$	$\theta_1$
PA-Çelik	40	40	13,76883	2	500	250		33,2004 6
PA-Çelik	40	40	27,55167	2	500	500	$1,5 \cdot 10^7$	38,4009 2
PA-Çelik	40	40	41,50238	2	500	750	$3 \cdot 10^5$	43,6013 7

Çizelge 4'de çeşitli modül ve diş sayıları kombinasyonlarında PA6-POM (poliamid-asetal) dişli çiftinin BS 6168 standardına göre elde edilen ömür değerleri verilmiştir. Çizelgede 1 indisi poliamid dişlileri, 2 indisi ise polioksümetilen dişlilere ait değerleri ifade etmektedir. BS6168 standardı pek çok hesaplama ve çeşitli grafiklerden bakılarak değerleri belirlemeyi gerektirmektedir. Modülleri 1, 2, 3, diş sayıları 20, 25, 30 olan ve çalışma esnasında 200, 300, 400, 500 devirde çalıştırılan poliamid ve polioksümetilen dişlilerin çeşitli şekillerde eşlenmeleri ile hesaplar yapılmış ve tablo oluşturulmuştur.

BS6168 standardına göre yapılan hesaplamalar poliamid dişlilerin polioksümetilen dişlilere göre farklı ömre sahip olduklarını ortaya koymaktadır. Diş dibi gerilmeleri açısından poliamid dişliler ile polioksümetilen dişlilerin diş dibi gerilmeleri birbirine oldukça yakınken modül arttıkça poliamid dişlilerde gittikçe artan diş dibi gerilmesi oluşmaktadır. Modülü 1 olan 25 diş sayısına sahip PA66-POM eşleştirmesinde yakın diş dibi gerilmeleri bulunduysa da, poliamid dişlilerde polioksümetilen dişlilere göre yaklaşık 8 kat daha düşük ömür değerleri hesaplanmıştır. Diğer modül değerlerinde de polioksümetilen dişlilerin ömürlerinin poliamid dişlilerden hemen hemen aynı oranda yüksek olduğu belirlenmiştir. Hemen hemen eşit diş dibi gerilmelerine rağmen polioksümetilen (asetal) dişlilerin daha uzun ömürlü oldukları sonucuna varılmıştır.

Çizelge 4: Poliamid- Polioskimetilen(asetal) dişli çiftinin çeşitli diş sayısı, devir sayısı, modül durumlarında ömür değerleri

Malzeme	$Z_1$	$Z_2$	$\sigma_{Flim1}$	$\sigma_{Flim2}$	m	n	$N_1$	$N_2$
PA-POM	25	25	26,46516	26,48949	1	200	$1,8 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^8$
PA-POM	25	25	26,5045	26,5161	1	300	$1,7 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^8$
PA-POM	25	25	26,5997	26,59887	1	400	$1,6 \cdot 10^7$	$1,3 \cdot 10^8$
PA-POM	25	25	26,61757	26,60465	1	500	$1,5 \cdot 10^7$	$1,2 \cdot 10^8$
PA-POM	25	20	26,84702	26,8632	1	200	$1,6 \cdot 10^7$	$1,25 \cdot 10^8$
PA-POM	25	20	26,88003	26,88102	1	300	$1,5 \cdot 10^7$	$1,16 \cdot 10^8$
PA-POM	25	20	26,98724	26,97359	1	400	$1,3 \cdot 10^7$	$1,09 \cdot 10^8$
PA-POM	25	20	27,0638	27,03602	1	500	$1,2 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^8$
PA-POM	25	30	26,14056	26,17126	1	200	$2 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^8$
PA-POM	25	30	26,2447	26,26444	1	300	$1,9 \cdot 10^7$	$1,35 \cdot 10^8$
PA-POM	25	30	26,27534	26,28405	1	400	$1,8 \cdot 10^7$	$1,3 \cdot 10^8$
PA-POM	25	30	26,29494	26,29286	1	500	$1,7 \cdot 10^7$	$1,25 \cdot 10^8$
PA-POM	25	25	27,07001	27,0161	2	200	$1,5 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^8$
PA-POM	25	25	27,10589	27,00784	2	300	$1,45 \cdot 10^7$	$1,1 \cdot 10^8$
PA-POM	25	25	27,37681	27,23584	2	400	$1,38 \cdot 10^7$	$9,5 \cdot 10^7$
PA-POM	25	25	27,53778	27,3566	2	500	$1,2 \cdot 10^7$	$9 \cdot 10^7$
PA-POM	25	20	27,37954	27,30547	2	200	$1,3 \cdot 10^7$	$1,1 \cdot 10^8$
PA-POM	25	20	27,57871	27,45364	2	300	$1,2 \cdot 10^7$	$9,5 \cdot 10^7$
PA-POM	25	20	27,65385	27,48248	2	400	$1,1 \cdot 10^7$	$9 \cdot 10^7$
PA-POM	25	20	27,88826	27,67119	2	500	$9,5 \cdot 10^6$	$8,5 \cdot 10^7$
PA-POM	25	30	26,71421	26,67515	2	200	$1,55 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^8$
PA-POM	25	30	26,88743	26,80726	2	300	$1,4 \cdot 10^7$	$1,3 \cdot 10^8$
PA-POM	25	30	26,96585	26,84764	2	400	$1,3 \cdot 10^7$	$1,2 \cdot 10^8$
PA-POM	25	30	27,28145	27,12457	2	500	$1,2 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^8$
PA-POM	25	25	27,55386	27,38743	3	200	$1,2 \cdot 10^7$	$1,1 \cdot 10^8$
PA-POM	25	25	27,92845	27,67382	3	300	$1,1 \cdot 10^7$	$9,6 \cdot 10^7$
PA-POM	25	25	28,22623	27,88946	3	400	$9,5 \cdot 10^6$	$9 \cdot 10^7$
PA-POM	25	25	28,43956	28,02615	3	500	$8 \cdot 10^6$	$8 \cdot 10^7$
PA-POM	25	20	27,96363	27,76296	3	200	$1 \cdot 10^7$	$9,4 \cdot 10^7$
PA-POM	25	20	28,426	28,1252	3	300	$9 \cdot 10^6$	$8,4 \cdot 10^7$
PA-POM	25	20	28,61106	28,22171	3	400	$8 \cdot 10^6$	$8,1 \cdot 10^7$
PA-POM	25	20	28,9086	28,4322	3	500	$6,8 \cdot 10^6$	$7,6 \cdot 10^7$
PA-POM	25	30	27,42241	27,27739	3	200	$1,3 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^8$
PA-POM	25	30	27,6135	27,38852	3	300	$1,1 \cdot 10^7$	$9,2 \cdot 10^7$
PA-POM	25	30	28,06728	27,76228	3	400	$9 \cdot 10^6$	$8,5 \cdot 10^7$
PA-POM	25	30	28,21242	27,8366	3	500	$8,2 \cdot 10^6$	$7 \cdot 10^7$

1 indisi Poliamide ait değerler, 2 indisi polioksimetilene (asetal) ait değerler içindir.

BS 6168 standardında verilen hesap yöntemine göre poliamid-çelik ve poliasetal-çelik dişli kombinasyonlarına ve test cihazına uygun olarak yapılan hesaplardan bazıları için malzeme özellikleri Çizelge 5'de verilmiştir.

Çizelge 5: Hesaplamalarda kullanılan malzeme özellikleri

Modül (mm)	6	Sürüş şekli faktörü ( $K_b$ )	0 (açık)
Çark diş sayısı ( $z_1$ )	20	Malzeme faktörü ( $K_m$ )	0,75 (PA6, PA66)
Pinyon diş sayısı ( $z_2$ )	20	Uygulama faktörü ( $K_A$ )	1 (üniform)
Çevrim oranı ( $u$ )	1	Diş form faktörü ( $Y_F$ )	2,8 ( $x=0$ )
Sürtünme katsayısı ( $\mu$ )	0,25 (PA 66/çelik) 0,18 (PA 66/PA 66)	Yağlama faktörü ( $K_a$ ) Diş yüzey sıcaklığı için	10 (PA 66/çelik) 15 (PA 66/PA 66)
Başlangıç nem oranı %	40	Devir sayısı (d/dakika)	830

BS6168 standardına göre hesaplamalarla elde edilen ömür değerleri ve diş dibi gerilmeleri Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6: BS6168'e göre ömür değerleri ve diş dibi gerilmeleri

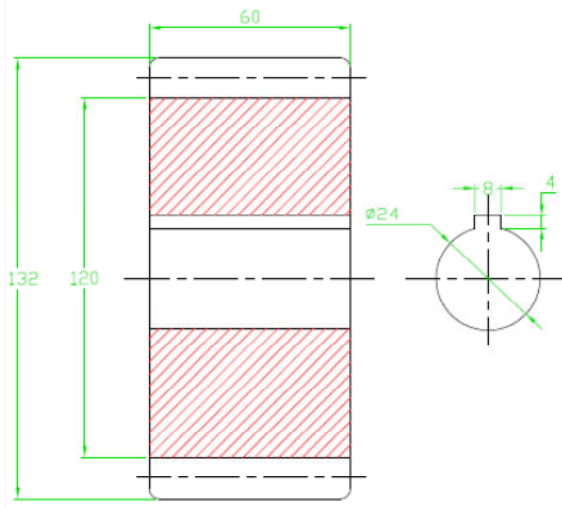
PA/Çelik					PA/PA				
F (N)	Sıcaklık (°C) $\theta$	Nem % İşlem sırasında	Diş dibi gerilmesi ( $\sigma_{FH}$ ) MPa	Çevrim sayısı N	F (N)	Sıcaklık (°C) $\theta$	Nem % İşlem sırasında	Diş dibi gerilmesi ( $\sigma_{FH}$ ) MPa	Çevrim sayısı N
1500	42	40	12,4	$>10^9$	1500	44	40	12,55	$>10^9$
		60	12,37	$>10^9$			60	12,49	$>10^9$
		70	12,3	$>10^9$			70	12,35	$>10^9$
		80	12,15	$>10^9$			80	12,07	$>10^9$
3000	55	40	23,35	$2 \cdot 10^8$	3000	57	40	23,7	$10^7$
		60	23,28	$4 \cdot 10^8$			60	23,58	$1,2 \cdot 10^7$
		70	23,16	$8 \cdot 10^8$			70	23,32	$1,5 \cdot 10^7$
		80	22,89	$>10^9$			80	22,78	$2 \cdot 10^7$
4065	65	40	31,72	$3 \cdot 10^5$	4065	67	40	32,24	$2 \cdot 10^5$
		60	31,63	$3,2 \cdot 10^5$			60	32,06	$2,2 \cdot 10^5$
		70	31,46	$3,6 \cdot 10^5$			70	31,72	$2,5 \cdot 10^5$
		80	31,1	$4,5 \cdot 10^5$			80	30,97	$3 \cdot 10^5$
4500	68	40	35,12	$<10^5$	4500	72	40	35,85	$<10^5$
		60	35,03	$<10^5$			60	35,66	$<10^5$
		70	34,84	$<10^5$			70	35,27	$<10^5$
		80	34,44	$10^5$			80	34,44	$<10^5$
4916	72	40	38,42	$<10^5$	4916	76	40	39,27	$<10^5$
		60	38,32	$<10^5$			60	39,07	$<10^5$
		70	38,11	$<10^5$			70	38,64	$<10^5$
		80	37,67	$<10^5$			80	37,73	$<10^5$
5767,7	80	40	45,14	$<10^5$	5767,7	83	40	46,23	$<10^5$
		60	45,02	$<10^5$			60	45,97	$<10^5$
		70	44,78	$<10^5$			70	45,48	$<10^5$
		80	44,26	$<10^5$			80	44,41	$<10^5$

Başlangıçta gres yağlama ve işlem esnasında sıvı yağ ile yağlamaya göre de hesaplamalar yapılmış ve işlem sırasında sıvı yağ ile yağlama durumunda ömür değerlerinde artış saptanmıştır. Standartta verilmiş Wöhler eğrilerinde minimum  $10^5$  devir için değer verilmiştir. Standartta göre PA dişlinin maksimum gövde sıcaklığı 90 °C olmalıdır. Hesaplanan yüklerde bu sınır aşılmamıştır.



#### 4. ANSYS'DE MODELLEMENİN YAPILMASI

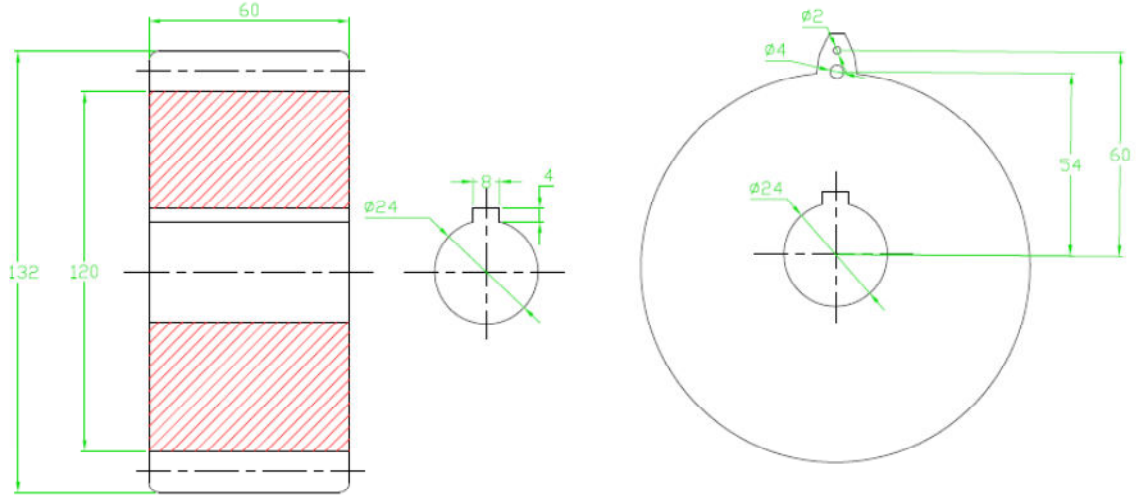
Düz dişli çark modelleri SolidWorks kullanılarak oluşturulmuş ve bu modeller Ansys Workbench programına aktarılarak yorulma analizleri Ansys Workbench programının Static Structural modunda merkezden sabitlenerek temel dairesi boyunca zorlamaya maruz kaldığı kabulü ile gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında tasarım ve üretilecek modülü 6 diş sayısı 20 olan kestamid düz dişli çarkın seçilen tasarım parametreleri ve detay resimleri Şekil 3' de verilmiştir.



Modül	6
Diş sayısı	20
Diş açısı	0°

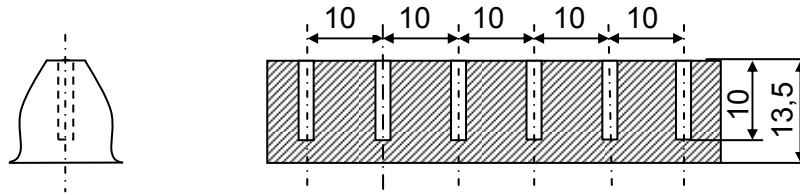
Şekil 3. Düz dişlinin detay resimleri

Literatürdeki çalışmalardan diş üzerinde delik açılmasının ısıl yumuşamayı azaltarak düşük zorlamalar altında daha uzun ömür değerlerine ulaşılması bakımından ANSYS üzerinde diş boyunca ve diş doğrultusunda açılan çeşitli deliklerle uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'de 2 mm ve 4 mm çaplarında deliğe sahip delikli numunelerin yapım resimleri verilmiştir. Aynı konumda 3 mm ve 5 mm çaplarında delikli, tam diş dibinde 3 mm çapında tek delikli şekilde de ANSYS analizleri gerçekleştirilmiştir.



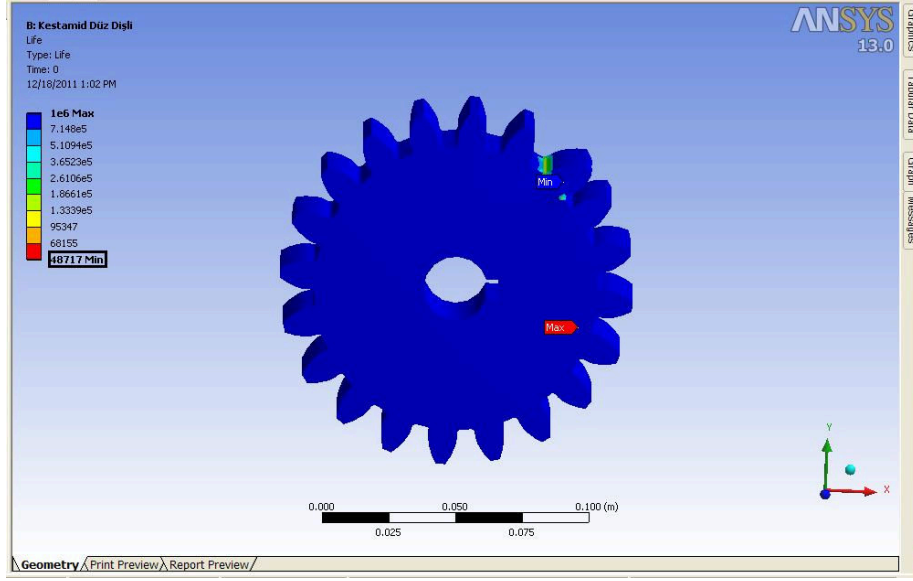
Şekil 4. ANSYS analizinde kullanılan delikli numuneler

Şekil 5'de ANSYS analizinde ısı iletiminin artırılması amacıyla hem yatay hem de dikey olarak açılan delikli dişilerin yapım resmi verilmiştir. Diş boyunca 10 mm aralıkla 2 mm çapında 5 dikey delik açılmıştır.



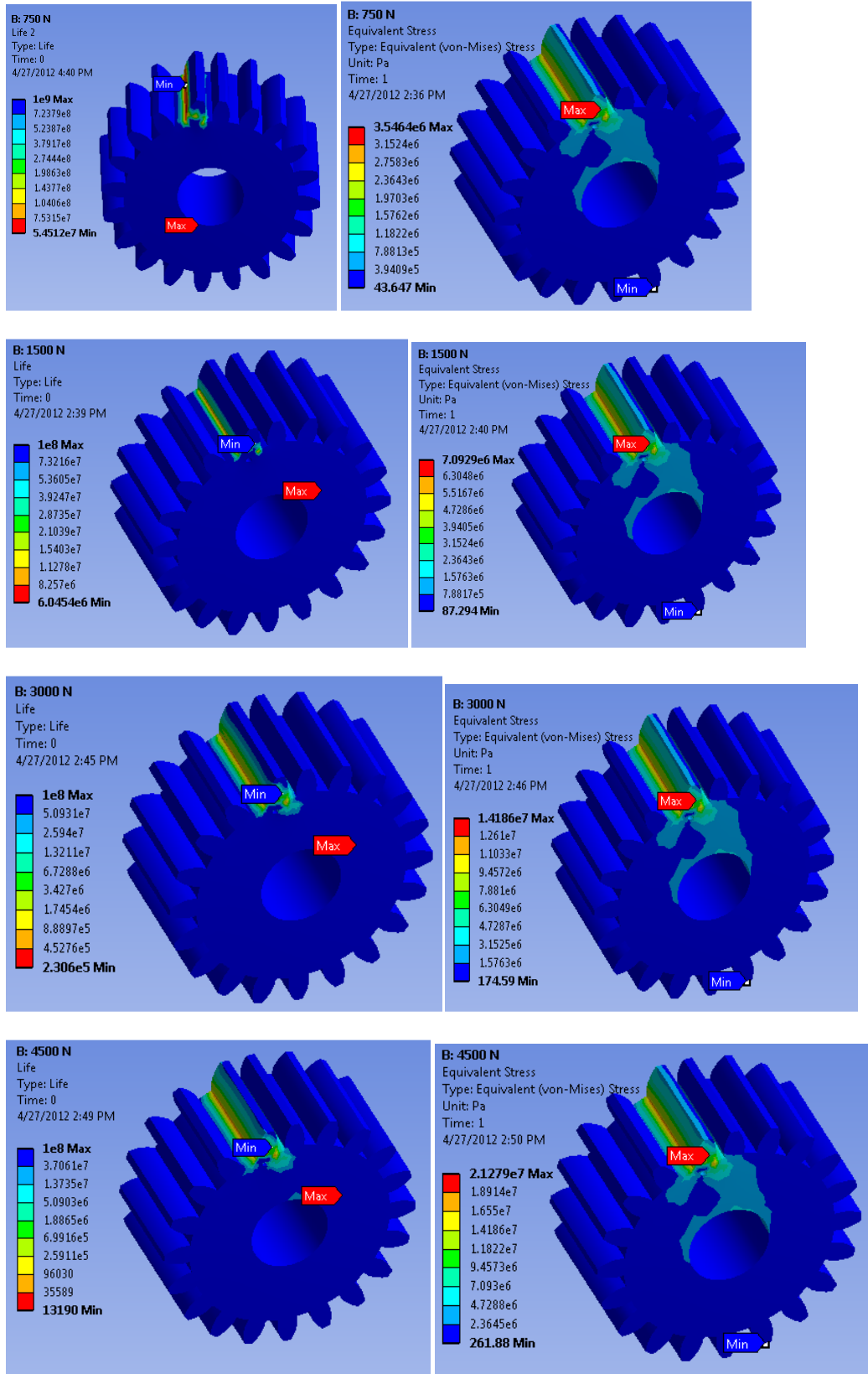
Şekil 5. Diş boyunca ve dik yönde deliklere sahip dişlinin bir dişindeki delikler ve konumları

Dişilerde yorulma çatlakları çeki bölgesinde başlamakta ve ilerlemektedir. Modülü 6, diş sayısı 20, diş genişliği 20 mm olan  $F_t = 2000$  N'luk yükleme için kestamid dişlinin ömür simülasyonu Şekil 6'da verilmiştir. ANSYS simülasyonuna göre en düşük ömür değeri 48717 olarak bulunmaktadır.

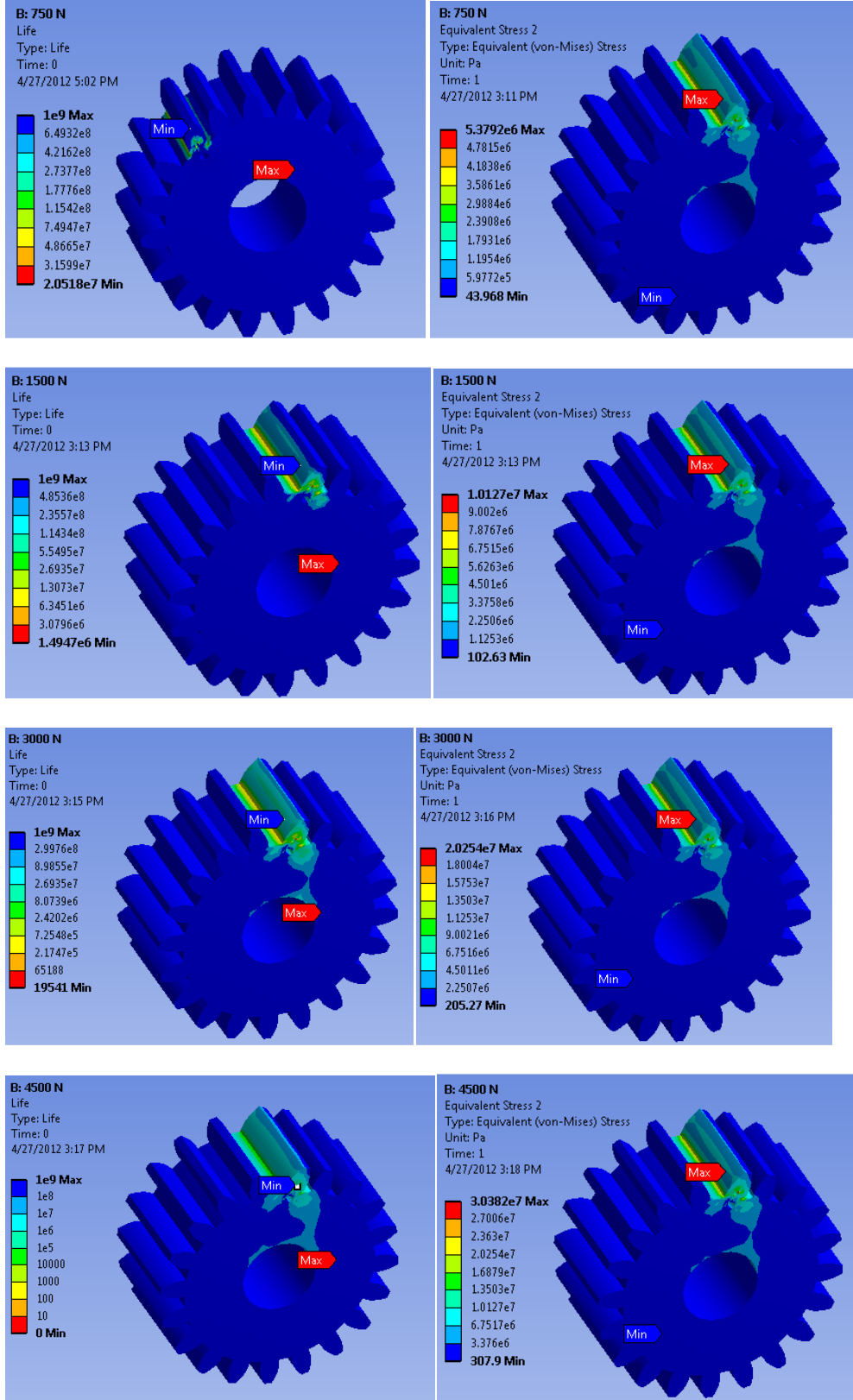


Şekil 6. 2000 N'luk teğetsel yükte kestamid dişlinin ömrü

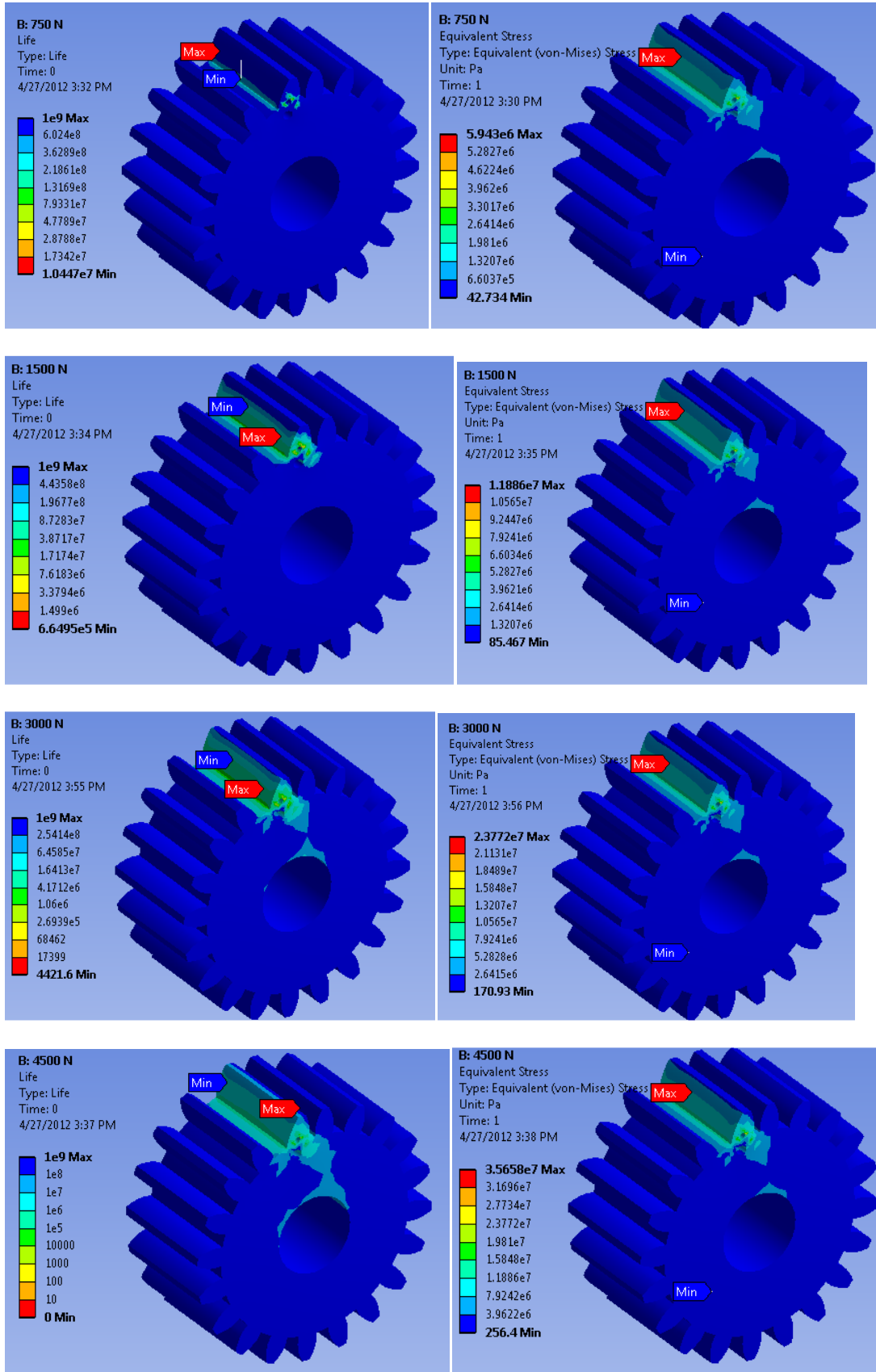
20 diş sayısına sahip poliamid dişlilerle yapılan ANSYS uygulamalarında deliksiz, diş boyunca diş üstünden 2 mm çapında 5 adet delikli, diş dibinden 3 mm delikli, diş dibinden 4 ve 2 mm delikli, diş dibinden 5 ve 3 mm delikli olacak şekilde 5 tip numune grubu için analiz yapılmıştır. Şekil 7'de 3 mm tek delikli, Şekil 8'de 2 mm ve 4 mm iki delikli, Şekil 9'da 3 mm ve 5 mm iki delikli, Şekil 10'da diş genişliği boyunca 2 mm delikli, Şekil 11'de ise deliksiz numunelerin ANSYS analizi verilmiştir.



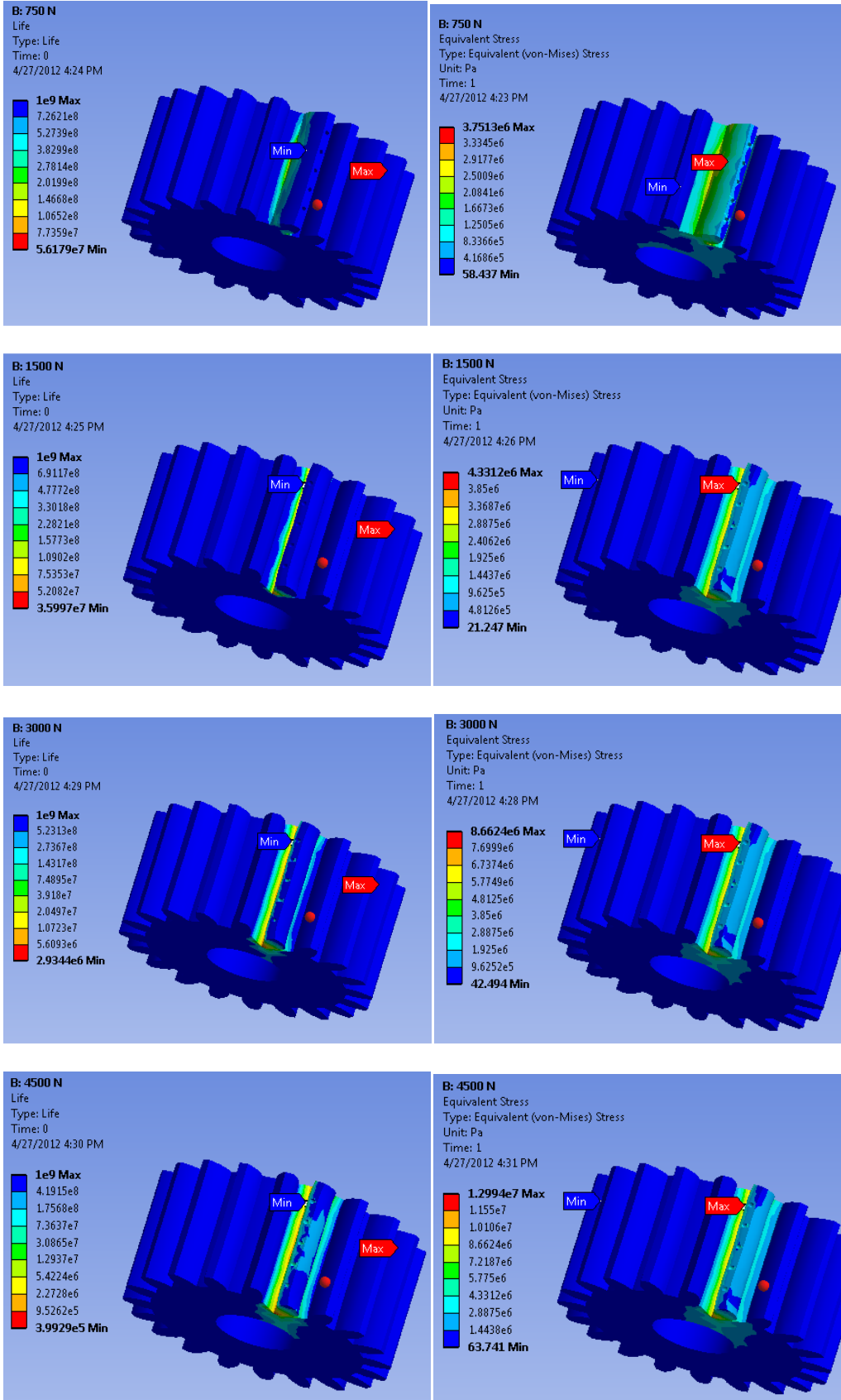
Şekil 7: Diş boyunca 3 mm tek delikli numunenin çeşitli yüklemelerde ANSYS analizi



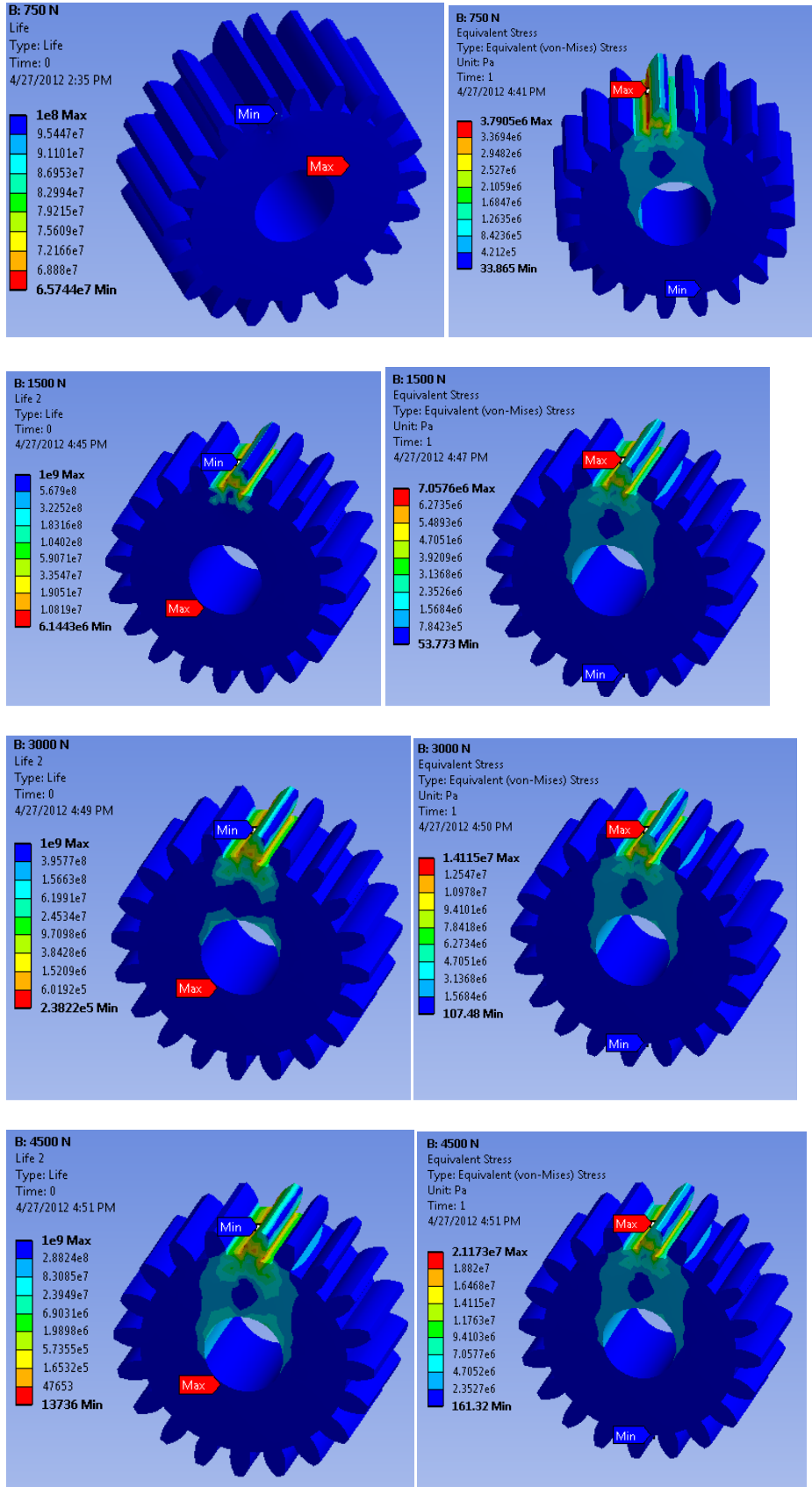
Şekil 8: Diş boyunca 2 mm ve 4 mm iki delikli numunenin çeşitli yüklemelerde ANSYS analizi



Şekil 9: Diş boyunca 3 mm ve 5 mm iki delikli numunenin çeşitli yüklemelerde ANSYS analizi



Şekil 10: Diş genişliği boyunca 2 mm delikli numunenin çeşitli yüklemelerde ANSYS analizi



Şekil 11: Deliksiz numunenin çeşitli yüklemelerde ANSYS analizi



Şekil 7-11'den elde edilen veriler toparlanarak modifiye edilmiş delikli dişli numuneleri ve modifiyesiz dişlilerin ömür değerleri ve diş dibi gerilmeleri için Çizelge 7 oluşturulmuştur.

Çizelge 7. Modifiye edilmiş dişlilerin ve modifiyesiz dişlinin ANSYS analizi

Dişli çeşidi	Uygulanan Yük							
	12,5 N/mm		25 N/mm		50 N/mm		75 N/mm N	
	Ömür	Gerilme (MPa)	Ömür	Gerilme (MPa)	Ömür	Gerilme (MPa)	Ömür	Gerilme (MPa)
Üstten Delikli	$5,6179 \cdot 10^7$	3,75	$3,5997 \cdot 10^7$	4,33	$2,9344 \cdot 10^6$	8,66	$3,9929 \cdot 10^5$	12,99
Ø5mm-Ø3mm Delikli	$1,0447 \cdot 10^7$	5,94	$6,6495 \cdot 10^5$	11,88	4421	23,77	0	35,65
Ø4mm -Ø2mm Delikli	$2,0518 \cdot 10^7$	5,3	$1,4947 \cdot 10^6$	10,1	19541	20,25	0	30,38
Ø3mm Delikli	$5,4512 \cdot 10^7$	3,5	$6,0454 \cdot 10^6$	7	$2,306 \cdot 10^5$	14,18	13190	21,2
Deliksiz	$6,5744 \cdot 10^7$	3,79	$6,1443 \cdot 10^6$	7,05	$2,3822 \cdot 10^5$	14,11	13736	21,17

ANSYS ile yapılan değerlendirmeler incelendiğinde her dişli grubu için yük arttıkça ömür değerleri beklenildiği gibi düşmektedir. Diş boyunca açılmış delikler ömür değerlerini ciddi oranda düşürmektedir. Diş dibinde diş boyunca açılan 3 mm çapında açılan delikler ömür değerlerini çok az değiştiriyorsa da diş boyunca birden fazla delik açılması dişlinin ömrünü oldukça kısaltmaktadır. Açılan delik çapları büyüdükçe ömürde daha fazla düşüş gözlenmektedir. Literatürde ısı oluşumunu azaltmaya yönelik olarak yapılmış çalışmalarda da düşük yüklemelerde yumuşama hasarı gözlenmediği için modifiye edilmiş dişlilerin ömür değerleri daha düşük bulunurken modifiyesiz dişlilerde yumuşama hasarının gözlemlendiği yüklemelerde ise modifiye edilmiş dişlilerin daha uzun ömre sahip olduğu bulunmuştur. ANSYS bu anlamda yumuşama hasarını modelleyememektedir.

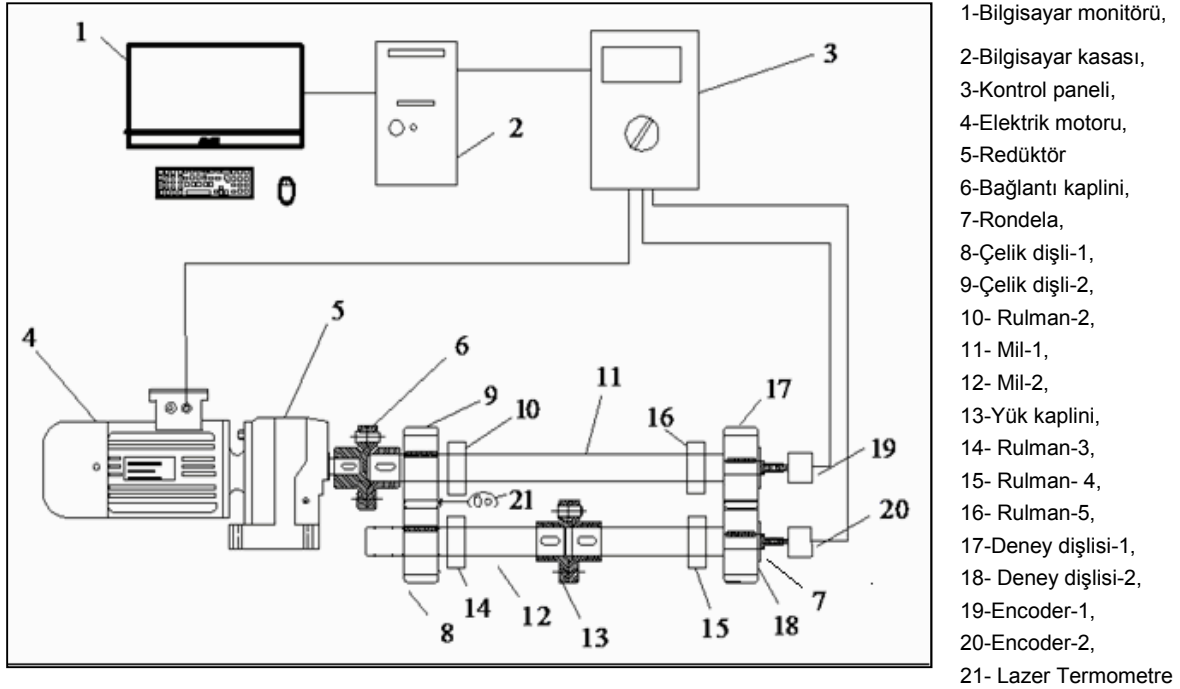
Dişe dik yönde açılan 2 mm çapındaki diş boyunca 5 deliğin açıldığı numunenin ANSYS'te modellenmesi ile elde edilen sonuçlarda düşük yüklemelerde deliksiz dişliye göre daha düşük bir ömür değeri elde edilirken uygulanan yük arttıkça, ömür değerinin diğer numunelere göre yüksek olduğu gözlenmektedir. Modellenen numunede delikler diş dibine kadar ulaşmamaktadır. ANSYS'de gerilim dağılımları incelendiğinde deliksiz numunelerde diş dibi bölgesinde yoğunlaşan gerilme artışı yorulma çatlağının da başlangıcını oluşturmaktadır. Dikey olarak delik açılan dişlilerde ise gerilme dağılımı dişte dikey olarak dağılmakta ve diş dibinde deliksiz numuneye göre daha düşük bir gerilme oluşturmaktadır. Haliyle gerilme değeri düşüncü ömür değeri artmaktadır.

ANSYS ile bulunan devir sayıları da diş dibi gerilmeleri de daha düşüktür. BS6168 standardına göre yapılan hesaplamalarda diş dibi gerilmeleri daha yüksektir.

## 5. DENEYLER

### 5.1 FZG Dişli Test Cihazı Tasarımı

Deney cihazındaki dişlilerin yaptığı tur sayısını tespit edebilmek için encoder kullanılmıştır. Encoderlar dişli merkezlerine monte edilmiş ve iki encoder arasındaki pals (pulse) farkı sayesinde dişliler üzerindeki pozisyon değişimi belirlenmektedir. Encoderlar pals olarak ölçüm yapmaktadır. Aynı zamanda encoderlar sistemin herhangi bir nedenden dolayı dağılması durumunda elektrik motorunu devre dışı bırakarak sigorta görevi görmektedirler. Dişli deneylerinde sıcaklık parametresini görebilmek için deney dişlilerinin sıcaklığını ölçen lazerli bir termometre kullanılmaktadır. Cihazın şematik görünümü Şekil 12’de gösterilmiştir.



Şekil 12: Dişli test cihazının şematik görünümü.

Rulmanlar ve miller, hesaplamaları ayrı ayrı yapıldığı ve farklı ölçülerde olduğu için ayrı sıra ile numaralandırılmıştır

Encoderlar bir devirde 500 kez ölçüm yapmaktadır. Bu durumda bir pals  $0,72^\circ$ 'dir. Dişler arasındaki boşluk kısmı alınarak üstüne istenen pozisyon değişimi eklenmiştir. Dişliler ilk çalışmaya başladıkları anda, dişliler arasında 7 palslik bir değişim sökonusudur ki bu değişim sistem yeni çalışmaya başladığı için dişlinin boyut değişimine yol açmamaktadır. Pano üzerinde 12 palse ayarlandığında aslında değişim 5 paslıtır. Bir pals  $0,72^\circ$  olduğuna göre 5 pals  $3,6^\circ$  dir.  $3,6^\circ$ 'lik değişim temel dairesi 120 mm olan dişlinin dış dibi çapı 105 mm olan dişlinin yaklaşık olarak 3,3 mm yer değiştirmesi anlamına gelir. Bu yer değiştirme diş dibi kesitinin %22'si kadardır.

Düz dişli çarkların yorulma deneylerini gerçekleştirebilmek için Şekil 13'de gösterilen dişli deney cihazı üretilmiştir. Deney cihazını tahrik eden volt marka 4 kW gücünde, 3000 dev/dk ile dönebilen trifaze elektrik motorudur. Bu motor 3000 d/dk'da 12,7 Nm tork verebilecek güçtedir. Elektrik motorunun torkunu arttırabilmek için sisteme redüktör monte edilmiştir.

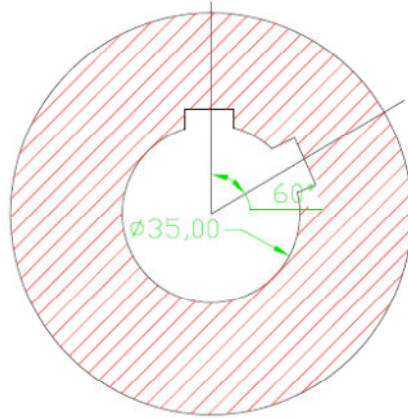


Şekil 13: Deney düzeneğinin görünüşü.

Bu redüktörün maksimum çıkış torku 829 d/dk'da 45 Nm'dir. Ayrıca deney cihazı gelişmiş bir kontrol panosuna sahiptir. Elektrik motorunun devrini 5,5 kW motor hız kontrol ünitesi ile değiştirme imkanı bulunmaktadır. Motor kontrol ünitesi elektrik motorunu aşırı ısınma ve aşırı yüklenme gibi durumlarda durdurmak sureti ile korumaktadır.

Termometre dişlilerin kavrama noktalarından iki encoder arasındaki boşluğa, dişlilere 5 cm uzaklıkta ölçüm yapmaktadır. Sistem çalışır halde iken oluşan sıcaklıktır. Pozisyon değişimi tamamlanarak sistem durduğunda da ölçüm yapılmıştır. Tablodaki değerler sistem çalışırken elde edilen en yüksek sıcaklık değerleridir.

90° açılı yük kaplini kullanılmıştır. Kaplin içine 60° açıda ikinci bir kama kanalı açılarak 5.1'e göre hesaplanan burulma momentinin 1,5 kNm den 2,5kNm'ye çıkması sağlanmıştır. Kapline açılan 2. kama kanalı Şekil 14'de gösterilmiştir.



Şekil 14 Kapline açılan kama kanalları

Burulma momenti:

$$\varphi = \frac{T.L}{G.J} \quad (5.1)$$

## 5.2 Deney Sonuçları

Dişli test cihazına ait mil ve yatak hesapları yapılmıştır. Çalışma kapsamında öncelikle BAP projesi kapsamındaki deneyler gerçekleştirilmiştir. Çizelge 8’de özellikleri verilen deney dişlileri, döndüren dişli modül 6 imalat çeliği, deney dişlisi olarak modül 6 yüksek yoğunlu polietilen (HDPE) ve kestamid malzemeden yapılmıştır.

Çizelge 8: Düz deney dişlilerin özellikleri.

	<b>Döndüren Dişli (İmalat Çeliği)</b>	<b>Döndürülen Dişli (Polimer)</b>	<b>Birim</b>
Modül	6	6	(mm)
Kavrama Açısı	20	20	Derece (°)
Diş Sayısı	20	20	Adet
Diş Genişliği	60	60	(mm)
Dişli Çapı	120	120	(mm)
Mil Yuvası Çapı	24	24	(mm)
Kama Kanalı	8/4	8/4	(mm)
Diş açısı	0	0	Derece (°)

Deneylerde yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) dişli çarkın yük taşıma kapasitesi ve hasar oluşumu incelenmiştir. Çizelge 9’da görüldüğü üzere 1 numaralı deney 28,85 Nm moment altında 25°C ortam sıcaklığında 750 d/dk hızda gerçekleştirilmiş, 55284 çevrim sayısında %13 pozisyon değişimi, 120292 devir sayısında %25 pozisyon değişimi olduğu görülmektedir. 2 numaralı deney 20,6 Nm moment altında aynı ortam sıcaklığı ve devir hızında gerçekleşmiş, 70852 çevrim sayısında %13 pozisyon değişimi, 135568 devir sayısında %25 pozisyon değişimi meydana gelmiştir.

Çizelge 9: HDPE düz dişli deney verileri.

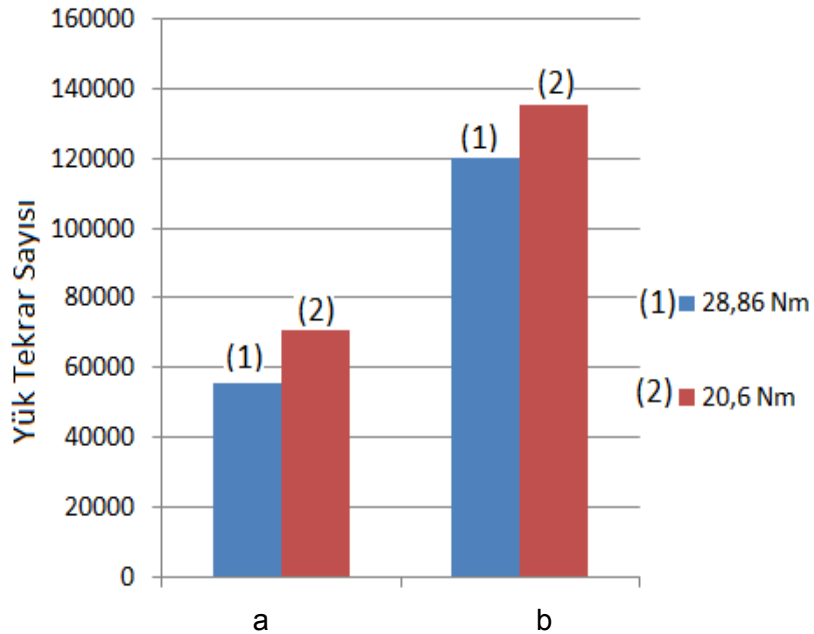
<b>Deney Numarası</b>	<b>Çalışma Devri (d/dk)</b>	<b>Burulma Momenti (Nm)</b>	<b>%13 Pozisyon Değişiminin Meydana Geldiği Çevrim</b>	<b>%25 Pozisyon Değişiminin Meydana Geldiği Çevrim</b>	<b>Çevrim Sayısı</b>
1	750	28,85	55284	120292	472682 (Kırılma Hasarı)
2	750	20,6	70852	135568	500000

Test dişlilerine ait resim Şekil 15’de verilmiştir. Sıcaklık etkisi görülmektedir. Polietilen dişlide, dişlilerin çalışması esnasında oluşan ısı, transfer yoluyla atılamamakta ve gövdede birikmektedir. Sıcaklık arttıkça polietilen yumuşamaktadır ve daha düşük yüklemelerde hasara uğramaktadır.



Şekil 15. Hasara uğramış HDPE dişli

Şekil 16’da 28,85 ve 20,6 Nm yüklerdeki pozisyon değişimleri karşılaştırılmıştır. Yük arttıkça pozisyon değişimi beklenildiği gibi daha düşük çevrim sayılarında meydana gelmiştir.



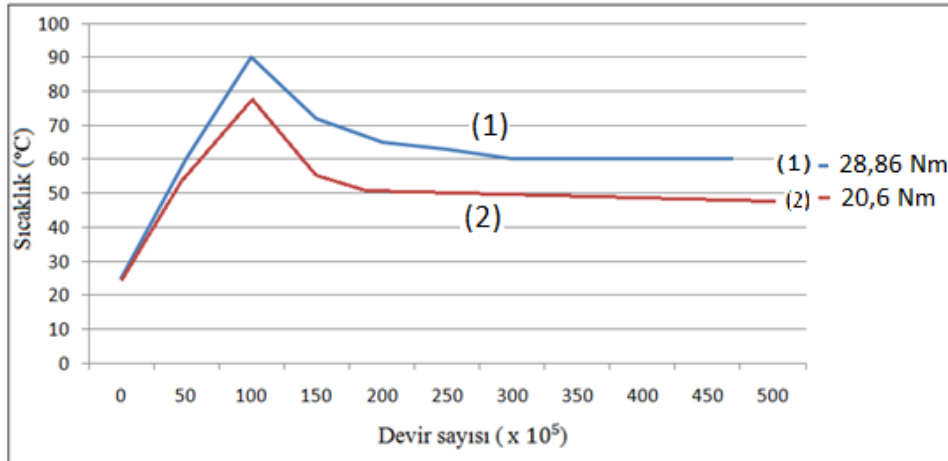
Şekil 16: 28,86 ve 20,6 Nm için çeşitli pozisyon değişiminin meydana geldiği çevrim sayıları, a.%13 pozisyon değişiminin meydana geldiği çevrim sayıları b. %25 pozisyon değişiminin meydana geldiği çevrim sayıları

Çizelge 10'da deney dişlilerinin çevrime bağlı olarak 750 d/dk hızdaki sıcaklık değerleri verilmektedir. Tablodan görüldüğü üzere, dişliler 25°C ortam sıcaklığından, 100000 devirde maksimum çalışma sıcaklıklarına ulaşmışlardır. Daha sonra 200000-250000 çevrim sayılarında rodajlarını tamamlamışlar ve sıcaklıkları ortalama çalışma sıcaklıklarına düşerek çalışmalarını tamamlamışlardır.

Çizelge 10: Deney dişlilerinin çevrime bağlı olarak 750 d/dk hızdaki sıcaklık değerleri.

Devir Sayısı (bin)	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
28,85 Nm Moment İçin Sıcaklık Değerleri (°C)	25	61	90	71	66	62	60	60	60	60	-
20,6 Nm Moment İçin Sıcaklık Değerleri (°C)	25	58	78	56	51	51	51	50	50	50	50

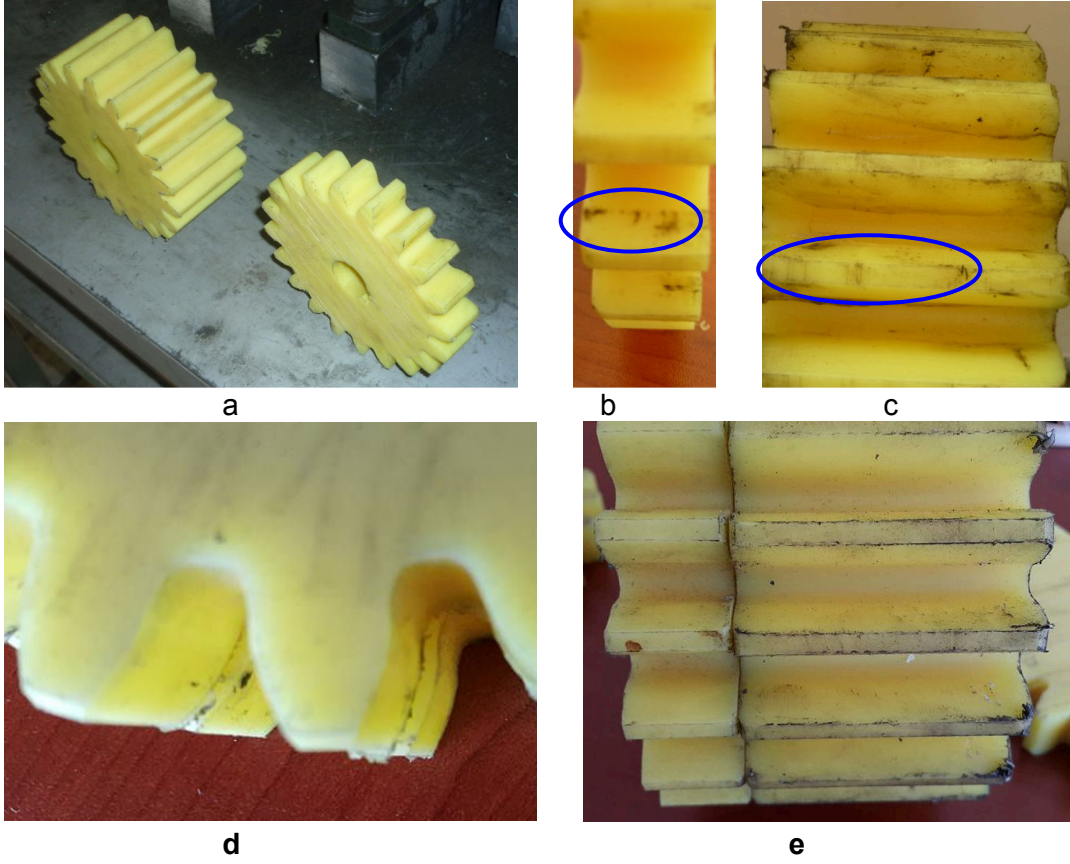
Şekil 17'de devir sayısına göre dişli sıcaklıkları verilmiştir. Şekil 12'den görüldüğü gibi deney dişlilerinin sıcaklıkları önce ani bir artış göstererek 78-90°C ulaşmış ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) dişlilerde yumuşama hasarı meydana gelmiştir. Dişliler çalıştırılmaya devam edildiğinde yüksek yoğunluklu polietilen dişlinin (HDPE) yüzeyinde camsı bir tabaka oluşmuş ve dişli pekleşmeye başlamıştır. Pekleşen dişlilerin çalışma sıcaklıkları giderek düşüş göstermiş ve 50-60°C ortalama sıcaklıkta çalışmaya devam etmiştir. 1 numaralı deney dişlisinde 472682 devir sayısında diş üstünde kırılma gerçekleşerek hasara uğramıştır. 2 numaralı deney dişlisi seçilen devir olan 500000 devre ulaşmıştır.



Şekil 17: Deney dişlilerinin çalışma sıcaklık değişimi

Projeye ait kısımda talaşlı imalat yoluyla üretilmiş kestamid dişlilerle deneyler gerçekleştirilmiştir. Delikli ve deliksiz şekilde planlanan deney numunelerinde öncelikle deliksiz 60 mm genişliğindeki dişliler ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde uzun

ömür değerleri ile birlikte ortam sıcaklığı 25 °C iken yapılan sıcaklık ölçümlerinde 40 °C dahi bulmayan sıcaklık değerleri nedeni ile 20mm ve 60 mm lik genişliklerde çeşitli devir sayılarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Şekil 18'de kestamid dişli numuneleri görülmektedir.



Şekil 18. Deneylerde kullanılan kestamid numuneler

a. Deneye tabi tutulmadan önce numuneler, b. Hasara uğrayan dişlilerde plastic deformasyon, c. %22 pozisyon değişimine kadar deneye tabi tutulan dişli ve deneye tabi tutulmamış dişli d. %22 pozisyon değişimine uğrayan dişlide diş kayması

Diş dibi kesitinin %22'si oranında pozisyon değişimine kadar deneye tabii tutulan dişlilerde şekil değişimi gözle görülebilecek seviyededir. Plastik malzemelerin esnek olmaları nedeniyle deney esnasında gerçekleşen şekil değişiminin bir kısmı elastic şekil değişimi olarak geri gelmektedir. Deney cihazı üzerinde plastic şekil değişiminin yalın halde sabitlenmesi mümkün olmadığından %22'lik pozisyon değişiminde 3,3 mm lik yer değiştirme ölçülmemektedir (Şekil 18.c).



Yapılan dişli test cihazında 90 derece açılı kaplin kullanılarak oluşturulan burulma momenti yanında fazladan açılan kama kanalları ile değişik momentler oluşturulmuştur. Deneyler esnasında 10 Hz, 15 Hz ve 20 Hz frekanslarında sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Her bir veri için en az 3 numune ile toplam 25 numune ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Çizelge 11'de deney sonuçları verilmiştir. Verilen değerler, %50 güvenirlilikte ortalama değerlerdir.

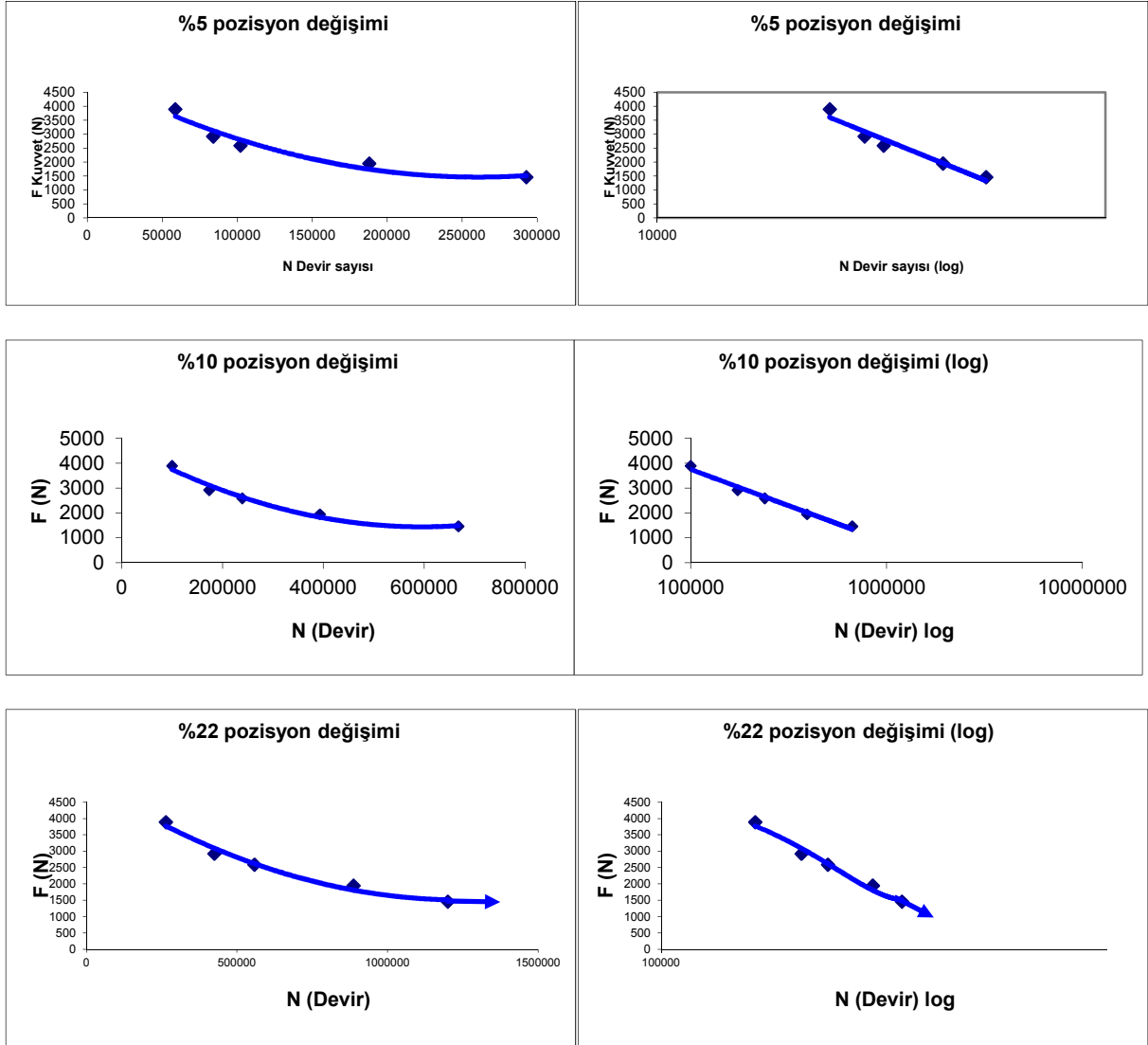
Çizelge 11. Kestamid numunelerin yorulma değerleri

Deney No	Diş üzerine gelen kuvvet F (N/mm)	%5 Pozisyon* Değişiminin Meydana Geldiği Çevrim	% 10 Pozisyon* Değişiminin Meydana Geldiği Çevrim	%22 Pozisyon* Değişiminin Meydana Geldiği Çevrim
1	43,2	>1000000	-	-
2	48,7	>1000000	-	-
3	73	292762	667851	>1000000
4	97	188063	392864	886944
5	130	102121	239027	557952
6	146	83975	173647	424923
7	195	58652	100018	263597

\*Diş dibi kalınlığının %5, %10 ve %22si kadarlık pozisyon değişimlerini ifade etmektedir.

Deney sonuçlarına bakarak kestamidin dişli malzemesi olarak uygun bir malzeme olduğunu söylemek mümkündür. Dişe gelen çizgisel kuvvet arttıkça beklenildiği gibi ömür değerleri düşmektedir. Deneyler esnasında hiçbir dişlide kırılma hasarı gözlenmemiş, sadece plastik deformasyon görülmüştür.

Deney sonuçları ile elde edilen Wöhler eğrileri Şekil 19'da gösterilmiştir.



Şekil 19. Wöhler eğrileri

## 6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

ANSYS ile bulunan devir sayıları da dış dibi gerilmeleri de daha düşüktür. BS6168 standardına göre yapılan hesaplamalarda dış dibi gerilmeleri daha yüksektir. ANSYS ve BS6168 numaralı standarda göre yapılan teorik hesaplama ve simülasyon sonuçları Çizelge 12'de sunulmuştur.

Çizelge 12. BS 6168 standardına göre teorik hesaplama ve ANSYS simülasyon sonuçları

Yük (N/mm)	Dış dibi gerilmesi (MPa)		Çevrim sayısı		
	ANSYS	BS 6168	ANSYS	BS 6168	Deney sonuçları*
25	7,05	12,4	$6,1443 \cdot 10^6$	$>10^9$	
50	14,11	23,35	$2,3822 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^8$	
65		31,72		$<300000$	
73					$>1000000$
75	21,17	35,12	13736	$<10^5$	
146					657952
195					263597

\* %5 pozisyon değişimi değerleridir.

Çizelge 'de görüldüğü gibi ANSYS ile oluşturulan verilerde dış dibi gerilmeleri ve ömür değerleri, BS 6168 ile elde edilen değerlere göre daha düşüktür. BS 6168 standardında çelik dişli-PA 66 kombinasyonu için temel dairesi hızının 10 m/s olması durumunda Wöhler eğrisi verilmiştir ve bu eğri  $10^5$  ile  $10^9$  çevrim sayısı aralığındadır. Nem oranı %40 nem olarak alınmıştır. ANSYS analizlerinde malzeme özellikleri PA6 olarak girilmiştir. Sonlu elemanlar metodu ile elde edilen sonuçlar, BS 6168 standardında pek çok kabul gerektiğinden ve fazla işlem gerektirdiğinden daha güvenilirdir.

Deneylerden elde edilen sonuçları karşılaştırmak için BS standardına göre hesaplamada en yakın veri olan polyamid/çelik kombinasyonu ile hesaplamalar yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçları tam hasar oluşmadan belirli deformasyon değerlerinde sonlandırılmıştır. Tam hasar için 50 N/mm'lik yükte BS standardına göre 200 milyon devir sayısı oldukça yüksek bir değerdir. 68 N/mm'lik yük için ise 300000 devir altında bir ömür belirlenmiştir. Deneylerde ise tam hasar oluşmadan 195 N/mm'de 263597 çevrim sayısı ile bu sınırın geçileceği bellidir. BS ile yaklaşık 68 N/mm yük için hesaplanan sıcaklık değeri 65 °C iken kestamidde deneyler esnasında 40 °C'ye ulaşılmamış olması nedeni ile daha yüksek ömür değerlerinin çıkması gayet normaldir.

Isı oluşumu durumunda Selçuk Üniversitesinde yapılmış çalışma ile diş yüzeylerine açılacak deliklerle modifiye edilmiş dişli üretiminden düşük ısı oluşumu nedeniyle vazgeçilmiştir. Yağlamasız kullanıma imkan sağlayan ve kendinden yağlayıcı olarak tanımlanan kestamid dişlilerde ısı transferi katsayısının poliamid dişlilere göre daha yüksektir.

Yapılan 25 adet deneyle yorulma eğrileri büyük ölçüde oluşturulmuştur. Kestamid dişliler dişli malzemesi olarak iyi performans ve boyut kararlılığı göstermektedir. Kestamid dişlilerin yorulma deneylerinde tamamen hasara uğrayacak kadar deneyler sürdürülmemiştir. Uzun süreli deneyler olduğu için bu konudaki çalışmalar devam edecektir. Dişlilerin farklı yüklerde çalışmalarına imkan tanıyan düzeneklerin tasarlanması gerekmektedir. Kestamid dişliler ile ilgili olarak da farklı yüklemelerle çalıştırılacak numuneler ile deneyler gerçekleştirilerek sonuçları değerlendirilmelidir. Projede yapılan deneylerle kestamidin dişli malzemesi olarak kullanım için mükemmel performansa sahip bir polimer malzeme olduğu söylenebilir.

BS 6168 standardında PA66-Çelik ve POM-Çelik dişlilerin 10 m/s hızda modül 3 dişliler için Wöhler eğrileri mevcuttur. Plastik dişlilerin hesaplarının daha pratik hale getirilmesi için kalibrasyonu sağlanmış cihazlarda testlerinin gerçekleştirilerek karşılaştırılmaları gerekmektedir.

## KAYNAKLAR

ANDO, M., KALACSKA, G. 2000, The effects of humidity on surface resistance of magnesium catalyzed cast polyamide 6, Szent Istvan University, Faculty of Mechanical Engineering, 120-125.

BİRLEY, A. W., HEATH, R. J., SCOTT, M. J. 1988, *Plastics Materials Properties And Applications*, 2nd Edition, *Chapman And Hall*, New York, Pp: 117-120

BS6168:1987, Non-metallic spur gears.

CALLİSTER, D. W. JR. 2002, "Materials science and engineering an introduction", Wiley international edition, *John Wiley&Sons Inc.*, New York, 480-491, 509-510, 517.

CAN, H. 2004, Öngerilmeli Plastik Dişli Çark Tasarımı, (Doktora Tezi), *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.

COWIE, J. M. G. 1998, "Polymers: Chemistry & Physics of Modern Materials", 2nd edition, *Stanley Thornes (publishers) Ltd.*, United Kingdom, 274-288.

CRAWFORD, R. J. 1987, "Plastics Engineering", 2 nd Edition, *Pergamon Press*, Oxford, 12-26, 109-140, 154-160.

CRİPPA, G., DAVOLİ, P. 1995, Comparative Fatigue Resistance Of Fiber Reinforced Nylon 6 Gears, *Journal Of Mechanical Design, Transactions Of The Asme*, 117 (1): 193-198.

DÜZCÜKOĞLU, H. DEMİRCİ, M.T. YAKUT, R. EKİNCİ, Ş. 2009, Plastik Dişli Çark Diş Yüzeyinde Oluşan Temas Sıcaklığının Diş Hasarı Üzerine Etkisi, , 5. Uluslar Arası Malzeme Sempozyumu, Karabük, Türkiye

DÜZCÜKOĞLU, H. 2009a, PA 66 Spur Gear Durability Improvement With Tooth Width Modification, *Materials And Design* 30, 1060–1067,.

DÜZCÜKOĞLU, H. 2009b, Study On Development Of Polyamide Gears For Improvement Of Load-Carrying Capacity, *Tribology International*, 42, 1146-1153,.

FEYZULLAHOĞLU, E., SAFFAK, Z. 2008, The tribological behaviour of different engineering plastics under dry friction conditions, *Materials and Design* 29 205-211, Kocaeli, Türkiye,.

GOSAVI, V.P., CHİKATE, P.P., Comparison Of Static And Dynamic Performance Of Polycarbonate Filled And Unfilled Gears, *Materials For The New Millennium Proceedings Of The Materials Engineering Conference*, New York, 338-347 (1996)

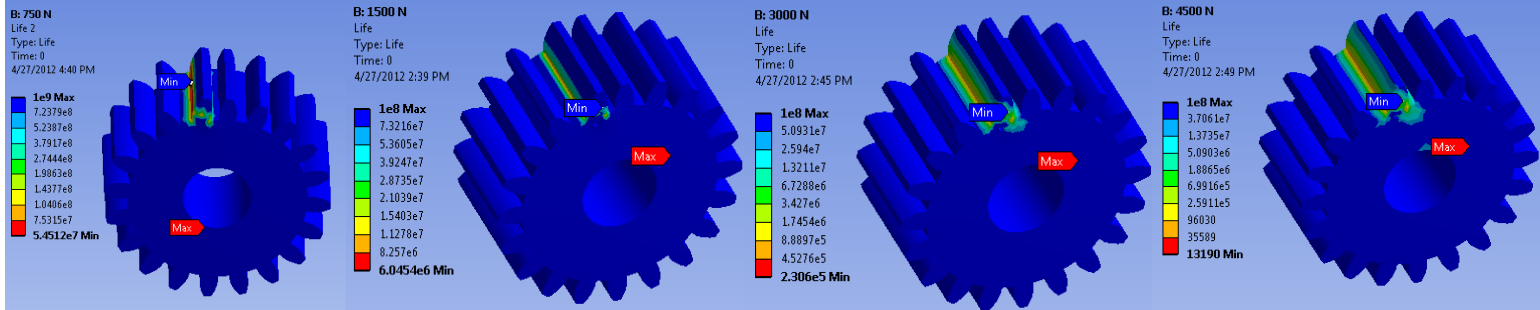
İRMEK, H. 2009, Performance improvement method for Nylon 6 spur gears, *Tribology International*, 42 (3), 503-510.

KANG, S. C., CHUNG, D. W. 2000, The synthesis and frictional properties of lubricant-impregnated cast nylons, *Wear* 239, p.244–250.

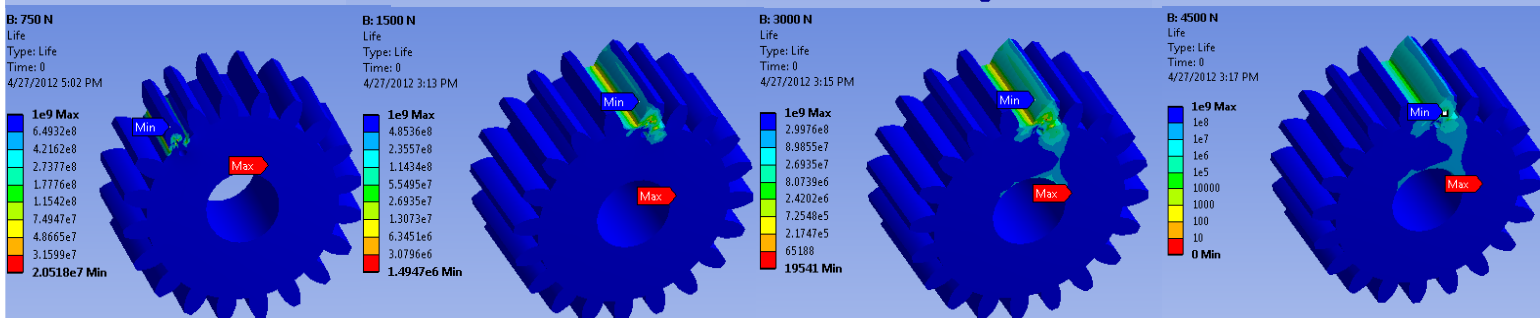
KANG, S.C., CHUNG, D.W. 2003, Improvement of frictional properties and abrasive wear resistance of nylon/graphite composite by oil impregnation, *Wear* 254 103-110.

KIZILASLAN K., İŞEL B., YAVUZ İ. 2010, Dişli Çarklarda Meydana Gelen Hasar Türleri, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi Cilt.7 No: 1* 119-129 Afyon, Türkiye,

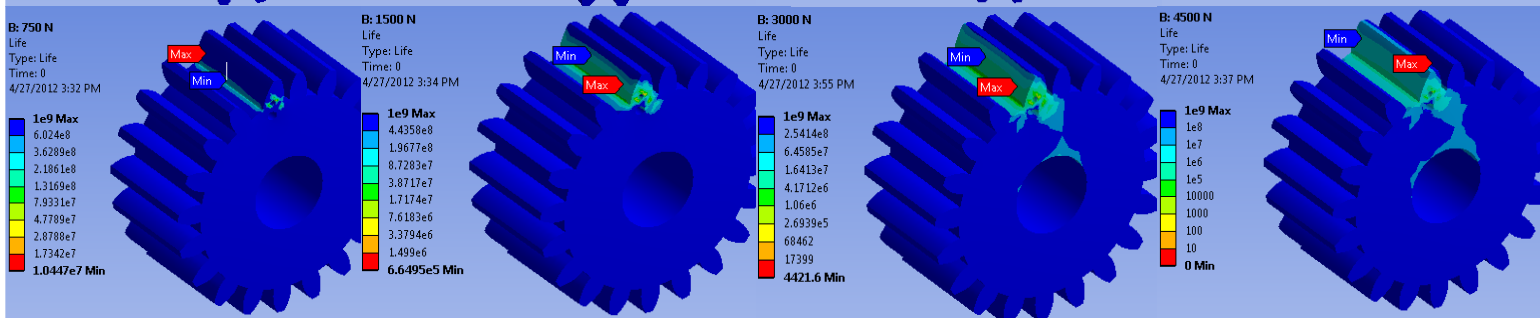
- KIM, C. H. 2006, Durability improvement method for polyamide spur gears, *Tribology International* 39, 1454-1461.
- KOHAN, M. I. 1995, *Nylon Plastics Handbook*, Hanser Publication, Munich, 30-45.
- KUROKAWA, M., UCHIYAMA, Y., NAGAI, S. 1999, Performance Of Plastic Gear Made Of Carbon Fiber Reinforced Poly-Ether-Ether-Ketone, *Tribology International*, 32 (9): 491-497.
- LIN, J.X., WANG, C.Y., ZHENG, Y.Y. 2008, Prediction of isothermal crystallization parameters in monomer cast nylon 6, *Computers and Chemical Engineering*
- MAO, K. 2007, A new approach for polyamide composite gear design, *Wear*, 262, 432-441.
- MAO, K., LI, W., HOKE, C.J., WALTON, D. 2009, Friction and wear behaviour of acetal and nylon gears, *Wear* 267, 639-645.
- RAO, M., HOOKE, C.J., KUKUREKA, S.N., LIAO, P., CHEN, Y.K. 1998, Effect Of Ptfе On The Friction And Wear Behavior Of Polymers In Rolling-Sliding Contact, *Polymer Engineering And Science*, 38 (12): 1946-1958.
- SAMYN P., TUZOLANA T. M. 2007, Effect of test scale on the friction properties of pure and internal-lubricated cast polyamides at running-in, *Polymer Testing* 26, 660–675.
- SAMYN, P., BAETS, P. D., SCHOUKENS, G., DRIËSSCHE, I. V. 2007, Friction, wear and transfer of pure and internally lubricated cast polyamides at various testing scales, *Wear* 262 1433–1449.
- TSUKAMOTO, N., MARUYAMA, H., KOBAYASHI, T. 1993, Operating Characteristics Of Super Engineering Plastic Gears (1st Report, Polyimide Gears), *Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, C Hen/Transactions Of The Japan Society Of Mechanical Engineers*, 59 (557): 238-245.
- TSUKAMOTO, N., MARUYAMA, H., MATSUMOTO, T. 1995a, Study On Liquid Crystal-Polymer Gears *Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, C Hen/Transactions Of The Japan Society Of Mechanical Engineers*, 61 (590): 4082-4087
- TSUKAMOTO, N., MARUYAMA, H., MIMURA, H. 1996, Study On Nylon Mxd 6 Gears Filled With Glass Fibers *Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, C Hen/Transactions Of The Japan Society Of Mechanical Engineers*, 62 (593): 298-305.
- TSUKAMOTO, N., MARUYAMA, H., MIMURA, H. 1995b, Polymer Alloy Gears (Polymer Alloy Gears Consisting Of Polyacetal And Polyurethane), *Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, C Hen / Transactions Of The Japan Society Of Mechanical Engineers*, 61 (581): 245-252.
- TSUKAMOTO, N., MIMURA, H., UZUKA, K. 1997, Study On Polyacetal Gears Filled With Talc *Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, C Hen/Transactions Of The Japan Society Of Mechanical Engineers*, 63 (610): 2118-2125
- YABE, T., TAKAJI, T., KATO, S., UEKI, F. 2000, Lubricant-supplying properties and durability of oil-impregnated polymers, *Tribol. Trans.* 43 453–458.



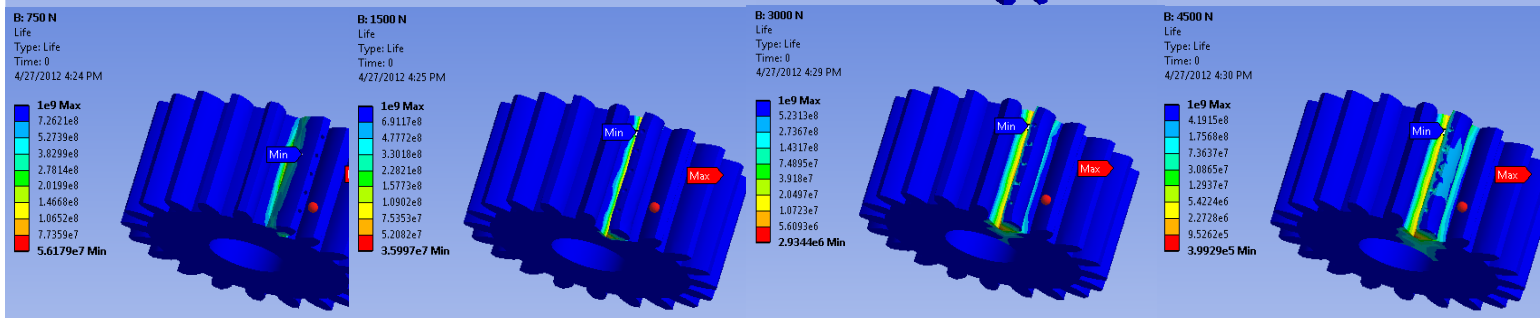
3 mm tek delikli



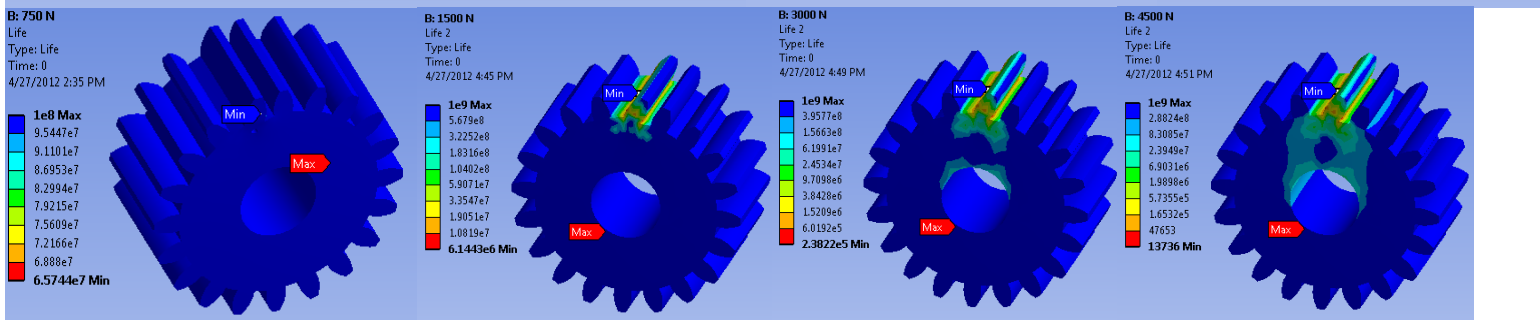
2 mm ve 4 mm iki delikli



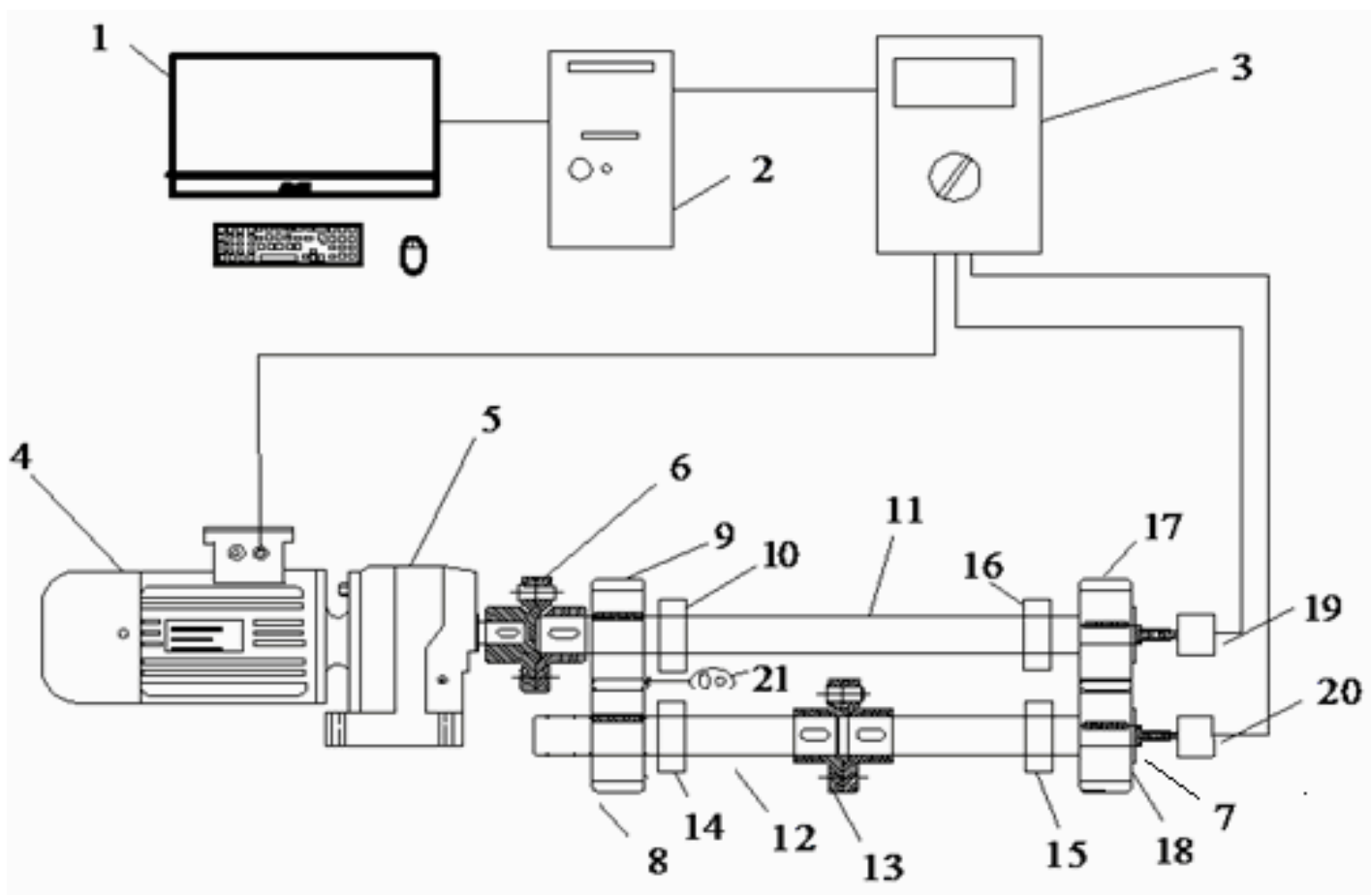
3 mm ve 5 mm iki delikli



2 mm dikey delik



Modifiyesiz



- |                       |                     |
|-----------------------|---------------------|
| 1-Bilgisayar monitörü | 11- Mil-1           |
| 2-Bilgisayar kasası   | 12- Mil-2           |
| 3-Kontrol paneli      | 13-Yük kaplini      |
| 4-Elektrik motoru     | 14- Rulman-3        |
| 5-Redüktör            | 15- Rulman- 4       |
| 6-Bağlantı kaplini    | 16- Rulman-5        |
| 7-Rondela             | 17-Deney dişlisi-1  |
| 8-Çelik dişli-1       | 18- Deney dişlisi-2 |
| 9-Çelik dişli-2       | 19-Encoder-1        |
| 10- Rulman-2          | 20-Encoder-2        |
|                       | 21-Lazer termometre |







**TÜBİTAK**  
**PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje Yürütücüsü:	Yrd. Doç. Dr. HİLAL CAN
Proje No:	110M690
Proje Başlığı:	Döküm Poliamid (Kestamid) Dişlilerin Yorulma Ömürlerinin Ve Aşınma Davranışlarının Belirlenmesi
Proje Türü:	Araştırma
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	FATİH CEMAL CAN
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	PAMUKKALE Ü. TEKNİK EĞİTİM F. MAKİNE EĞİTİMİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/05/2011 - 01/05/2013
Onaylanan Bütçe:	86290.0
Harcanan Bütçe:	51449.83
Öz:	Bu projede, kendinden yağlamalı özelliklere sahip Kestamidden üretilmiş dişlilerin yorulma dayanımları incelenmiştir. Kestamid atmosfer koşullarında dökülebilir bir poliamid türüdür ve döküm poliamid adı ile anılmaktadır. 25 tane dişli ile yapılan deneylerde belirli pozisyon değişimleri için çevrim sayıları bulunmuştur. Deney sonuçları teorik hesaplamalar ve ANSYS sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Kestamid dişlilerde en belirgin olarak dişliler çalışırken ısı oluşumunun yüksek olmamasıdır. Polyamide göre yüksek yorulma dayanımı değerleri elde edilmiştir. ANSYS ile elde edilen sonuçlarla deney sonuçları uyumludur.
Anahtar Kelimeler:	Kestamid, Döküm Poliamid, Yorulma
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır