

Dişli Çarklar İçin Yenilikçi Malzeme Kullanımı

Furkan Korkmaz¹

Özet

Dişli çarklar mekanik performans, ağırlık ve özellikle aşınma direnci yönünden üzerinde çalışmaların devam ettiği güç ve hareket iletim mekanizmalarıdır. Tasarım yöntemlerinde optimizasyon çalışmaları, imalat olarak yüksek yüzey kalitesi ve yüzey aşınması değerini arttırmak için kaplama yöntemleri üzerine çalışmalar gerçekleştirilmeye devam edilmektedir. Fonksiyonel kademeli malzemeler (FGM) üzerine yapılan çalışmaların artması ve imalat yöntemlerinin bu malzeme türüne uygun üretiminin mümkün kılınması ile birlikte dişli çarklar özelinde de FGM kullanımı ile ilgili araştırmalar artış göstermektedir. Özellikle yüksek aşınma direnci ile yüksek tokluk değerlerini aynı anda sunabilmeleri sebebi ile çelik malzemelere göre tercih edilmektedir. Bu çalışmada, FGM dişli çarkların tasarımında kullanılan matematiksel yöntemlere ve imalat tekniklerine yer verilmiştir. İmalat yöntemlerinin dişli çarklar için avantajları ve uygulama zorlukları gibi dezavantajlarına değinilmiştir.

1. Giriş

Dişli çarklar, mekanik sistemlerde güç ve hareket iletiminde kritik bir rol oynayan temel elemanlardır. Geleneksel olarak çelik ve diğer metal alaşımlarından üretilen dişliler, yüksek dayanım ve aşınma direnci gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, malzeme teknolojisindeki ilerlemeler, kompozit malzemeler, polimerler ve seramikler gibi malzemelerin kullanımı ile yenilikçi çalışmaları mümkün kılmaktadır.

Dişli çarklardaki malzeme seçimi, mekanik sistemlerin genel verimliliğini ve uzun ömürlülüğünü doğrudan etkileyen en önemli faktörlerden birisidir. Yanlış malzeme seçimi, aşınma, deformasyon ve hatta sistem arızalarına yol açabilirken, uygun malzeme kullanımı dişlilerin ömrünü uzatmakta ve verimliliğini artırmaktadır. Malzeme seçimi yapılırken, dişli çarkın

1 Dr. Öğr. Üyesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, fkorkmaz@subu.edu.tr, 0000-0002-9125-8386

maruz kaldığı mekanik yükler, çalışma ortamı koşulları, ağırlığı, sıcaklık değişimleri ve kimyasal etkileşimler gibi çok sayıda faktör göz önünde bulundurulmalıdır. Örneğin, yüksek hızlı ve ağır yük altında çalışan dişliler için yüksek mukavemetli çelik alaşımları tercih edilirken, düşük sürtünme ve sessiz çalışma gerektiren sistemlerde polimer bazlı dişliler daha avantajlı olabilmektedir. Diğer bir yandan yağlama ve ağırlık durumuna göre de kısıtlar belirlenmektedir. Belirlenen kısıtlar ve istemlere bağlı olarak birçok optimizasyon tekniği dişli çarklar için denenmiş ve uygulanmıştır. Bu çalışmalar günümüzde dişli çark çalışmalarının önemli bir kısmını oluşturmaktadır.

Son yıllarda özellikle malzeme mühendisliği alanında kaydedilen ilerlemeler, dişli çark üretiminde kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin önemli ölçüde geliştirilmesine olanak tanımıştır. Isıl işlem teknikleri, yüzey kaplamaları ve nanoteknoloji destekli malzeme güçlendirme yöntemleri, dişlilerin aşınma direncini artırarak daha uzun ömürlü ve dayanıklı bileşenler elde edilmesini sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, sürdürülebilir mühendislik yaklaşımları doğrultusunda, geri dönüştürülebilir ve çevre dostu malzemelerin kullanımına yönelik çalışmalar da artış göstermektedir. Ancak bunların dışında en önemli geliştirme çalışmaları eklemeli imalat yönteminin üretim alanındaki birçok kısıtı da ortadan kaldırması ile birlikte fonksiyonel gradyanlı malzemelerin (FGM – Functionally Graded Materials) dişli çarklarda kullanımı söz konusu hale gelmektedir.

Kullanım alanlarına, çalışma koşullarına ve istenen performans kriterlerine göre farklı malzemelerden üretilirler. Yaygın olarak; çelik, dökme demir, plastik ve toz metajurisi (sinter) yöntemi ile üretilmiş dişliler tercih edilmektedir. Malzeme seçiminde aşağıdaki kriterler dikkate alınmaktadır;

- Mekanik Dayanım ve Yük Kapasitesi
- Aşınma Direnci
- Sürtünme Katsayısı ve Kayma Davranışı
- Isıl Direnç
- Korozyon Direnci
- Hafiflik ve Ağırlık Tasarrufu
- Titreşim ve Gürültü Düzeyi
- İşlenebilirlik ve Üretim Kolaylığı
- Ekonomik Maliyet
- Bakım ve Servis Kolaylığı

2. FONKSİYONEL KADEMELİ MALZEMELER

FGM, tek bir bileşen içerisinde özel olarak uyarlanmış özellikler elde etmek amacıyla konumsal olarak değişen bileşimlere ve mikro yapıya sahip gelişmiş malzemelerdir. Başlangıçta 1980'lerde Japonya'da uzay mekiklerinin maruz kaldığı aşırı sıcaklık değişimlerine (1000°C 'ye kadar) dayanabilen malzemeler geliştirme ihtiyacından doğmuştur. Daha sonra uzay, otomotiv ve enerji gibi endüstrilerde karmaşık yüklemelere ve aşırı çevresel koşullara dayanması gereken bileşenler için dönüştürücü çözümler haline gelmiştir. Bu malzemelerin benzersiz özellikleri, geleneksel kompozitlerde görülen ani malzeme özelliği geçişlerinden kaynaklanan arayüzey gerilmeleri sorununu ortadan kaldırmıştır.

2.1. FGM'lerin Temel Faydaları

FGM'ler, geleneksel malzemelere kıyasla çeşitli önemli avantajlar sunar:

- **Geliştirilmiş Mekanik ve Termal Özellikler:** Fonksiyonel gradyanlı malzemeler, bileşim ve mikro yapının uzamsal olarak kademeli değişimi sayesinde yüksek mukavemet, tokluk, aşınma direnci ve termal kararlılığı tek bir yapıda bütünleştirebilir. Bu gradyanlı yapı, farklı fazlar arasında ani malzeme geçişlerini ortadan kaldırarak hem mekanik dayanıklılığı hem de sıcaklık dayanımını artırır. Örneğin, türbin kanatlarında kullanılan FGM yapılar, yüksek sıcaklıkta oksidasyona karşı direnç sağlarken, aynı zamanda mekanik yük altında deformasyon direncini koruyabilir (Kawasaki ve Watanabe, 2002; Takagi vd., 2007).
- **Delaminasyon Arızasının Azaltılması:** Geleneksel kompozit veya metalik laminat malzemelerde, ara yüzeylerde meydana gelen gerilme yığılmaları patlama, darbe veya balistik yükler altında delaminasyon arızalarına neden olabilir. FGM yapılar, malzeme özelliklerinin konum boyunca sürekli değişmesini sağlayarak bu tür arayüzey gerilmelerini ortadan kaldırır. Böylece, gerilme geçişleri yumuşatılmış, delaminasyon eğilimi önemli ölçüde azaltılmış olur.
- **Yapısal Bütünlük ve Güvenilirliğin Artması:** Optimize edilmiş malzeme bileşimi ve kademeli mikro yapısı sayesinde FGM'ler, daha homojen gerilme dağılımı, gelişmiş aşınma ve korozyon direnci, yüksek çatlak ilerleme direnci ve daha iyi yorulma performansı sergiler. Bu özellikler, geleneksel ve kompozit malzemelere kıyasla daha uzun servis ömrü, düşük bakım maliyeti ve yüksek yapısal güvenilirlik sağlar.

- Uygulama Alanlarına Uyum Yeteneği: Doğal malzemelerde gözlenen fonksiyonel gradyan prensiplerinden (örneğin kemik, diş, bambu yapıları) esinlenen FGM'ler, yüksek sıcaklık, yüksek basınç veya korozyon ortamları gibi özel koşullara uyarlanabilir. Bu yönüyle, termal bariyer kaplamalar, motor bileşenleri, roket nozulları ve dişli sistemleri gibi mühendislik uygulamalarında önemli avantajlar sunar.

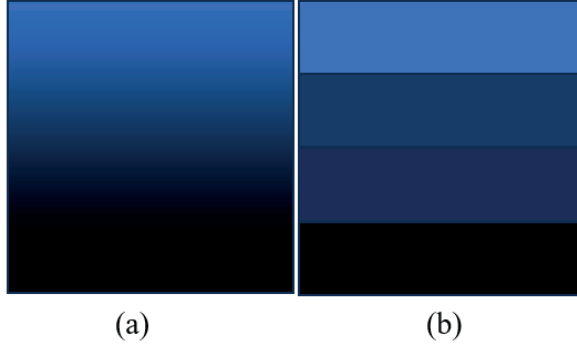
2.2. FGM'lerin Sınıflandırmaları

FGM'ler, bileşim, özellik gradyanı, üretim süreci ve uygulama dahil olmak üzere çeşitli faktörlere göre sınıflandırılabilir. Birçok FGM birden fazla kategoriye sığabilir ve sınıflandırma kriterleri araştırmacının koşullarına veya hedeflerine göre değişebilir. Aşağıda, kaynaklarda bahsedilen başlıca sınıflandırma kriterleri ve türleri detaylandırılmıştır:

Bileşim Bazlı Sınıflandırmalar: FGM'ler, içerdikleri bileşenlerin türüne göre sınıflandırılabilir. Paslanmaz çelik ile inconel 625 kombinasyonları gibi Metal – metal, özellikle dişli çarklar için yaygın kullanıma sahip olan çelik ile SiC kombinasyonlu metal – seramik ve polimer – seramik gibi bileşimler ile FGM dişli imalatı söz konusudur.

Gradyan Türüne Bağlı Sınıflandırmalar: Malzeme özelliklerinin değişim şekline göre FGM'ler iki ana kategoriye ayrılır:

- **Sürekli Gradyanlı Yapılar:** Bileşimin veya mikro yapının konumla sürekli olarak değiştiği FGM'lerdir (Şekil 1(a)). Bu tür yapılar genellikle santrifüj döküm gibi yöntemlerle üretilir. Sürekli FGM'ler, geleneksel malzemelere göre yüksek sertlik, aşınma direnci ve çekme mukavemeti gibi iyileştirilmiş özelliklere sahip olup biyomedikal, havacılık ve otomotiv uygulamaları için idealdir.
- **Kademeli Gradyanlı Yapılar:** Gradyan değişiminin belirli adımlarla gerçekleştiği FGM'lerdir (Şekil 1(b)). Bu tür yapılar, toz metalurjisi gibi yöntemlerle üretilir ve ayrı katmanlar arasında arayüzler bulunur.



Şekil 1. (a) Sürekli gradyanlı FGM, (b) Kademeli FGM

Üretim Süreci Bazlı Sınıflandırmalar: FGM'ler, üretim yöntemlerine göre de çeşitli gruplara ayrılır. Üretim süreci, FGM'lerin nihai özelliklerini ve uygulama alanlarını doğrudan etkiler.

- Katmanlı İmalat
- Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme
- Seçici Lazer Ergitme
- Tel ve Ark Katmanlı Üretim
- Erimiş Yığılma Modelleme
- Döküm FGM'ler
- Toz Metalurjisi
- Buhar Biriktirme Yöntemleri
- Elektrolitik Biriktirme Yöntemleri
- Sürtünme Karıştırma Yöntemleri

Uygulama Bazlı Sınıflandırmalar: FGM'ler, kullanıldığı sektöre veya özel fonksiyonlarına göre sınıflandırılabilir.

- Biyomedikal Uygulamalar: Yapay kemikler, diş implantları ve protez cihazları gibi biyo-uyumluluk ve mekanik özelliklerin kritik olduğu alanlarda.
- Havacılık ve Uzay Uygulamaları: Yüksek sıcaklıklara ve karmaşık yüklemelere dayanıklı hafif ve sağlam bileşenler.

- Otomotiv Endüstrisi: Yakıt verimli, dayanıklı parçalar ve darbe dayanımı yüksek yapılar için. Özellikle dişliler gibi güç aktarım elemanlarında.
- Savunma Uygulamaları: Balistik darbe direncini artıran zırh plakaları.
- Termal Bariyer Kaplamaları: Yüksek sıcaklık gradyanlarına dayanmak için.
- Dişliler: Dişli çarkların diş kökü mukavemetini ve ömrünü artırmak, temas yüzeyindeki gerilme konsantrasyonunu azaltmak, aşınma direncini ve termal yüklenme yeteneğini artırmak için FGM kullanımı önerilmektedir.

FGM kavramı, saf metallerden alaşımlara ve ardından hafif kompozit malzemelere geçişin ardından, yapıların işlevselliğini artırmak için kullanılmasıyla malzemelerin evriminde önemli bir adımı temsil eder.

FGM'ler geniş bir yelpazede değerlendirme, özel uygulamalar için yeni malzeme bileşimleri araştırma ve üretim yöntemleri ile ilişkilendirme imkanını sunar. Her FGM türünün kendine özgü özellikleri ve sınırlamaları vardır. İstenen performansa ve mukavemete bağlı olarak uygun bir FGM seçilir. Örneğin, dişlilerde metal/seramik FGM'ler, dişin iç yüzeyinde metalin mukavemetini, dış yüzeyinde ise seramiğin aşınma ve ısı direncini sağlamak için idealdir. Ancak, FGM üretiminde yüksek maliyetler ve üretim karmaşıklığı gibi zorluklar devam etmektedir. Büyük bileşenlerde tutarlı bir malzeme gradyanı sağlamak zor olabilir ve bu da üretim maliyetini artırır. Buna rağmen, FGM'lerin sürekli gelişimi, teknolojik ilerlemelerle birlikte yeni bileşimlerin, optimize edilmiş üretim süreçlerinin ve yapay zeka/makine öğrenimi gibi yaklaşımların entegrasyonu ile gelecekteki uygulamalar için umut vaat etmektedir.

Sonuç olarak, FGM'lerin çeşitli sınıflandırmaları, bu malzemelerin çok yönlülüğünü ve geniş uygulama potansiyelini vurgular. Malzeme bilimindeki sürekli araştırmalar, FGM'lerin tasarımını, üretimini ve performansını daha da geliştirmeye devam etmektedir.

3. DIŞLI ÇARK UYGULAMALARI

Dişli çarklarda arayüzey gerilmelerini azaltmak ve temas yüzeylerindeki olası süreksizliklerin önüne geçmek için FGM kullanımı önemli bir çözüm olarak sunulmaktadır. Metal bazlı malzemelerin yüksek mukavemet ve tokluk sağlaması, seramik bazlı yüzey kısmının ise yüksek sıcaklık ve aşınma direnci sağlanması nedeniyle metal/seramik kombinasyon FGM'ler dişli çarklarda sıklıkla tercih edilmektedir. Dişli çarkların FGM yöntemi ile üretilmesi ile mikro

yapısında ve mekanik özelliklerinde iyileştirmeler yapılması sağlanmaktadır. FGM dişliler ile ilgili yapılan çalışmalardan bazılarına şu şekilde örnekler verilebilir;

- **İyileştirilmiş İletim Verimliliği:** Cam elyafı dolgulu HDPE FGM dişlilerin, homojen ve dolgunsuz HDPE dişlilere göre daha yüksek iletim verimliliğine sahip olduğu deneysel olarak gösterilmiştir. Özellikle 600 dev/dak ve 2 Nm torkta FGM dişliler, homojen dişlilere göre %7, dolgunsuz dişlilere göre %18 daha yüksek verimlilik sunmuştur (Kumar Singha vd., 2019).
- **Geliştirilmiş Mekanik Davranış:** FGM olarak üretilmiş olan dişlilerde eğilme ve kalıcı şekil değişimi metal bazlı malzemelere nazaran azalır ve mekanik davranışı iyileşir. FGM dişlilerdeki Young modülü, poisson oranı ve yoğunluk gibi özellikler malzeme hacim oranlarına bağlı olarak değişerek ihtiyaca bağlı değişiklik sağlanabilir (Al-Qrimli vd., 2015).
- **Çatlak Direnci ve Yorulma Ömrü:** FGM plakalar üzerinde yapılan çalışmada FGM plakaların kırılma davranışları ve çatlak ilerlemelerinin malzeme dağılımlarının kontrolü ile iyileştirilebilir olduğu gözlemlenmiştir (Kaya vd., 2023). Üstel fonksiyondan faydalanarak FGM yapıya sahip dişlilerde mekanik davranışı iyileştirilebilir, çatlak oluşumu ve ilerlemesi geciktirilebilir olduğu belirlenmiştir. Böylece malzemelerin kullanım ömürleri artırılabilir (Asl vd., 2024).

3.1. Dişlilerin Uygulamaları ve Malzemeleri

Dişli teknolojisi, performans artırmak, dayanıklılık, hafiflik, gürültünün azaltılması ve titreşim gibi durumlara karşı talepleri karşılamak için gelişmektedir.

- **Performans İyileştirmeleri:** Dişlilerin arıza sebepleri; diş dibi kesilmesi, temas gerilmelerinden kaynaklanan yüzey yorulması (pitting) ve yüksek kaymadan kaynaklı kaynama aşınmasıdır. FGM'ler bu durumlara karşı direnci arttırmak imkanı sunar. Örneğin, FGM kullanımıyla diş temas yüzeyindeki gerilme yoğunluğu azaltılabilir ve dişli ömrü uzatılabilir.
- **Hafifletme ve Alan Kısıtlamaları:** Havacılık ve otomotiv gibi sektörlerde, ağırlık azaltma ve kompakt tasarım büyük önem taşır. Hibrid dişliler (çelik/karbon takviyeli kompozit plastik (CFRP) gibi) ve FGM'ler, bu ihtiyaçları karşılamak için geliştirilmiştir. Planet dişliler

de yüksek güç yoğunluğu ve kompakt yapıları nedeniyle bu alanlarda tercih edilir (Jing, 2015).

- **Gürültü ve Titreşim Azaltma:** Dişlilerde gürültü ve titreşim, yorulma ömrünü azaltırken çalışma ortamını da yüksek oranda etkiler. Helisel dişliler, düz dişlilere göre daha sessiz çalışır. CFRP gibi malzemelerin sönümleme özellikleri ve optimize edilmiş profilleri, bu sorunları azaltmada etkili olmuştur. İmalat ve montaj hataları da dinamik özellikleri ve gürültüyü önemli ölçüde etkiler, bu nedenle hassas ölçüm ve analiz yöntemleri hayati öneme sahiptir. FGM'ler ile birlikte taleplerin karşılanması kolaylaşmaktadır.
- **Tasarım ve Analiz Araçları:** Günümüzde sonlu elemanlar yöntemi (FEM), peridinamik teori ve çoklu serbestlik dereceli dinamik modeller gibi gelişmiş hesaplama araçları, dişlilerin gerilme dağılımı, dinamik davranışı ve çatlak ilerlemesi gibi karmaşık sorunlarını analiz etmek için kullanılır. Bu araçlar, dişlilerin imalat toleranslarının ve çalışma koşullarındaki değişkenlerin performans üzerindeki etkilerini değerlendirmeye olanak tanır.
- **İmalat Teknolojileri:** Geleneksel frezeleme ve azdırma yöntemlerinin yanı sıra, enjeksiyon kalıplama (özellikle polimer ve FGM dişliler için) ve eklemeli imalat (3D baskı) gibi modern teknikler, karmaşık geometri ve özel malzeme özelliklerine sahip dişlilerin üretilmesine imkan sağlamıştır.

Sonuç olarak, malzeme bilimindeki ilerlemeler, özellikle FGM ve kompozitler, geleneksel dişlilerin sınırlamalarını aşarak, daha yüksek performanslı, dayanıklı ve özel uygulamalara yönelik çözümler sunmaktadır. Bu yenilikler, dişli tasarımını ve uygulamasını sürekli olarak dönüştürmekte, daha verimli ve güvenilir güç aktarım sistemlerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

3.2. Dişli Çarklarda FGM Tanımlaması

Dişli çarkların FGM tanımlamalarında farklı yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemlerin tercihinde matematiksel tanımlamalar dikkate alınmaktadır. Bu yöntemler Tablo 1'de verilmiştir (Aravind vd., 2021).

Tablo 1. FGM tanımlama yöntemleri

Yöntem	Young Modülü (N/mm ²)
Üstel	$E(r) = E_2 e^{\alpha r}$
Lineer	$E(r) = E_2 (\alpha r)$
Güç	$E(r) = E_2 r^2$
Eliptik	$E^2(r) + E_2 r_2^2 = \alpha$

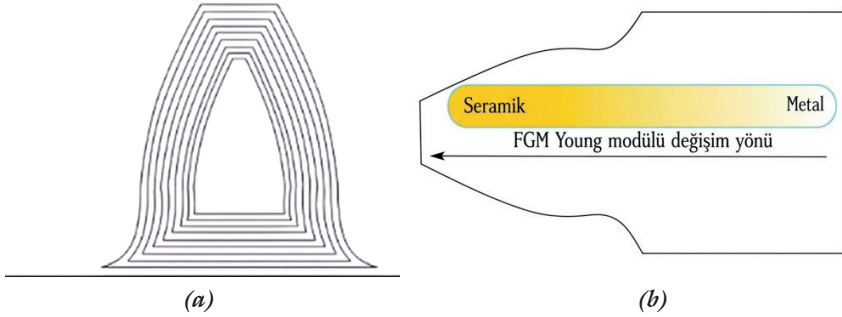
$E(r)$: Malzemenin herhangi bir bölgesindeki Young modülü

E_2 : Referans bölge Young modülü

α : Kademe (Derece) katsayısı

r : Konum yarıçapı

Aşağıdaki şekilde farklı formlarda uygulanan tanımlamalar verilmiştir. Şekil 2’de belirtilen FGM dişli çark tanımlamaları üstel fonksiyon ile yapılan tanımlama örnekleridir. Şekil 2(a)’da verilen tanımlama dişin merkezinden yüzeye doğru FGM tanımlaması içerirken Şekil 2(b)’de dişli çarkın merkezinden yüzey doğrultusunda bir FGM tanımlaması bulunmaktadır (Asl vd., 2024).



Şekil 2. Form tanımlama örnekleri

3.3. Üretim Yöntemleri

FGM’lerin üretim yöntemleri, malzeme bilimindeki ilerlemeleri yansıtan geniş bir teknoloji yelpazesine sahiptir ve her biri farklı avantajlar ve sınırlılıklar sunmaktadır. Bu yöntemler, geleneksel malzemelerde veya homojen kompozitlerde mümkün olmayan özellik kombinasyonlarını tek bir bileşende birleştirmeyi hedefler. Dişliler gibi uygulamalarda, yüzeyde aşınma

ve ısı direnci için seramik, iç kısımda ise mukavemet için metal dağılımı enjeksiyon kalıplama veya toz metalurjisi ile elde edilebilir. Biyomedikal implantlarda biyo-uyumluluğu ve mekanik özellikleri iyileştirmek için SLM veya toz metalurjisi yöntemleri kullanılarak Ti/HA gibi FGM'ler üretilir.

FGM üretim yöntemleri avantaj sağlamaları ile birlikte bir dizi zorlukla karşı karşıyadır. Yüksek üretim maliyetleri, süreç karmaşıklığı ve büyük bileşenlerde tutarlı gradyan elde etme zorluğu önemli engellerdir. Malzeme dağılımındaki kusurlar ve artık gerilmeler, parçanın performansını olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, proses parametrelerinin optimizasyonu, tahmin edici modellerin geliştirilmesi ve artık gerilme analizleri büyük önem taşır. Gelecekte, yapay zeka ve makine öğrenimi gibi yaklaşımların entegrasyonu, FGM üretimini daha verimli ve hassas hale getirebilir. Ayrıca, Peridinamik (PD) teorisi gibi ileri hesaplama araçları, FGM plakaların çatlak oluşumu ve ilerlemesi gibi karmaşık kırılma davranışlarını daha doğru bir şekilde analiz etmeye olanak tanır, bu da yeni FGM tasarımlarının optimize edilmesine yardımcı olur. Bu gelişmeler, FGM'lerin potansiyelini tam olarak gerçekleştirmesi ve daha geniş endüstriyel uygulamalara yayılması için kritik öneme sahiptir.

Fonksiyonel Kademelendirilmiş Malzemelerin (FGM) dişli çarkların imalatında kullanılan veya kullanılabilecek yöntemler, malzemenin türüne (metal, seramik, polimer) ve istenen gradyan yapısına (sürekli veya adım adım) bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir. Kaynaklarınız, özellikle Eklemeli İmalat, Santrifüj Döküm ve Toz Metalurjisi yöntemlerinin bu alanda aktif olarak kullanıldığını veya araştırıldığını göstermektedir.

3.3.1. Eklemeli İmalat

Eklemeli imalat, katmanlı olarak malzemelerin biriktirilmesi ile geometrilerin oluşturulmasını sağlar. Bu sayede şekillendirme ile eş zamanlı olarak FGM için ideal olan malzeme dağılımı da sağlanabilir. Bu nedenle eklemeli imalatın gelişimi ile FGM ürünlerin üretimi paralel olarak ilerleme katetmektedir (Patel, 2025). Silindirik bir yüzeye sahip olmamaları nedeni ile de dişli çarklar gradyan kontrolü ile eklemeli imalat ile oldukça verimli bir şekilde üretilebilir. Ancak tüm eklemeli imalat yöntemleri FGM dişli çark üretimi için uygun değildir. FGM dişli çark için önerilen eklemeli imalat yöntemleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir (Shikai vd., 2015; Chen vd., 2020);

- Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme: WAAM (Tel ve Ark Katmanlı İmalat) gibi ark tabanlı DED yöntemleri, FGM üretimi için uygun ve özellikle metalik FGM parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılır. DED sürecinde, artık gerilmelerin anlaşılması ve kontrolü, ayrıca

erime havuzu sıcaklığının tahmin edilmesi için makine öğrenimi gibi yöntemler geliştirilmektedir. Proses parametrelerinin, özellikle lazer gücü ve tarama hızının, malzeme bileşimi değişikçe ayarlanması ve aynı biriktirme yüksekliğini sağlamak için optimize edilmesi önemlidir (Khan vd., 2024).

- **Toz Yataklı Füzyon:** Seçici Lazer Ergitme (SLM/LPBF) ve Seçici Lazer Sinterleme (SLS) gibi toz yatağı füzyon yöntemleri, yüksek hassasiyetli ince mikro yapılar elde etmeye olanak tanır. Dişlilerin ve havacılık motoru aktarma dişlilerinin (SLS/DMLS ile) üretimi bu yöntemlerle gerçekleştirilmiştir (Madan ve Bhowmick, 2023).
- **Füzyon ile Biriktirme Modeli:** Bu yöntem, polimer esaslı FGM dişliler üretmek için sıklıkla araştırılmıştır. ABS, PLA ve naylon gibi malzemelerden üretilen dişliler, bu teknikle (MEX/FDM) üretilmiş ve test edilmiştir.

3.3.2. Toz Metalurjisi

Toz metalurjisi, metal/seramik bazlı FGM'lerin imalatı için yaygın ve sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Hem ayrık gradyanlı hem de sürekli gradyanlı FGM'ler üretme esnekliği sunar. Al-Çelik, Cu/SiC, Al/SiC, Ni/Ti₃AlC₂ gibi çeşitli FGM sistemleri toz metalurjisi ile üretilmiştir. Sıcak presleme ve sıcak basınç destekli sinterleme gibi varyantlar, tokluk ve mikro sertliği iyileştirmek için de kullanılmıştır (Kumar ve Kumari, 2022).

Bu yöntem, dişli çarkla için oldukça önemli olan aşınma direnci ve çekme mukavemeti gibi özelliklere sahip sürekli FGM'ler üretmek için uygundur. Özellikle aksel olarak derecelendirilmiş numuneler için, daha az kompakt kalınlık nedeniyle daha kolay üretim sağladığı belirtilmiştir. Ancak proses parametrelerini ayarlamak ve kalıp tasarımı yönünden zorluklara sahiptir.

3.3.3. Santrifüj Döküm

Santrifüj döküm, farklı yoğunluktaki fazların merkezkaç kuvvetiyle ayrıştırılması esasına dayanır ve özellikle metal/seramik FGM üretiminde tercih edilir. Bu yöntem FGM dişli üretimi için kanıtlanmış bir yöntem olarak uygulanmaktadır. Yöntem, yüzeyde yüksek aşınma direnci, iç kısımlarda ise tokluk sağlayarak dişliler gibi parçalar için ideal çözümler sunarken tüm kesitte sürekli gradyan oluşturmak her zaman mümkün olmayabilir (Radhika ve Raghu, 2016; Abdelfattah vd., 2023).

Santrifüj döküm, yoğunluk farklılıklarını kullanarak ergimiş metalin veya takviye partiküllerinin radyal yönde kademeli bir dağılım oluşturmasını sağlar.

Bu nedenle simetrik bir parça olan dişli çarklar için uygun bir yöntemdir. Alüminyum alaşımı olan Al_2O_{24} matrisi ve Al_2O_3 takviye partikülleri içeren FGM düz dişliler, Dikey Santrifüj Döküm (VCC) yöntemi kullanılarak başarılı bir şekilde üretilmiştir. Ayrıca enjeksiyon kalıplama tekniği ile birleştirilerek FGM polimer dişlilerin (örneğin cam elyaf takviyeli HDPE ve PBT) üretiminde de kullanılmıştır. Bu üretimde, gradyanı oluşturmak için enjeksiyon kalıbının içindeki punch döndürülür (Pradeep ve Rameshkumar, 2021).

3.3.4. Enjeksiyon Kalıplama

Polimer bazlı dişliler güç aktarım sistemlerinde gürültü ve yağlama ihtiyacının az olması sebebi ile yoğun şekilde tercih edilmektedir. Enjeksiyon kalıplama yöntemi polimer bazlı FGM dişlilerin üretiminde kullanılmaktadır. Polimer Cam elyafı dolgulu yüksek yoğunluklu polietilen katkı FGM dişliler enjeksiyon kalıplama ile başarıyla üretilmiştir. Elde edilen ürünler üzerinde yapılan testler ürünün diş uçlarında lif yönelimi sayesinde gürültü miktarının azaltılması ve yük altındaki çalışmaları yönünden performanslarını iyileştirilmiştir (Singh, 2019).

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Dişli çarklarda FGM kullanımının mekanik performansa etkileri, tasarım avantajları ve üretim potansiyeli incelenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen bulgular, FGM'lerin geleneksel plastik ya da çelik malzemelere göre önemli mühendislik üstünlükleri sunduğunu ortaya koymuştur.

FGM dişlilerde, elastisite modülünün konuma bağlı olarak lineer, üstel ya da logaritmik biçimde değiştiği yapı sayesinde diş yüzeyinde yüksek sertlik ve aşınma direnci, dişli merkezinde ise yüksek tokluk elde edilmiştir. Bu özellik, gerilme yığılmalarını azaltarak yorulma ömrünü uzatmakta ve deformasyon miktarını düşürmektedir. Sonlu elemanlar analizi ile yapılan sayısal incelemeler, malzeme gradyanının gerilme ve deformasyon dağılımına etkisini doğrulamış, FGM dişlilerin klasik metal bazlı dişlilere göre daha homojen gerilme dağılımı ve daha düşük maksimum gerilme değerleri sunduğunu göstermiştir.

Üretim yöntemleri açısından değerlendirildiğinde, eklemeli imalat, toz metalurjisi ve döküm teknikleri, FGM yapılar için en uygun alternatifler olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntemler, mikro yapısal gradyanların genellikle kontrollü biçimde oluşturulmasına olanak tanırken, istenen mekanik özelliklerin belirli bölgelerde optimize edilmesini mümkün kılmaktadır.

Gelecekte yapılacak çalışmalar için aşağıdaki öneriler sunulabilir:

1. Yapay zeka ve makine öğrenmesi tabanlı optimizasyon algoritmaları, FGM dişlilerde gradyan katsayısının belirlenmesinde kullanılabilir.
2. Sonlu elemanlar analizleri ve deneysel doğrulama çalışmalarının birlikte yürütülmesi, sayısal modellerin güvenilirliğini artıracaktır.
3. Sürdürülebilir malzeme seçimi ve geri dönüştürülebilir FGM sistemlerinin geliştirilmesi, çevresel etkiyi azaltacaktır.
4. Termal ve dinamik yük etkilerinin FGM dişliler üzerindeki davranışı, çok ölçekli analizlerle daha kapsamlı şekilde incelenmelidir.
5. Endüstriyel uygulama ölçeğinde üretim testleri, laboratuvar düzeyindeki olumlu sonuçların gerçek çalışma koşullarına uyarlanabilirliğini gösterecektir.

Sonuç olarak, FGM dişliler; hafiflik, dayanıklılık, termal kararlılık ve enerji verimliliği gibi üstün özellikleriyle makine mühendisliğinde yeni bir dönemi temsil etmektedir. Özellikle eklemeli imalatta gerçekleşen gelişmeler ve erişilebilirliğinin artması ile bu dönem imalat sanayisindeki yerini hızla almaya başlamıştır. Bu yaklaşım, malzeme ve tasarım arasındaki sınırları ortadan kaldırarak mikro ölçekte kontrol edilen malzeme yapısının makro ölçekte yüksek performansa dönüştürülebileceğini göstermektedir.

Referanslar

- Abdelfattah, S., Ghattas, M., & Tawakol, A. (2023). Mechanical and Tribological Properties of Al2024/ Al2O3 Functionally Graded Spur Gears Synthesized by Centrifugal Casting Process. *Mansoura Engineering Journal*, 48(3), 1-9.
- Al-Qrimli, H., Oshkour, A., Ismail, F., & Mahdi, F. (2015). Material design consideration for gear component using functional graded materials. *Int. J. Materials Engineering Innovation*, 6(4).
- Aravind, V., Adharsh, S., Prakash, D., & Martin Vino, S. (2021). Contact Stress Analysis on a Functionally Graded Spur Gear Using Finite Element Analysis. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 309-318.
- Armology*. (2025, Ağustos 07). <https://armology.com/metal-failure-modes/fretting-wear/> adresinden alındı
- Asl, M., Akbar, A., & Danishmend, S. (2024). Creep Analysis in Two Functionally Graded Rotating Gears. *Journal of Engineering Manufacture*, 2(16), 83-92.
- Chen, B., Tan, C., Song, X., & Feng, J. (2020). Influence of composition gradient variation on the microstructure and mechanical properties of 316L/ Inconel718 functionally graded material fabricated by laser additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 283.
- Gupta, K., Jain, N., & Laubscher, R. (2017). *Advanced Gear Manufacturing and Finishing*. Academic Press. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804460-5.00004-3>
- Jing, S. Z. (2015). Optimum weight design of functionally graded material gears. *Chin. J. Mech. Eng.*, 28, 1186–1193.
- Kawasaki, A., & Watanabe, R. (2002). Thermal fracture behavior of metal/ceramic functionally graded materials. *Engineering Fracture Mechanics*, 69(14-16), 1713-1728.
- Kaya, K., Olmuş, İ., & Dördüncü, M. (2023). Investigation of fracture behaviour of one-dimensional functionally graded plates by using peridynamic theory. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38, 319-329.
- Khan, A. U., Sadhya, S., Bharath Kumar, A., & Chatterjee, S. (2024). Investigation on dual wire TIG Arc additive manufacturing of IN625 and SS316L FGM for continuous gradient and sandwich structures. *Thin-Walled Structures*, 200.
- Kumar Singha, A., Siddharthab, Yadav, S., & Kumar Singha, P. (2019). Transmission Efficiency of Functionally Graded Material Based HDPE Spur Gears. *Materials Today: Proceedings*, 18, 4893–4900.

- Kumar, V., & Kumari, P. (2022). Fabrication and Characterization of Cu/Si-C-Based Axially Functionally Graded Beam. *Adv. Eng. Mater.* 2022, 24, 2101239, 24, 1-9.
- Madan, R., & Bhowmick, S. (2023). Fabrication and microstructural characterization of Al-SiC based functionally graded disk. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal*, 95(2).
- Patel, M. (2025). A comprehensive review of functionally graded materials and their ballistic impact performance: Current status and future challenges. *Next Materials*, 8.
- Shikai, J., Zhang, H., Jingtao, Z., & Guohua, S. (2015). Optimum Weight Design of Functionally Graded Material Gears. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 28(6), 1186-1193.
- Singh, A. (2019). Development and investigation on transmission efficiency of functionally graded material-based polybutylene terephthalate spur gears. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 234(4), 473-489.
- Takagi, K., Kawasaki, A., Itoh, Y., Harada, Y., & Ono, F. (2007). Testing Method for Heat Resistance Under Temperature Gradient. *Journal of Thermal Spray Technology*, 16(5-6), 974-977.