

DÜZ DIŞLI ÇARKLARDAKİ GERİLME GİDERME DELİKLERİNİN OPTİMUM KONUMUNUN BELİRLENMESİ

Oğuz DOĞAN ^{*ID}
Muhammed Safa KAMER ^{*ID}

Alınma: 21.07.2025 ; düzeltme: 11.10.2025 ; kabul: 13.10.2025

Öz: Diş dibinde oluşan gerilmeler, dişlinin dayanıklılığı ve ömrü açısından kritik öneme sahiptir. Yüksek gerilmeler, erken yorulma ve hasara yol açabileceğinden, bu gerilmelerin doğru analiz edilmesi gereklidir. Bu çalışmada, düz dişli çarklarda diş dibi gerilmelerini azaltmak amacıyla gerilme giderme deliklerinin konumlandırılması sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir. Oluşturulan dişli geometrileri, ANSYS Workbench'te analiz edilmiştir. Çalışma üç aşamada gerçekleştirilmiştir: İlk olarak, tek delik için delik çapı ve merkez uzaklığı parametreleri beş ve üç farklı seviyede değerlendirilerek 15 model analizi yapılmıştır. İkinci aşamada, çift delik için delik çapı, diş dibi dairesine uzaklık ve merkez açısı üç seviyede incelenmiş, toplam 27 analiz gerçekleştirilmiştir. Son aşamada ise, optimum delik konfigürasyonu üzerinde farklı kesici takım uç yarıçaplarının gerilme üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Analiz sonuçları, delik çapı ve merkez uzaklığının artmasının gerilme değerlerini belirgin şekilde yükselttiğini ortaya koymuştur. Çift delik senaryolarında, deliklerin diş dibinden belirli bir uzaklığa konumlandırılması ve geniş merkez açıları gerilme azaltımını desteklemiştir. Kesici takım uç yarıçapı değişiminin ise gerilme giderme performansı üzerinde anlamlı etkisi olmadığı bulunmuştur. Sonuç olarak incelenen üç senaryo için de açılan gerilme giderme deliklerinin gerilme düşüşü üzerinde belirgin bir etkiye sahip olmadığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dişli çarklar, Diş dibi gerilmesi, Gerilme giderme delikleri, Sonlu elemanlar analizi

Determination of the Optimum Location of Stress Relief Holes in Spur Gears

Abstract: Stresses occurring at the gear root are critical for the durability and lifespan of the gear. High stress concentrations can lead to fatigue and failure; therefore, accurate analysis of these stresses is essential. In this study, the placement of stress relief holes to reduce root stresses in spur gears was investigated using the finite element method. The gear geometries were modeled and analyzed in ANSYS Workbench. The study was conducted in three phases: firstly, 15 models were analyzed by varying the hole diameter and center distance at five and three levels, respectively, for a single hole; secondly, 27 analyses were performed for double-hole configurations by varying hole diameter, distance from the root circle, and central angle at three levels each; finally, the effect of different cutting tool tip radii on the optimal hole configuration was examined. The results revealed that increasing hole diameter and center distance significantly increased the stress values. For double-hole cases, positioning the holes at a certain distance from the root circle and using larger central angles contributed to stress reduction. However, variations in cutting tool tip radius had no significant effect on the performance of stress relief holes. Overall, it was concluded that the introduced stress relief holes had no substantial impact on reducing root stresses across the examined scenarios.

Keywords: Gears, Bending stress, Stress relief holes, Finite element analysis

* Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
46040 Onikişubat Kahramanmaraş
İletişim Yazarı: Yazar Adı Soyadı (oguzdogan@ksu.edu.tr)

1. GİRİŞ

Dişli çarklar, mekanik güç iletiminde en yaygın kullanılan elemanlardan biridir. Kompakt yapıları, yüksek verimlilikleri ve farklı hız-tork oranlarını kolayca sağlayabilmeleri sayesinde diğer güç aktarma organlarına göre önemli avantajlar sunarlar. Bu nedenle otomotivden savunma sanayine, endüstriyel makinelerden saat mekanizmalarına kadar pek çok alanda tercih edilirler.

Dişli çarklarda özellikle diş kökü gibi bölgelerde oluşan gerilmeler, zamanla yorulmaya bağlı çatlaklara ve arızalara neden olabilir. Bu gerilmelerin doğru şekilde hesaplanması, dişli tasarımının güvenliği ve uzun ömürlü olması açısından kritik öneme sahiptir. Hatalı gerilme tahminleri, sistem arızalarına ve yüksek bakım maliyetlerine yol açabilir. Bu nedenle, literatürde dişli çarklardaki gerilme dağılımını analiz eden ve azaltmaya yönelik tasarım iyileştirmeleri öneren birçok çalışma bulunmaktadır. Doğan ve diğ. (2018) dişli çarklarda diş dibi bölgesinde oluşan eğilme gerilmelerinin azaltılması için DIN 3990 standardına dayalı grafik yöntem ve sonlu elemanlar analizlerini birlikte kullanılarak, beş farklı tasarım parametresinin (diş sayısı, basınç açısı, profil kaydırma, diş başı yüksekliği, kesici takım uç yarıçapı) gerilme üzerindeki etkileri incelemişlerdir. En belirgin etki, kesici takım uç yarıçapının artırılmasıyla elde edilmiş ve %30'a varan gerilme azalması sağlanmıştır. Grafik yöntemin özellikle standart dışı dişli tasarımlarında hızlı ve güvenilir sonuçlar verdiği görülmüştür. Vigneshwaran ve diğ. (2020) taş kırma makinesine ait düz dişli çarkta oluşan eğilme gerilmeleri, teorik Lewis denklemi ve sonlu elemanlar yöntemi (FEA) kullanılarak analiz edilmiştir. C15 çeliği yerine daha yüksek mekanik özelliklere sahip C45 çeliği kullanılarak eğilme gerilmesinin azaldığı ve yük taşıma kapasitesinin arttığı görülmüştür. Ayrıca, dişli modül değerleri 2 ile 7 arasında değiştirilerek gerilme üzerindeki etkileri incelenmiş ve modül arttıkça eğilme gerilmesinin azaldığı belirlenmiştir. Patil ve diğ. (2016) dişlilerde temas gerilmesinin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle (FEM) analizi yapılmıştır. Gerçek çalışma koşullarında temas gerilmelerini ölçmek için yeni bir deney düzeneği olan Gear Dynamic Stress Test Rig (GDSTR) kullanılmıştır. Deneysel veriler, 5° ve 25° helis açısına sahip dişli çiftleri üzerinde toplanmış ve FEM ile elde edilen sonuçlarla büyük oranda uyum göstermiştir. Çalışma, dişli temasında sürtünmenin önemli bir etkisi olduğunu ortaya koymuş, ayrıca test düzeneğindeki küçük hizalama ve titreşim sorunları da teknik iyileştirmelerle giderilmiştir. Zhou ve diğ. (2024) ortogonal yüzey dişlilerde (face gear) diş dibi eğilme gerilmesini analiz etmek için yeni bir yöntem önerilmiştir. Yöntem, diş temas analizi (TCA) ve yük altındaki temas analizi (LTCA) ile diş yüzeyi yük dağılımını ve diş kökü gerilmesini hesaplamaktadır. Elde edilen sonuçlar, sonlu elemanlar yöntemi ve deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Önerilen yöntem, FEM'e göre benzer doğrulukta sonuçlar verirken çok daha kısa sürede (5 saat yerine 40 saniye) hesaplama yapabilmektedir. Bu da yöntemin hem doğru hem de yüksek verimli olduğunu göstermektedir. Çavdar ve diğ. (2005) asimetrik diş yapısına sahip evolvent düz dişliler için eğilme gerilmesini minimize etmeye yönelik bir yöntem geliştirmişlerdir. DIN 3990/Metot C ve ISO/TC60 standartlarından uyarlanan diş modeli kullanılarak, süren taraf basınç açısına bağlı olarak eğilme gerilmesi ve temas oranındaki değişimler bilgisayar programı ile incelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi (ile yapılan analizler, program sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bulgular, asimetrik dişlerin, simetrik dişlere göre eğilme gerilmesini azaltmada daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, süren taraf basınç açısının artması ile eğilme gerilmesinin azaldığı ve yük taşıma kapasitesinin arttığı doğrulanmıştır. Yılmaz ve diğ. (2019) çelik diş ve alüminyum göbekli bimetalik düz dişlilerin statik ve dinamik davranışlarını sayısal olarak incelemiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle diş kökü gerilmeleri ve rijitlik analiz edilmiş, halka kalınlığı azaldıkça gerilme artarken ağırlık %40'a kadar azalmıştır. Optimum halka kalınlıkları 3,5 mm ve 5 mm olarak belirlenmiştir.

Bazı araştırmacılar standart olmayan dişli çarklarda gerilmenin hesaplanması üzerine çeşitli çalışmalarda bulunmuşlardır. Spitas ve diğ. (2007), standart dışı evolvent dişlilerde diş dibi gerilmesini en aza indirmek amacıyla diş geometrisini optimize etmişlerdir. Optimize edilen diş tasarımı, diş dibi gerilmesinde %8,5 oranında bir azalma sağlamış ve bu sonucu deneysel olarak

doğrulamışlardır. Francesco ve Marini (2007), asimetrik dişlilerden maksimum performans elde etmek amacıyla diş tasarımı optimize etmek için çeşitli bilgisayar programları geliştirmiştir. Costopoulos ve Spitas (2009) ise, asimetrik diş profilleriyle yaptıkları tasarımlarda simetrik profilli dişlilere kıyasla %28 oranında daha yüksek yük taşıma kapasitesi elde etmişlerdir. Pedersen (2010), takım geometrisinin değiştirilmesiyle elde edilen optimize edilmiş asimetrik dişli tasarımı sayesinde eğilme gerilmesinin azaldığını göstermiştir.

Düz dişli çarklarda gerilme giderme delikleri, özellikle diş kökü gibi yüksek gerilme yoğunlaşmalarının olduğu kritik bölgelerde açılan küçük deliklerdir. Bu delikler, diş kökündeki gerilmenin tek bir noktada toplanmasını engelleyerek, gerilmenin daha dengeli ve yaygın bir şekilde dağılmasını sağlar. Böylece, diş kökünde oluşan yüksek gerilmeler azalır. Literatür incelendiğinde düz dişli çarklardaki gerilme giderme delikleri üzerine bir çok çalışmanın olduğu görülmektedir. Hamed ve Alharthy (2014) çarkların diş dibi gerilmelerini azaltmak için gövdeye delikler açılarak gerilme azaltıcı yapılar oluşturulmuştur. Abaqus ile sonlu elemanlar analizi yapılarak, deliksiz modelle karşılaştırılmış ve analitik sonuçlarla uyum sağlanmıştır. Deliklerin sayısı, çapı, konumu ve açısının gerilme üzerindeki etkileri incelenmiştir. Delik çapı ve sayısının artması gerilmeleri önemli ölçüde azaltırken, çok delikli modellerde dişlinin rijitliği olumsuz etkilenmiştir. En iyi sonuçlar, tek delik için Z eksenine 45° açıyla yerleştirildiğinde elde edilmiştir. Chavan ve diğ. (2024) dişli çarklarda gerilme azaltmak için gövdeye farklı sayıda, boyutta ve konumda delikler açarak stres giderme özellikleri incelenmişlerdir. Sonuçlar, iki delik kullanımının gerilme azaltmada daha etkili olduğunu, deliklerin boyut, konum ve sayısındaki küçük değişikliklerin gerilme üzerinde büyük etkisi olduğunu göstermiştir. Diş köklerindeki gerilmeleri azaltmak amacıyla dişlinin iç kısmına delikler açılarak stres giderme özellikleri Fredette ve Brown (1997) tarafından araştırılmıştır. Sonlu elemanlar modeli ve fotoelastik testlerle, delik boyutu ve konumunun diş kökü gerilmeleri üzerindeki etkisi sistematik olarak incelenmiştir. Bulgular, uygun yerleştirilen deliklerle diş kökü çekme gerilmesinin %8,8'e kadar azaltılabileceğini ve bazı delik kombinasyonları ile yüzey gerilmesinin %15,8 oranında düşürülebileceğini göstermiştir. Kumar ve diğ. (2017) diş kökünden belirli bir uzaklıkta dairesel ve eliptik şekilli gerilme giderici delikler açarak gerilme düşürülmesini amaçlamışlardır. ANSYS Workbench kullanılarak yapılan analizlerde, eliptik deliklerin gerilme azaltımında daha etkili olduğu bulunmuştur. Ayrıca, dişlinin kütlesini azaltmak için düşük gerilimli bölgelere daha büyük delikler açılarak kütle azaltımı sağlanmıştır. Sonuç olarak, gerilme yüzde 20 oranında azaltılmış ve kütle azaltımıyla birlikte dişlinin yorulma ömrü artırılmıştır. Thoan ve diğ. (2015), düz dişli çarklarda diş dibi gerilmelerini azaltmak amacıyla stres giderici deliklerin konum ve boyutları optimize etmişlerdir. Ansys Workbench ile yapılan sonlu eleman analizlerinden elde edilen verilerle metamodel oluşturulmuş ve genetik algoritma kullanılarak deliklerin en uygun yerleri belirlenmiştir. Önerilen optimizasyon tasarımı ile diş dibi maksimum gerilmesi %14,69 oranında azaltılmıştır. Çalışma, statik analizle sınırlı olup yorulma dayanımı değerlendirilmemiştir. Ayrıca, sabit geometriler yerine delik şekillerinin topoloji optimizasyonu ile belirlenmesinin daha etkili olabileceği belirtilmiştir. Savran ve Karpat (2024) düz ve helisel dişlilerde diş dibi gerilmelerini azaltmak amacıyla stres giderici deliklerin optimal boyut ve konumları sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. SolidWorks'te oluşturulan 3B modeller, ANSYS ortamında sekiz farklı delik kombinasyonu ile statik yük altında incelenmiştir. Düz dişlide 50 mm çaplı daire üzerine yerleştirilen 1,25 mm çapında delikler, diş dibi gerilmesini %3,1 oranında azaltmış ve dişli kütlesinde azalma sağlamıştır. Ancak aynı yaklaşım helisel dişlide etkili olmamış, gerilme azaltımı sağlanamamıştır. Delik çapı arttıkça deformasyon artmış, deliklerin diş köküne yaklaşması da deformasyonu daha fazla artırmıştır.

Bu çalışmada, düz dişli çarklarda diş dibi gerilmesini azaltmak amacıyla gerilme giderme deliklerinin farklı boyut ve konumlarının etkileri incelenmiştir. Öncelikle, tek delik bulunan dişlilerde delik çapı ve dişli merkezinden uzaklık parametreleri sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Ardından, çift delik uygulamalarında deliklerin diş dibi dairesine olan uzaklığı, çapı ve merkez açısı parametreleri farklı seviyelerde değerlendirilmiştir. Son olarak, en uygun delik

konfigürasyonu için kesici takım uç yarıçapının değişiminin gerilme üzerindeki etkisi araştırılmıştır. İncelenen tüm durumlar değerlendirildiğinde sonuç olarak açılan gerilme giderme deliklerinin dış dibi gerilmeleri üzerinde kayda değer bir etkisi olmadığı bazı durumlarda gerilmeyi arttırdığı tespit edilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Düz Dişli Çark Tasarımı ve Olası Deliklerin Konumlarının Belirlenmesi

Bu çalışmada, dişli geometrileri Litvin'in vektör yöntemine dayalı matematiksel modelleme ile oluşturulmuştur. Bu yöntemde, öncelikle dişlileri üreten kremayer tipli kesici takımının, denklemleri ve sınırları belirlenir. Daha sonra, koordinat dönüşümü, diferansiyel geometri ve dişli teorisi kullanılarak düz dişli geometrisi oluşturulur. Bu amaçla daha önceden MATLAB ortamında hazırlanan dişli tasarım programı kullanılmıştır.

Sonlu elemanlar modellerinde kullanılan dişli çarkların temel tasarım parametreleri Tablo 1' de verilmiştir. Tasarlanan düz dişli çarklar 5 mm modüle 25 diş sayısına sahip olup, basınç açısı, diş başı ve diş dibi yükseklikleri standart değerler dikkate alarak tasarlanmıştır. Ayrıca sonlu elemanlar modelinde ağ sayısının gereksiz yere artmaması için diş genişliği birim uzunluk olarak 1 mm tercih edilmiştir. Çalışmanın birinci ve ikinci kısmında ele alınan tek ve çift delik bulunan analizlerde kesici takım uç yarıçapı 0,375*m olarak standart değer olarak alınmıştır. Çalışmanın üçüncü bölümünde, en iyi performansı gösteren delik kombinasyonu için kesici takımın uç yarıçapının etkisi incelenmiştir; bu kapsamda uç yarıçapı 0,1*m, 0,375*m ve tam yuvarlak uç olacak şekilde ele alınmıştır.

Tablo 1. Dişli tasarım parametreleri

Parametre	Değer	Parametre	Değer
Modül (m)-(mm)	5	Diş dibi yüksekliği (h_f)	1,25*m
Diş sayısı (z)	25	Basınç açısı (α)-(°)	20
Diş genişliği (b)-(mm)	1	Kesici takım uç yarıçapı (ρ)	0,375*m (standart testlerde), 0,1*m, Tam yuvarlık uç
Diş başı yüksekliği (h_a)	1*m		

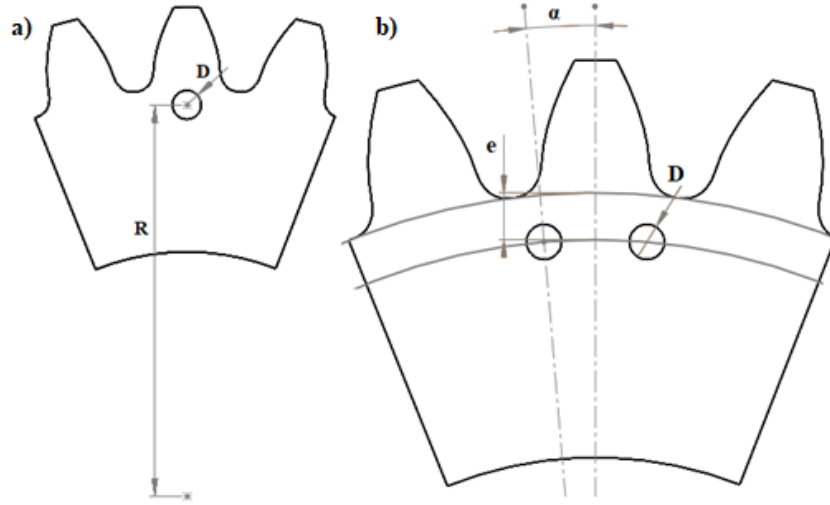
Çalışmanın birinci bölümünde, tek bir gerilme giderme deliğinin dış dibi gerilmesi üzerindeki etkisi sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Şekil 1a incelendiğinde, tek delik durumunda deliğin dışın tam simetri eksenine yerleştirildiği, deliğin merkezinin dişli merkezine olan uzaklığının (R), çapının ise (D) olduğu görülmektedir. Bu bölümde incelenen tasarım parametreleri ile her bir parametrenin seviye değerleri Tablo 2'de sunulmaktadır.

Tablo 2 incelendiğinde, delik merkezinin dişli merkezine olan uzaklığının (R) beş farklı seviyede, 48 mm ile 60 mm arasında ve 3'er mm aralıklarla değiştiği; delik çapının (D) ise üç farklı seviyede, 2 mm ile 6 mm arasında ve 2'ser mm aralıkla belirlendiği görülmektedir. Tam faktöriyel deney tasarımı kapsamında, çalışmanın birinci bölümünde toplam on beş farklı sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, tek bir gerilme giderme deliği için delik konumunun ve çapının dış dibi gerilmeleri üzerindeki etkisi sistematik olarak incelenmiştir.

Tablo 2. Tek delik için tasarım parametreleri ve seviyeleri

Parametre / Seviye	Merkez uzaklığı (R)-(mm)	Delik çapı (D)-(mm)
Seviye 1	48	2
Seviye 2	51	4
Seviye 3	54	6
Seviye 4	57	-
Seviye 5	60	-

Çalışmanın ikinci bölümünde ise diş dibi bölgesine çift delik açılması durumunda oluşan gerilme değişimi incelenmiştir. Şekil 1b’de görüldüğü üzere, deliklerin diş dibi daireesine olan uzaklığı (e), delik çapı (D) ve merkez açısı (α) değişken parametreler olarak dikkate alınmıştır. Bu parametrelerin her biri üç farklı seviyeye sahiptir ve bu seviyeler Tablo 3’te sunulmaktadır. Üç parametre ve her biri için üç seviye içeren bu tasarım kapsamında, tam faktöriyel deney yöntemiyle toplam yirmi yedi farklı sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve analiz edilmiştir. Böylece, dişli geometrisi üzerinde deliklerin konumlandırılabilceği çeşitli olasılıklar detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir.

**Şekil 1:**

Gerilme giderme deliklerinin dişli üzerine konumlandırılması

a. Tek deliğin durumu b. Çift delik durumu

Tablo 3. Çift delik için tasarım parametreleri ve seviyeleri

Parametre / Seviye	Diş dibi daireesine uzaklık (e)-(mm)	Delik çapı (D)-(mm)	Merkez açısı (α)-(°)
Seviye 1	2	1	2,4
Seviye 2	4	2	4,8
Seviye 3	6	3	7,2

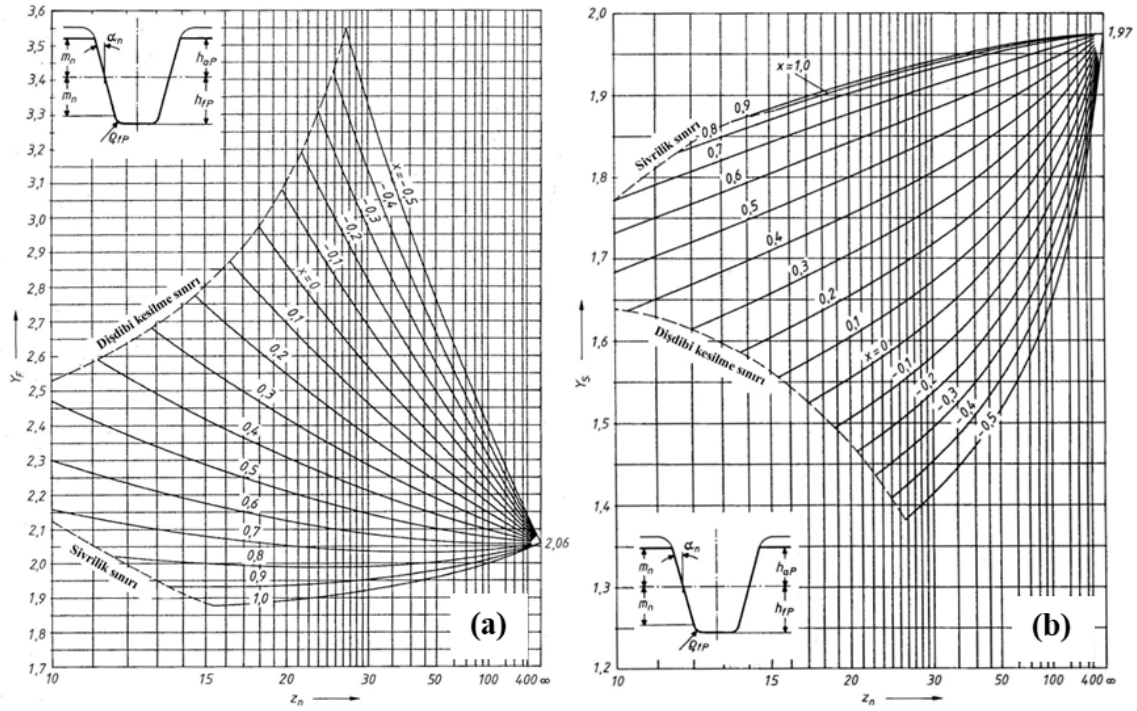
2.2. Dış Dibinde Oluşan Gerilmelerin Sonlu Elemanlar Analizleri ile Belirlenmesi

Literatürde, simetrik diş profiline sahip evolvent düz dişlilerde diş dibi gerilmesinin hesaplanmasına yönelik çeşitli standartlar geliştirilmiştir. Bu standartlar arasında ISO 6336 ve DIN 3990 en yaygın olarak kullanılanlardır. Her ne kadar bu iki standart birbirine benzerlik gösterse de aralarında bazı küçük farklılıklar bulunmaktadır. Bu çalışmada sonlu elemanlar modelinin doğrulanması için herhangi bir delik bulunmayan dil geometrisi için DIN 3990 standardı ile gerilmeler analitik olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler nümerik sonuç ile kıyaslanarak modelin doğruluğu gösterilmiştir.

DIN 3990'a göre standart bir dişli çarkta meydana gelen diş dibi gerilmesi aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanabilir.

$$\sigma_F = \frac{F_t}{b \cdot m} Y_{Fa} Y_{Sa} Y_\epsilon Y_\beta \quad (1)$$

Burada σ_F – diş dibi gerilmesi, F_t – teğetsel dişli kuvveti, b – diş genişliği, m – normal modül, Y_{Fa} – diş form faktörü, Y_{Sa} – gerilme düzeltme faktörü, Y_ϵ – kavrama faktörü, Y_β – helis faktörü olarak tanımlanır. DIN 3990'a göre standart boyutlara sahip evolvent bir dişli çark için diş form faktörü ve gerilme düzeltme faktörü Şekil 2a ve 2b kullanılarak alınabilir.



Şekil 2:

DIN3990'a göre ($\rho=0,375 \cdot m$, $h_a=1 \cdot m$, $h_f=1,25 \cdot m$) (DIN3990, 1987 ve Babalık ve Çavdar, 2018)

a. Diş form faktörü **b.** Gerilme düzeltme faktörü

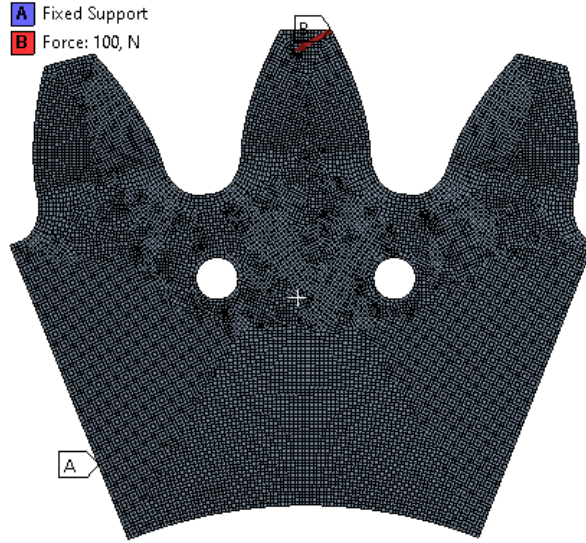
Kavrama faktörü ve helis faktörü ise eşitlik 2 ve 3 kullanılarak hesaplanabilir.

$$Y_{\varepsilon} = 0,25 + \frac{0,75}{\varepsilon_{\alpha}} \quad (2)$$

$$Y_{\beta} = 1 - \varepsilon_{\beta} \frac{\beta^{\circ}}{120^{\circ}} \quad (3)$$

Burada ε_{α} – kavrama oranı, ε_{β} – adım kavrama oranı, β – helis açısı olarak tanımlanır. Bu çalışmada, diş dibi gerilmesi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak tek bir diş üzerinde hesaplanmıştır. Bu nedenle, bazı varsayımlar yapılmıştır. Hesaplamalar tek diş üzerinde yapıldığı için kavrama faktörü dikkate alınmamıştır. Tek dişe etki eden yük, diş ucuna uygulanmış ve düz dişlilerde helis açısı sıfır olduğundan helis faktörü eşitlik 3’te hesaplandığı gibi 1 olarak alınmıştır.

Diş dibi bölgesine açılan deliklerin diş dibi gerilmesi üzerindeki etkisini incelemek amacıyla sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda öncelikle, Tablo 1’de verilen tasarım parametreleri esas alınarak dişli modeli oluşturulmuştur. Daha sonra, Tablo 2 ve Tablo 3’te belirtilen delik parametrelerine göre tek ve çift delik içeren dişli geometrilerinin CAD tasarımları yapılmıştır. Her bir parametre kombinasyonu için ilgili geometri ayrı ayrı tasarlanmıştır. Oluşturulan CAD modelleri STEP formatına dönüştürülerek, sonlu elemanlar analizlerinin yapılabilmesi amacıyla ANSYS Workbench yazılımına aktarılmıştır.



Şekil 3:
Sonlu elemanlar modeli ağ yapısı ve sınır şartları

ANSYS Workbench ortamına aktarılan dişli geometrileri yapısal statik (static structural) bölümünden analiz edilmiştir. Bu çalışmada sadece diş dibinde meydana gelen gerilmenin değişimi incelendiğinden kuvvet değerleri malzemenin akma noktası altında gerilme oluşturacak şekilde seçilmiştir. Bu nedenle malzeme tanımı yaparken, malzeme lineer elastik malzeme olarak tanımlanmıştır. Dişli malzemesi olarak bu çalışmada yapısal çelik kullanılmıştır. Bu çelik elastisite modülü 200000 N/mm^2 ve Poisson oranı 0,3 alınarak tanımlaması gerçekleştirilmiştir. Malzeme tanımının ardından modelin ağ yapısı oluşturulmuştur.

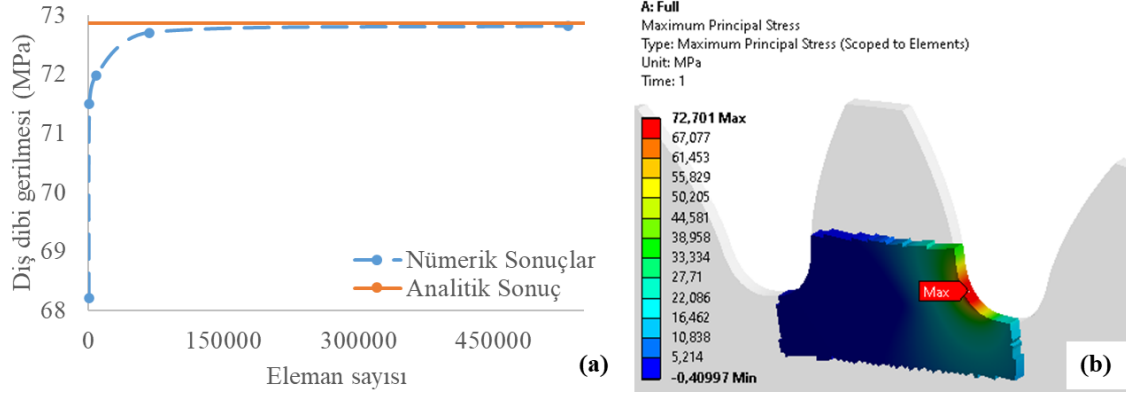
Bu çalışmada kullanılan sonlu elemanlar modelinin ağ (mesh) yapısı, tam dolu (deliksiz) dişli geometrisi için yaklaşık 67700 adet hegzahedral (Solid186 ve Solid187) eleman ve 325000 düğüm noktası içermektedir. Ağ yapısının genel görünümü Şekil 3'te sunulmuştur. Gerilme giderme delikleri içeren modellerde delik çapının değişimine bağlı olarak ağ yapısında toplam eleman sayısında küçük farklılıklar oluşsa da tüm analizlerde aynı eleman türü ve sabit eleman boyutu tercih edilerek analizlerin karşılaştırılabilirliği sağlanmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinin doğruluğunu arttırmak ve sayısal kararlılığı sağlamak amacıyla, tam dolu dişli modeli üzerinde ağdan bağımsızlık çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda sırasıyla 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm ve 0,125 mm eleman boyutlarına sahip farklı ağ yapıları oluşturulmuş ve her bir ağ için diş dibi bölgesinde oluşan maksimum gerilme değerleri kaydedilmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen bu gerilme değerleri, DIN 3990 standardı temel alınarak hesaplanan analitik sonuçlarla karşılaştırılmış ve bu karşılaştırma sonucunda sonlu elemanlar analizleri için en uygun eleman boyutu belirlenmiştir.

Ağ yapısının oluşturulmasının ardından, modelin sınır şartları tanımlanmıştır. Sonlu elemanlar modelinde uygulanan sınır koşulları Şekil 3'te gösterilmektedir. Dişe uygulanan yük, tekil bir statik kuvvet olarak ve temel daire doğrultusundaki teğetsel yönde, sadece bir dişin ucuna uygulanmıştır. Bu uygulama yöntemi, literatürde sıklıkla kullanılan ve diş dibi gerilmesini temsil eden en kritik yükleme koşulunu yansıtmaktadır. Dişli geometrisi, yan yüzeylerinden ve alt yüzeyinden tamamen sabitlenerek yer değiştirmeye karşı sınırlandırılmıştır. Böylece, yükün doğrudan etkisiyle oluşacak yerel gerilmelerin gerçekçi biçimde modellenmesi sağlanmıştır.

Tanımlanan sınır koşulları ve belirlenen ağ yapısı ile birlikte, her bir geometri için sonlu elemanlar analizi çalıştırılmış ve diş dibi bölgesinde oluşan maksimum gerilmeler elde edilmiştir. Bu analizler, üç ayrı aşamada gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın birinci bölümünde, farklı delik konumları ve çaplarını içeren on beş analiz; ikinci bölümünde, çift delik durumlarında çeşitli geometrik parametre kombinasyonlarını kapsayan yirmi yedi analiz ve üçüncü bölümde, kesici takım uç yarıçapının etkisini incelemek amacıyla dört analiz gerçekleştirilmiştir. Böylece, çalışma kapsamında toplam kırk altı adet sonlu elemanlar analizi başarıyla tamamlanmış ve tüm analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Ağdan bağımsızlık çalışması kapsamında, farklı eleman boyutlarına sahip sonlu elemanlar modelleri oluşturularak diş dibi gerilmesi değerleri hesaplanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Eleman boyutu 2 mm olan kaba ağ yapısında, yalnızca 288 eleman içeren modelde 68,201 MPa'lık bir gerilme değeri elde edilmiştir. Eleman boyutu 1 mm'ye düşürüldüğünde (1070 eleman), bu değer 71,491 MPa'a yükselmiş; 0,5 mm eleman boyutunda (8622 eleman) ise 71,970 MPa olarak hesaplanmıştır. Eleman boyutu 0,25 mm'ye düşürüldüğünde, 67770 eleman içeren modelde 72,701 MPa'lık bir gerilme değeri elde edilmiştir. Bu sonuç, DIN 3990 standardına göre analitik olarak hesaplanan 72,862 MPa'lık değere oldukça yakın olup, çözüm hassasiyetinin sağlandığını göstermektedir. Daha ince ağ yapısına sahip olan 0,125 mm eleman boyutuyla oluşturulan ve 532944 eleman içeren modelde ise bu değer yalnızca 0,112 MPa artarak 72,813 MPa'a ulaşmıştır. Ancak eleman sayısındaki bu büyük artış, analiz süresini anlamlı şekilde uzatmakta ve bilgisayar belleğinde gereksiz şekilde yüksek miktarda veri depolanmasına neden olmaktadır. Bu bağlamda hem çözüm doğruluğunu sağlamak hem de işlem süresi ile bellek kullanımı açısından verimli bir analiz gerçekleştirmek amacıyla, 0,25 mm eleman boyutuna ve 67770 eleman sayısına sahip ağ yapısı optimum seçim olarak belirlenmiştir. Çalışmanın devamındaki tüm sonlu elemanlar analizlerinde bu ağ yapısı kullanılmıştır. Şekil 4'te ağdan bağımsızlık sonuçları gösterilmektedir.

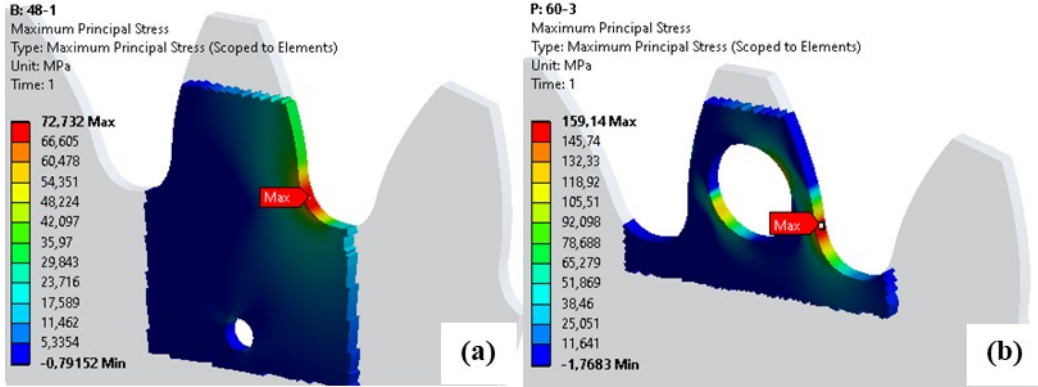


Şekil 4:

a. Ağdan bağımsızlık çalışması sonuçları b. Tam dolu durum için gerilme sonuçları

3.1. Tek Delik için Gerçekleştirilen Analiz Sonuçları

Tek gerilme giderme deliklerine sahip dişliler için elde edilen sonlu elemanlar analiz sonuçları Tablo 4’te gösterilmektedir. Tablo 4 incelendiğinde en düşük gerilme değerinin 72,732 MPa gerilme ile D1 deneyinde olduğu en yüksek gerilme değerinin ise 159,14 MPa’lık gerilme değeri ile D15 deneyinde olduğu görülmektedir. Şekil 5’te tek delik durumundaki minimum ve maksimum durumdaki dişli üzerindeki gerilme dağılımları görülmektedir. Minimum gerilme durumunda gerilmenin diş kökü boyunca dağıldı, maksimum durumda ise bir noktada toplandığı görülmektedir.



Şekil 5:

Tek delik için elde edilen gerilme değerleri

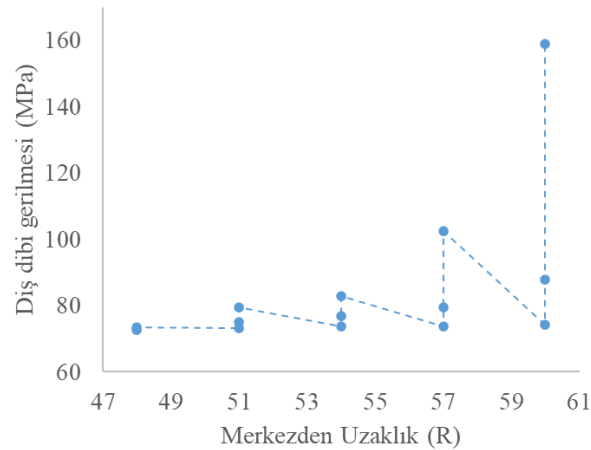
a. Minimum gerilme durumu b. Maksimum gerilme durumu

Analitik hesaplama sonucunda diş dibinde oluşan gerilme değeri 72,862 MPa olarak bulunmuştur. Bu değer, Tablo 4’teki sonuçlarla karşılaştırıldığında, sadece D1 durumunda gerilmede çok küçük bir azalma gözlenmiş; diğer durumlarda ise tam dolu duruma göre gerilmenin arttığı tespit edilmiştir. Bu değerlerin referans durumdan yüksek olması, uygun şekilde konumlandırılmamış deliklerin gerilme azaltmak yerine yük yollarını bozarak stres konsantrasyonuna yol açabileceğini ortaya koymaktadır.

Tablo 4. Tek gerilme giderme delikleri için sonlu elemanlar analiz sonuçları

Deney No	(R)	(D)	Diş dibi gerilmesi (MPa)	Deney No	(R)	(D)	Diş dibi gerilmesi (MPa)
D1	48	2	72,732	D9	54	6	82,967
D2	48	4	72,912	D10	57	2	73,701
D3	48	6	73,526	D11	57	4	79,373
D4	51	2	73,208	D12	57	6	102,62
D5	51	4	75,05	D13	60	2	74,167
D6	51	6	79,526	D14	60	4	87,756
D7	54	2	73,684	D15	60	6	159,14
D8	54	4	76,751	Tam dolu			72,862

Delğin hem çapı hem de merkezden uzaklığı arttıkça diş dibi bölgesinde oluşan maksimum gerilme değerleri belirgin şekilde yükselmektedir. Örneğin, $R = 60$ mm ve $D = 6$ mm parametrelerine sahip D15 numaralı analizde 159,14 MPa gibi oldukça yüksek bir gerilme değeri elde edilmiştir. Bu değer, referans durumun iki katından fazladır ve deliklerin gelişigüzel yerleştirilmelerinin yapısal açıdan ciddi zafiyetlere yol açabileceğini göstermektedir. Benzer şekilde, D13 ve D12 gibi deneylerde de gerilme değerlerinin sırasıyla 102,62 MPa ve 79,373 MPa'a çıktığı görülmektedir. Şekil 6 incelendiğinde merkezden uzaklığı artışı, delik çapının artışına göre diş dibi gerilmelerini daha çok arttırdığı görülmektedir. Genel eğilim değerlendirildiğinde, delğin küçük çaplı ve dişli merkezine yakın olacak şekilde yerleştirildiği durumlarda gerilme artışı minimal seviyede kalmakta; ancak yine de deliksiz duruma kıyasla belirgin bir azalma sağlanamamaktadır. Bu durum, tek bir delğin mevcut konfigürasyonlarda gerilme azaltma performansının sınırlı olduğunu ve yer yer ters etki doğurabildiğini ortaya koymaktadır.

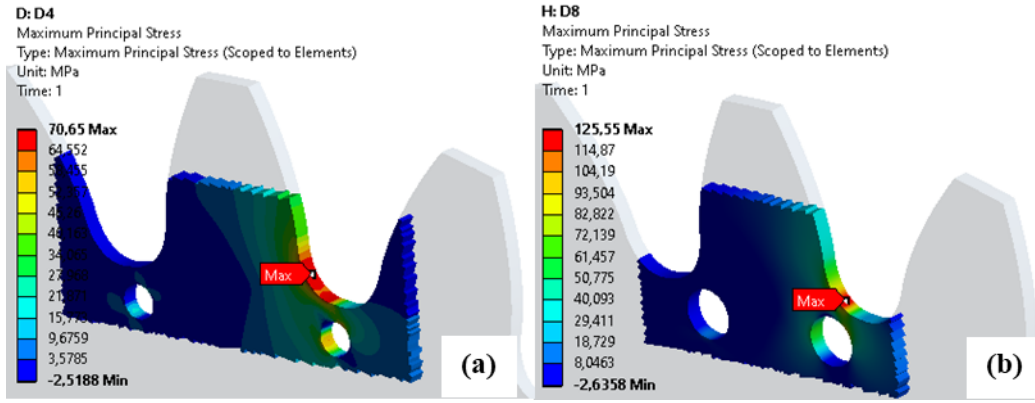
**Şekil 6:**

Merkezden uzaklığa bağlı olarak tek delik içi diş dibi gerilmelerinin değişimi

3.2. Çift Delik için Gerçekleştirilen Analiz Sonuçları

Çift gerilme giderme deliklerine sahip dişli çarklara ait sonlu elemanlar analiz sonuçları Tablo 5'te sunulmaktadır. Bu analizlerde; delik merkezlerinin diş dibi dairesine olan uzaklığı (e), delik çapı (D) ve iki delik arasındaki merkez açısı (α) parametreleri dikkate alınmış ve her biri üç farklı seviyede değerlendirilmiştir. Bu kapsamda toplam yirmi yedi farklı parametre kombinasyonu için analiz gerçekleştirilmiş ve her bir durumda diş dibi bölgesinde oluşan maksimum gerilme değerleri hesaplanmıştır. Tablo 5 incelendiğinde en düşük gerilme değerinin 70,65 MPa gerilme ile D4 deneyinde olduğu görülmektedir (Şekil 7a). Benzer şekilde D1 (72,298 MPa) ve D19 (72,791 MPa) numaralı deneylerde de tam dolu durumun altında sonuçlar elde edilmiştir. En düşük gerilme durumu göz önüne alındığında tam dolu duruma göre yaklaşık %3' lük bir gerilmeye iyileşme sağlanabilmiştir.

İncelenen durumlar arasında en yüksek gerilme ise 125,55 MPa'lık gerilme değeri ile D8 deneyinde olduğu görülmektedir (Şekil 7b). Delik konumunun doğru seçildiği durumda gerilme diş kökü boyunca yayılmakta ve değeri düşmektedir, diğer taraftan doğru konumlandırılmamış bir delik diş kökünde çentik etkisine neden olmakta ve diş dibi gerilmeleri ani olarak artmaktadır.



Şekil 7:

Çift delik için elde edilen gerilme değerleri

a. Minimum gerilme durumu b. Maksimum gerilme durumu

Diş dibi dairesine olan uzaklık (e), deliklerin diş dibine olan konumunu belirlediği için gerilme dağılımı üzerinde doğrudan etkili bir parametredir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, genel olarak e değeri arttıkça diş dibi gerilmesi düşme eğilimi göstermektedir. Özellikle $e = 2$ mm olan D5 (88,705 MPa), D6 (78,816 MPa), D7 (119,91 MPa) ve D8 (125,55 MPa) numaralı deneylerde oldukça yüksek gerilmeler hesaplanmıştır. Bu değerler, deliklerin diş çok yakın yerleştirildiğinde, yapısal bütünlüğün bozulduğunu ve gerilme yığılmalarının oluştuğunu göstermektedir. Öte yandan, $e = 6$ mm olan deneylerde (örneğin D25: 73,581 MPa, D27: 75,042 MPa) gerilme değerleri daha stabil ve düşüktür. Bu durum, deliklerin diş dibinden belirli bir uzaklığa alınmasının gerilme azaltımı açısından daha güvenli olduğunu göstermektedir.

Delik çapı (D), dişli üzerindeki malzeme kaybının doğrudan göstergesidir ve artan çap, taşıma kesitini zayıflatarak genellikle daha yüksek gerilme değerlerine neden olur. Tablo 5 verilerine göre, $D = 1$ mm olan deneylerde diş dibi gerilmesinin genel olarak daha düşük seyrettiği gözlemlenmektedir. Örneğin D1 (72,298 MPa), D3 (74,145 MPa) ve D10 (72,802 MPa) gibi deneylerde gerilmeler, tam dolu modele yakın ya da altında kalmıştır. Buna karşılık, $D = 3$ mm olan deneylerde (örneğin D7: 119,91 MPa; D8: 125,55 MPa) gerilme değerlerinin çok ciddi şekilde arttığı görülmektedir. Buna göre, delik çapının artması, özellikle delikler diş çok yakın konumlandırıldığında yapının direncini önemli ölçüde zayıflatmaktadır.

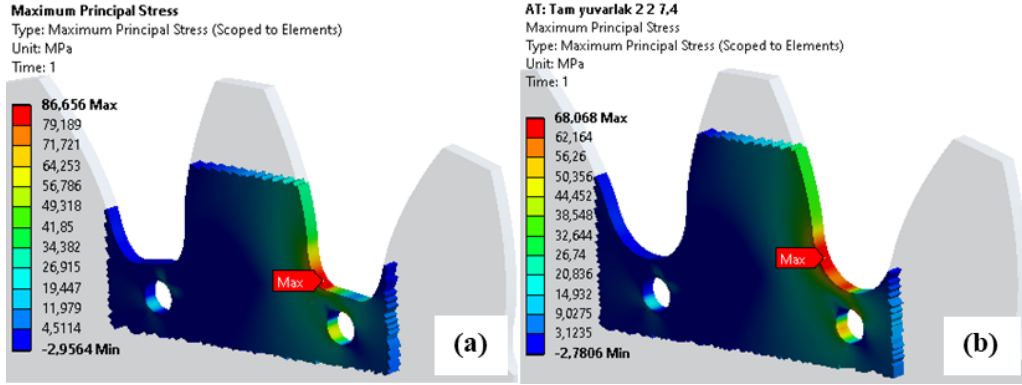
Merkez açısı (α), çift delik arasında kalan açı farkını ifade eder ve deliklerin göreceli yerleşim yönünü belirler. Tablo 5'te $\alpha = 2,4^\circ, 4,8^\circ$ ve $7,2^\circ$ olarak değerlendirilmiştir. Genel eğilim, açının büyümesiyle birlikte dış dibi gerilmesinin azaldığı yönündedir. Özellikle $\alpha = 7,2^\circ$ olan kombinasyonlarda, D4 deneyinde olduğu gibi (70,65 MPa) gerilme en düşük seviyeye inmiştir. Bu durum, delikler arasında daha geniş açı oluşturulmasının gerilme yığılmalarını engelleyerek daha dengeli bir yük dağılımı sağladığını göstermektedir. Tersine, $\alpha = 2,4^\circ$ olan dar açılı konfigürasyonlarda (örneğin D8: 125,55 MPa) iki delik arasındaki malzeme miktarı azaldığı için bu bölgede yüksek gerilme yoğunlukları oluşmaktadır.

Tablo 5. Çift gerilme giderme delikleri için sonlu elemanlar analiz sonuçları

Deney No	(e)	(D)	(α)	Dış dibi gerilmesi (MPa)	Deney No	(e)	(D)	(α)	Dış dibi gerilmesi (MPa)
D1	2	1	7,2	72,298	D15	4	2	2,4	75,424
D2	2	1	4,8	75,136	D16	4	3	7,2	73,916
D3	2	1	2,4	74,145	D17	4	3	4,8	80,742
D4	2	2	7,2	70,65	D18	4	3	2,4	80,135
D5	2	2	4,8	88,705	D19	6	1	7,2	72,791
D6	2	2	2,4	78,816	D20	6	1	4,8	72,873
D7	2	3	7,2	119,91	D21	6	1	2,4	72,884
D8	2	3	4,8	125,55	D22	6	2	7,2	73,076
D9	2	3	2,4	87,775	D23	6	2	4,8	73,431
D10	4	1	7,2	72,802	D24	6	2	2,4	73,551
D11	4	1	4,8	73,24	D25	6	3	7,2	73,581
D12	4	1	2,4	73,318	D26	6	3	4,8	74,596
D13	4	2	7,2	73,122	D27	6	3	2,4	75,042
D14	4	2	4,8	75,309	Tam dolu				72,862

3.3. Farklı Kesici Takım Uç Yarıçapları için Gerçekleştirilen Analiz Sonuçları

Çalışmanın üçüncü kısmında ise en düşük dış dibi gerilmesine sahip tasarım parametreleri için farklı kesici takım uç yarıçapları ile dişli çarklar tekrardan tasarlanmıştır. Bu sayede kesici takım uç yarıçapını değişiminin delik performansını artırıp artırmadığı tespit edilmeye çalışılmıştır. Standart olarak kullanılan 0,375*m dışında 0,1*m ve tam yuvarlak uçlu kesici takım uç yarıçaplarına sahip tam dolu ve optimum tasarım parametreleriyle çift gerilme deliğine sahip dişli geometrileri tasarlanmış ve sonlu elemanlar analizlerine tabi tutulmuştur.



Şekil 8:
Farklı kesici takım uç yarıçapı için analiz sonuçları
a. $\rho=0,1\text{m}$ b. $\rho=0,375\text{m}$

Şekil 8’de optimum tasarım parametreleriyle tasarlanan çift gerilme giderme deliğine ve farklı kesici takım uç yarıçaplarına sahip dişli çarklar için gerçekleştirilen sonlu elemanlar analiz sonuçları görülmektedir. $0,1\text{m}$ kesici takım uç yarıçapına sahip durumda gerilme değeri $86,656\text{ MPa}$ olurken tam yuvarlak uçlu takım kullanıldığında gerilme $68,068\text{ MPa}$ ’a düşmektedir. Kesici takım uç yarıçapının artmasıyla gerilme değerinin etkili bir şekilde düştüğü görülmektedir. Her bir kesici takım uç yarıçapına sahip dişliler tam dolu olarak da tasarlanmış ve tam dolu durum ile çift gerilme deliği olduğu durum karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonuçları Tablo 6’da gösterilmektedir. Tablo 6’ya göre, gerilme düşüşü en çok standart durum yani $0,375\text{m}$ kesici takım uç yarıçapına sahip dişli çarklar olduğu görülürken en az gerilme düşüşü ise tam yuvarlak durum için olduğu tespit edilmiştir. Gerilme düşüşleri tüm durumlar için %3’ün altında kaldığı görülmektedir. Sonuç olarak kesici takım uç yarıçapı değişiminin, gerilme giderme deliklerinin performansını üzerine kayda değer bir etkisi olmadığı görülmektedir.

Tablo 6. Kesici takım uç yarıçapı değişiminin % gerilme düşüne etkisi

Kesici takım uç yarıçapı (ρ)	Tam dolu durum	Çift gerilme deliği	% Gerilme düşüşü
$0,1\text{m}$	88,561	86,656	%2,15
$0,375\text{m}$	72,862	70,65	%2,66
Tam yuvarlak uç	69,526	68,068	%2,09

4. SONUÇ

Bu çalışmada, düz dişli çarkların diş dibi bölgelerinde gerilme azaltımına yönelik olarak uygulanan gerilme giderme deliklerinin etkinliği sayısal yöntemlerle değerlendirilmiştir. Farklı parametre kombinasyonlarının diş dibi gerilmeleri üzerindeki etkisi sonlu elemanlar analizleri ile incelenmiş ve elde edilen bulgular ışığında tasarım açısından önemli sonuçlara ulaşılmıştır. Çalışma kapsamında toplam 46 farklı analiz gerçekleştirilmiş ve analizler üç temel aşamada yürütülmüştür: Tek delikli tasarımlar, çift delikli tasarımlar ve kesici takım uç yarıçapı değişiminin etkisi.

İlk aşamada, diş köküne tek bir delik yerleştirilerek bu deliğin çapı ve dişli merkezine olan uzaklığı sistematik şekilde değiştirilmiştir. Analizler sonucunda, deliğin çapı ve konumunun diş

dibi gerilmeleri üzerinde doğrudan etkili olduğu tespit edilmiştir. Özellikle deliğin çapı ve merkezden uzaklığı arttıkça gerilme değerlerinde ciddi bir yükselme görülmüştür. D15 numaralı analizde, en büyük delik çapı ve merkez uzaklığı kombinasyonu ile 159,14 MPa gibi referans durumun iki katını aşan bir gerilme değeri elde edilmiştir. Bu durum, uygun konumlandırılmamış tek bir deliğin bile dişli çarkın yapısal bütünlüğünü ciddi şekilde zayıflatabileceğini göstermektedir. Buna karşın, küçük çaplı ve merkeze yakın konumlandırılmış deliklerde gerilme artışı sınırlı kalmış; ancak tam dolu duruma kıyasla belirgin bir iyileşme sağlanamamıştır.

Çalışmanın ikinci aşamasında, diş dibi bölgesine simetrik olarak yerleştirilen çift delik konfigürasyonları değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, deliklerin diş dibi dairesine olan uzaklığı (e), delik çapı (D) ve delikler arası merkez açısı (α) değişkenleri üçer seviyede ele alınarak toplam 27 farklı analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerin sonucunda, bazı kombinasyonların gerilmeyi tam dolu duruma göre düşürebildiği gözlemlenmiştir. Özellikle $e = 2$ mm, $D = 2$ mm ve $\alpha = 7,2^\circ$ parametrelerine sahip D4 numaralı deneyde 70,65 MPa ile en düşük gerilme değeri elde edilmiştir. Bu durum, uygun yerleştirilen çift deliklerin, tek delikli tasarımlara kıyasla daha etkili bir gerilme azaltımı sağlayabileceğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, yanlış seçilen parametrelerle yapılan çift delik tasarımları da yapısal açıdan olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir. Özellikle delik çapının büyük, açı farkının dar ve deliklerin diş dibine çok yakın olduğu durumlarda (örneğin D8 – 125,55 MPa) gerilme değerlerinin referans durumun çok üzerine çıktığı görülmüştür.

Üçüncü ve son aşamada, en iyi performansı gösteren delik kombinasyonu için kesici takım uç yarıçapının (ρ) etkisi araştırılmıştır. 0,1m, 0,375m ve tam yuvarlak uçlu takımlar için hem tam dolu hem de çift delikli dişli geometrileri oluşturularak karşılaştırmalı analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kesici takım uç yarıçapı arttıkça diş kök bölgesindeki gerilme değeri azalmaktadır. En düşük gerilme değeri, tam yuvarlak uçlu kesici takım kullanıldığında 68,068 MPa olarak elde edilmiştir. Ancak bu gerilme düşüşlerinin tüm durumlar için %3'ün altında kaldığı, dolayısıyla uç yarıçapı değişiminin genel performans üzerindeki etkisinin sınırlı olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgu, takım geometrisinin tek başına belirleyici bir unsur olmadığını, ancak uygun delik konumlandırmasıyla birlikte değerlendirildiğinde faydalı olabileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak, dişli çarklarda uygulanan gerilme giderme delikleri, doğru tasarlandıklarında diş dibi gerilmesini sınırlı da olsa azaltabilmektedir. Ancak bu tasarımın, rastgele parametrelerle yapılması durumunda gerilme yığılmalarına yol açarak yapısal zafiyet oluşturabileceği de açıkça görülmüştür. Bununla birlikte, literatürde diş dibi gerilmesini azaltmak amacıyla basınç açısının optimize edilmesi, diş kök yarıçapının optimize edilmesi, yüzey sertleştirme, diş başı yüksekliğinin değiştirilmesi gibi yöntemlerin daha etkili sonuçlar verdiği bilinmektedir. Bu doğrultuda, delik uygulamasının etkisi sınırlı kalmış olsa da diğer yöntemlerle birlikte kullanılması durumunda tasarım güvenilirliğine katkı sağlaması beklenmektedir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Bu çalışmada adı geçen yazarlar eşit katkı sağlamışlardır. Oğuz DOĞAN, dişli deney kümesinin belirlenmesi ve dişli geometrilerinin oluşturulması ile literatür araştırması, sonuçların yorumlanması, makale taslağının hazırlanması ve dergi iletişim süreçlerinde görev almıştır. Muhammed Safa KAMER, sonlu elemanlar modelinin hazırlanması ve doğrulanması, gerilme sonuçlarının elde edilmesi ve yorumlanması, literatür araştırması ve makale taslağının hazırlanması süreçlerinde görev almıştır.

KAYNAKLAR

1. Abu-Hamdeh, N.H. ve Alharthy, M. (2014). Application of finite element to spur gear stress reduction using stress relieving feature, *Applied Mechanics and Materials*, 575, 296–299. doi:10.4028/www.scientific.net/amm.575.296
2. Babalık, F.C. ve Çavdar, K (2018) Makine elemanları ve konstrüksiyon örnekleri, Dora, Bursa.
3. Cavdar, K., Karpat, F. ve Babalik, F. C. (2004). Computer aided analysis of bending strength of involute spur gears with asymmetric profile, *Journal of Mechanical Design*, 127(3), 477–484. doi:10.1115/1.1866158
4. Costopoulos, TN. ve Spitas V. (2009). Reduction of gear fillet stresses by using one-sided involute asymmetric teeth, *Mechanism and Machine Theory*, 44,(8), 1524-1534. doi:10.1016/j.mechmachtheory.2008.12.002.
5. DIN3990 (1987) – Calculation of load capacity of cylindrical gears: Calculation of tooth strength.
6. Chavan, U.J., Shitole, J.S. ve Kathale, S.S. Analysis and optimization of contact stresses in spur gear using finite element analysis, *International Journal of Engineering Research & Technology*, 13(3), 1-6. doi:10.17577/IJERTV13IS030212
7. Doğan, O., Yılmaz, T. G. ve Karpat, F. (2018). Farklı parametrelere sahip evolvent düz dişli çarkların sonlu elemanlar yöntemi ve grafik metot ile gerilme analizi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33, 1493–1504. doi:10.17341/gazimmfd.416445
8. Francesco, GD. ve Marini S. (2007) Asymmetric teeth: Bending stress calculation, *Gear Technology*, 24: 52-55.
9. Fredette, L. ve Brown, M. (1997). Gear stress reduction using internal stress relief features, *Journal of Mechanical Design*, 119(4), 518–521. doi:10.1115/1.2826398
10. ISO 6336 (2002) – Calculation of load capacity of spur and helical gears - Application for industrial gears.
11. Patil, S. S., Karuppanan, S., ve Atanasovska, I. (2016). Experimental measurement of strain and stress state at the contacting helical gear pairs. *Measurement*, 82, 313–322. doi:10.1016/j.measurement.2015.12.046
12. Pedersen NL. (2010). Improving bending stress in spur gears using asymmetric gears and shape optimization, *Mechanism and Machine Theory*, 45(11), 1707-1720. doi:10.1016/j.mechmachtheory.2010.06.004
13. Savran, E ve Karpat, F. (2024) Tooth root stress relief hole optimization on the spur and helical gears, *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 8, 343-352.
14. Senthil Kumar, M., Santhosh, M., Arvind, E., Ashwin, M. ve Prashant, S. (2017). Optimization of spur gear design to reduce stress, *Applied Mechanics and Materials*, 867, 220–227. doi:10.4028/www.scientific.net/amm.867.220
15. Spitas, V. ve Spitas, C. (2007) Optimizing involute gear design for maximum bending strength and equivalent pitting resistance. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 221, 479–488. doi:10.1243/0954406JMES342

16. Van Thoan, P., Wen, G., Yin, H., Ld, H. ve Sy Nguyen, V. (2015). Optimization design for spur gear with stress-relieving holes, *International Journal of Computational Methods*, 12(02), 1550006. doi:10.1142/s0219876215500061
17. Vigneshwaran, K., Shanmugam, D. Ve Balasuthagar, C. (2020). Experimental and analytical stress analysis of spur gear, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 912(2), 022043. doi:10.1088/1757-899x/912/2/022043
18. Zhou, W., Zhu, R., Li, Z., Liu, W., Wang, J., ve Mu, F. (2024). Theoretical and experimental research on tooth root bending stress of face gear. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 238(14), 7172–7188. doi:10.1177/09544062241228009