

İLERİ MALZEME VE ÜRETİM TEKNİKLERİNE YÖNELİK GÜNCEL ÇALIŞMALAR

Editör
HASAN KÖTEN



BİDGE Yayınları

**İLERİ MALZEME VE ÜRETİM TEKNİKLERİNE
YÖNELİK GÜNCEL ÇALIŞMALAR**

Editör: HASAN KOTEN

ISBN: 978-625-372-762-8

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2025-06-25

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltpe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



ÖNSÖZ

Mühendislik çalışmalarında sınır noktalarını belirlemek için mühendislik ve tabii bilimler gibi disiplinlere giderek daha fazla önem verilmektedir. Optimizasyon çalışmalarında kullanılan parametreler, en verimli noktaları belirlemek için sınır değerler kullanılmaktadır. Bu sınır değerlerinin uygulanması, üretim yöntemleri, ileri malzeme teknikleri gibi temel unsurlara dayanır. Bu kitabımızda, özel üretim ve malzeme tekniklerinin yanı sıra teorik, sayısal, deneysel ve optimizasyon da dahil olmak üzere bu alandaki en son çalışmalara odaklanılmıştır. Bu mühendislik tekniklerinin hem araştırmacılar hem de pratik uygulamalara dahil olan teknik personel için değerli bir referans olacağına inanıyoruz. Bu kitaptaki bölümlerin yazarlarına teşekkürlerimizi sunarız ve kitabımızın hem endüstrimiz hem de araştırma merkezlerimiz için faydalı olmasını umarız.

Editör

Assoc. Prof. Dr. HASAN KÖTEN

İSTANBUL MEDENİYET ÜNİVERSİTESİ

İÇİNDEKİLER

YÜKSEK PERFORMANSLI MALZEMELERİN ÜRETİMİNDE REAKTİF SIVI FAZ SİNTERLEMENİN ROLÜ	1
<i>ERTUĞRUL ÇELİK, BÜŞRA TUNÇ</i>	
SÜRTÜNME KAYNAĞI TEKNİKLERİNDE SON GELİŞMELER VE ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARI	18
<i>ERTUĞRUL ÇELİK, BÜŞRA TUNÇ</i>	
KALSİYUM FOSFAT VE BİYOAKTİF CAM TABANLI DENTAL GREFTLER	33
<i>BÜŞRA GÜNHAN</i>	

BÖLÜM 1

YÜKSEK PERFORMANSLI MALZEMELERİN ÜRETİMİNDE REAKTİF SIVI FAZ SİNERLEMENİN ROLÜ

Ertuğrul ÇELİK¹
Büşra TUNÇ²

Giriş

Toz metalurjisi, modern mühendislik malzemelerinin geliştirilmesinde kullanılan ileri üretim teknolojilerinden biri olup, mikro yapı ve bileşim üzerinde yüksek düzeyde kontrol sağlayarak performans odaklı çözümler sunar. Bu yöntem; otomotiv, havacılık, biyomedikal, savunma ve enerji gibi birçok yüksek teknoloji alanında kritik bileşenlerin üretiminde yaygın olarak tercih edilmektedir. Tozların şekillendirilmesi ve sonrasında uygulanan sinterleme işlemi, bu yöntemin temel aşamalarını oluşturur (Thümmel ve Oberacker, 1993). Özellikle sinterleme evresi, toz partikülleri arasındaki bağların gelişimi, yoğunluk artışı,

¹ Doç. Dr. Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tunceli, Türkiye, 0000-0001-7104-8288

² Öğr. Gör., Artvin Çoruh Üniversitesi, Borçka Acarlar Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Artvin, Türkiye, 0000-0002-0090-5227

gözeneklilik azalımı ve nihai mikro yapının oluşumu açısından belirleyici rol oynar. Geleneksel sinterleme yöntemlerinde ısı enerjisi yardımıyla atomik difüzyon sağlanarak parçacıklar arasında katı-katı bağlar kurulur. Ancak bu yöntem, yüksek sıcaklıklar ve uzun sinterleme süreleri gerektirebilir (Upadhyaya, 2002). Bu nedenle, daha verimli ve düşük sıcaklıkta daha iyi yoğunluk sağlayabilecek sinterleme tekniklerinin geliştirilmesi yönünde önemli araştırmalar yapılmıştır (Tosun vd., 2018). Bu doğrultuda ortaya çıkan sıvı faz sinterleme (LPS - Liquid Phase Sintering) yöntemi, sinterleme sıcaklığında mevcut olan bir sıvı fazın parçacıklar arasında ıslanma, çözünme ve çökeltme mekanizmaları yoluyla yoğunluğu artırması esasına dayanır (Lou vd., 2016). Sıvı faz, genellikle sisteme önceden eklenen düşük ergime sıcaklığına sahip bir faz ile sağlanır ve bu faz, sinterleme sırasında katı fazla etkileşime girerek mikro yapının yeniden düzenlenmesine katkıda bulunur. Ancak, sıvı fazın sistemde önceden bulunması bazı sınırlamaları da beraberinde getirir. Faz bileşimi, sıvının yayılması, reaktif kontrolü gibi faktörler, elde edilecek mikro yapının homojenliğini ve mekanik özelliklerini doğrudan etkileyebilir. Bu nedenle, özellikle karmaşık mikro yapılar ve yüksek sıcaklık uygulamaları için yeterli kontrolün sağlanamadığı durumlarda, daha gelişmiş tekniklere ihtiyaç duyulmuştur. Bu bağlamda, Reaktif Sıvı Faz Sinterleme (Reactive Liquid Phase Sintering - RLPS) yöntemi, geleneksel LPS yöntemine kıyasla çok daha esnek ve kontrollü bir yaklaşım sunarak literatürde öne çıkmıştır (Frage vd., 2010).

RLPS yöntemi, sıvı fazın sinterleme sırasında *in-situ* olarak, yani sistemde mevcut olan katı bileşenler arasında gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşması prensibine dayanır. Bu yöntem, sıvı fazın yalnızca termal aktivasyonla değil, aynı zamanda difüzyon kontrollü reaktif süreçlerle ortaya çıkmasını mümkün kılar. Bu sayede, sıvı fazın oluşum zamanı, miktarı, yayılımı ve bileşimi üzerinde daha yüksek düzeyde kontrol sağlanabilir (Turpin-Launay

vd., 1983; Wang vd., 2002). Oluşan reaktif sıvı faz, yalnızca parçacıklar arasında ıslanma ve bağ kurma işlevi görmekle kalmaz; aynı zamanda yeni fazların (örneğin karbürler, borürler, silisitler, intermetalik bileşikler) oluşumunu teşvik ederek mikro yapının yeniden şekillenmesini sağlar. Bu durum, RLPS yönteminin yalnızca yoğunluk artışı için değil, aynı zamanda fonksiyonel fazların sentezi ve karmaşık yapıların tasarımı için de kullanılabileceğini göstermektedir. Reaktif sıvı faz sinterleme; seramik matrisli kompozitler, sert metaller, yüksek sıcaklığa dayanıklı özel alaşımlar ve fonksiyonel gradyanlı malzemelerin üretiminde önemli bir alternatif haline gelmiştir. Bu yöntemin en büyük avantajlarından biri, yoğunluğu artırırken aynı zamanda hedeflenen fazların kontrollü bir şekilde sentezlenebilmesidir. Bu yönüyle RLPS, klasik LPS'nin sınırlamalarını aşmakta ve ileri mühendislik uygulamaları için yüksek performanslı malzemelerin üretiminde güçlü bir araç sunmaktadır.

Bu çalışmada, reaktif sıvı faz sinterleme yönteminin temel prensipleri, termodinamik ve kinetik yönleri, mikro yapı üzerindeki etkileri ve mekanik özellikleri iyileştirme potansiyeli detaylı bir şekilde ele alınacaktır. Ayrıca güncel literatürden seçilmiş uygulama örnekleriyle bu yöntemin endüstriyel karşılıkları tartışılacak; avantajları ve sınırlamaları değerlendirilerek gelecekteki araştırma yönelimlerine ışık tutulacaktır. Böylece RLPS, hem bilimsel araştırmalar hem de sanayi uygulamaları açısından kapsamlı bir çerçevede değerlendirilecektir.

Reaktif Sıvı Faz Sinterleme (RLPS) Kavramı, Tanımı ve Ayırt Edici Özellikleri

Reaktif Sıvı Faz Sinterleme (Reactive Liquid Phase Sintering, RLPS), katı bileşenler arasında sinterleme sırasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar sonucunda in-situ olarak sıvı fazın oluştuğu,

gelişmiş bir toz metalurjisi yöntemidir. Bu teknikte sıvı faz, önceden sisteme eklenmiş bir bileşen tarafından değil, sinterleme sürecinde reaktif bileşenlerin difüzyon ve reaksiyonu sonucu meydana gelir. RLPS, özellikle mikro yapının kontrolü, yoğunluk artışı ve yeni faz oluşumu açısından klasik sinterleme yöntemlerine göre üstün avantajlar sunmaktadır (Zheng ve Forslund, 1995).

RLPS'nin ayırt edici özelliklerinden biri, sıvı fazın sinterleme sırasında reaktif olarak oluşmasıdır; bu da hem sıvı fazın oluşum sıcaklığını hem de bileşimsel doğasını dinamik hale getirir. Oluşan sıvı faz, yalnızca parçacıklar arası ıslanma ve kapiler kuvvetlerin etkinleştirilmesi ile sinterleme kinetiğini hızlandırmakla kalmaz, aynı zamanda mikro yapıyı yeniden yapılandırarak yeni, fonksiyonel fazların oluşumuna da zemin hazırlar. Bu yönüyle RLPS, ileri düzey seramik matrisli kompozitler, intermetalik bileşikler ve sert alaşımların üretiminde özellikle tercih edilen bir yöntem haline gelmiştir (Ish-Shalom, 1982; Yawei, Nan ve Runzhang, 1997a; Yawei, Nan ve Runzhang, 1997b). Tablo 1'de RLPS ile Geleneksel Sıvı Faz Sinterleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 1: RLPS ile Geleneksel Sıvı Faz Sinterleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Özellik	Geleneksel Sıvı Faz Sinterleme	Reaktif Sıvı Faz Sinterleme (RLPS)
Sıvı faz oluşumu	Malzemenin kısmi erimesiyle oluşur	Kimyasal reaksiyonlarla yeni sıvı faz oluşumu
Sıvı faz kararlılığı	Genellikle kararlı ve sabit	Geçici veya metastabil sıvı faz
Mikro yapı kontrolü	Daha sınırlı	Yüksek hassasiyet ve yeni faz oluşumu
Sinterleme sıcaklığı	Genellikle yüksek	Daha düşük veya optimize edilebilir
Uygulama alanı	Standart metal ve seramik sinterleme	Karmaşık kompozitler, yüksek performanslı alaşımlar

RLPS ile Geleneksel Sıvı Faz Sinterlemenin Karşılaştırılması

Geleneksel sıvı faz sinterleme (LPS) ile RLPS arasındaki temel fark, sıvı fazın kökenidir. Geleneksel LPS’de sıvı faz, başlangıçta sisteme ilave edilen düşük ergime sıcaklığına sahip bir bileşenin sinterleme sıcaklığında erimesiyle elde edilir. Bu yöntemde sıvı fazın bileşimi ve miktarı sabittir ve kontrol, büyük oranda başlangıç toz bileşimine bağlıdır. Bu durum, sınırlı mikro yapı kontrolü ve reaksiyon esnekliği ile sonuçlanabilir. Buna karşılık, RLPS’de sıvı faz, sistemdeki katı bileşenler arasında sinterleme esnasında gerçekleşen difüzyon kontrollü kimyasal reaksiyonlarla oluşur. Sıvı faz, genellikle geçici olup, daha sonra çökelererek yeni bir faza dönüşebilir veya sürekli faz olarak sistemde kalabilir. Bu süreç, mikro yapının evriminde aktif rol oynar. RLPS yöntemi ile daha karmaşık faz dönüşümleri ve mikro yapılar elde edilebilirken, süreç kontrolü de daha çok termodinamik ve kinetik parametrelerin optimizasyonunu gerektirir. Özetle, geleneksel LPS daha öngörülebilir bir yapı sunarken, RLPS daha esnek ancak karmaşık ve kontrol edilmesi güç bir sinterleme davranışı sergiler. Bununla birlikte RLPS, yeni nesil fonksiyonel malzemelerin geliştirilmesinde sunduğu mikro yapısal çeşitlilik ve özgünlük nedeniyle önemli bir avantaj sağlar.

Reaktif Sıvı Fazın Oluşum Mekanizmaları

RLPS sürecinde sıvı fazın oluşumu, esas olarak katı reaktanlar arasındaki difüzyon kontrollü reaksiyonlara dayanmaktadır. Bu mekanizmalar, sistemin termodinamik kararlılığı ve difüzyon kinetiği ile doğrudan ilişkilidir. Sıvı faz, bazı durumlarda bir ara faz olarak oluşur ve daha sonra yeniden katılaşarak nihai mikro yapının

bir parçası haline gelir; bazı durumlarda ise kalıcı olarak sistemde kalır ve sinterleme kinetiğini yönlendirmeye devam eder (Bandyopadhyay vd., 2002).

Bu bağlamda, RLPS’de sıvı faz oluşumunun başlıca mekanizmaları aşağıda özetlenmiştir:

Isılanma ve kapiler kuvvetlerin etkisiyle sinterleme; oluşan sıvı faz, katı partiküller arasında etkili bir ısılanma sağlayarak yüzey enerjisini azaltır ve partiküller arası bağlantıyı güçlendirir. Bu durum, yoğunluğun artmasına doğrudan katkı sağlar. Çözünme–çökelme mekanizması; katı partiküllerin sıvı faz içinde kısmi çözünmesi ve sonrasında çökelerek yeniden kristalleşmesi ile mikro yapıda yeni fazlar oluşur. Bu süreç, özellikle intermetalik bileşikler ve kompleks karbür/borür fazlarının üretiminde önemli rol oynar. Reaktif sinterleme; kimyasal reaksiyonlarla yeni fazların oluşması sırasında yayılan ısı ve oluşan sıvı faz, sinterleme sürecini hızlandırır. Bu durum, homojen olmayan yapılarda bile etkin bir faz dönüşümüne olanak tanır (Tokita, 2007)

Termodinamik ve Kinetik Yaklaşımlar

Reaktif Faz Oluşumunun Termodinamiği

Reaktif sıvı faz sinterleme (RLPS) sürecinde sıvı fazın oluşumu, esas olarak reaksiyona giren bileşenler arasındaki termodinamik denge koşullarına bağlıdır. Katı fazlar arasında meydana gelen reaksiyonların serbest enerji değişimi (ΔG), belirli bir sıcaklıkta sıvı fazın oluşup oluşmayacağını belirleyen temel kriterdir. Eğer toplam reaksiyon için $\Delta G < 0$ ise, reaktif fazın oluşumu termodinamik olarak gerçekleşebilir kabul edilir. Bu bağlamda, RLPS’de genellikle entalpi açısından ekzotermik karakterde reaksiyonlar tercih edilir, çünkü bu tür reaksiyonlar sistemin toplam enerjisini düşürerek sinterleme sırasında faz dönüşümlerini destekler. Termodinamik

değerlendirmelerde, faz diyagramları, özellikle ikili ve üçlü sistemlerde sıvı faz oluşum sıcaklığının ve bileşim aralığının belirlenmesinde kritik rol oynar. Ayrıca, CALPHAD (Calculation of Phase Diagrams) gibi hesaplamalı yöntemler, sistemin çok bileşenli doğasını hesaba katarak reaktif faz oluşum senaryolarını öngörmede kullanılmaktadır. RLPS'ye özel olarak, reaktif bileşenlerin seçimi sırasında yalnızca düşük eutektik sıcaklıklar değil, aynı zamanda reaksiyon entalpisi ve çözünürlük sınırları da dikkate alınmalıdır (German, Erişim Tarihi: 03.05.2025; Cercom İTÜ, Erişim Tarihi: 03.05.2025).

Difüzyon Kontrollü Reaksiyonlar

RLPS'de sıvı fazın oluşumu yalnızca termodinamik uygunlukla değil, aynı zamanda reaktantlar arasında yeterli difüzyonun sağlanmasıyla mümkün olmaktadır. Katı fazlar arasında meydana gelen reaksiyonlar genellikle interfaz difüzyonu veya hacimsel difüzyon yoluyla gerçekleşir. Bu nedenle, işlem sıcaklığı, zaman ve parçacık boyutu gibi parametreler difüzyon hızını ve dolayısıyla sıvı fazın oluşma kinetiğini doğrudan etkiler. Difüzyon kontrollü reaksiyonlarda, birincil sınırlayıcı etken genellikle düşük sıcaklıklarda yeterli atom hareketliliğinin sağlanamamasıdır. Bununla birlikte, RLPS süreçlerinde kullanılan bazı sistemlerde, reaksiyon öncesinde sınırlı miktarda sıvı faz oluşumu, difüzyon yollarını kısaltarak sinerjik bir etki yaratabilir. Örneğin, Nb-B, Mo-Si, Ti-Al sistemlerinde yapılan çalışmalar, reaktif sıvı faz oluşumunun katı fazlar arasındaki difüzyonun hızlanmasına neden olduğunu göstermektedir. Bu durum, sinterleme kinetiğini olumlu yönde etkileyerek daha kısa sürede yüksek yoğunluklu ve karmaşık yapılar elde edilmesine olanak sağlar (Kang, 2005; Shan vd., 2019).

Sıvı Fazın Kararlılığı ve Geçiciliği

RLPS’de oluşan sıvı fazlar, yapısal olarak geçici (transient) veya kararlı (persistent) nitelikte olabilir. Bu kararlılık durumu, faz diyagramları, reaksiyon termodinamiği ve sistemdeki bileşenlerin difüzyon kinetiği ile belirlenir. Geçici sıvı fazlar, sinterleme sırasında oluşup, daha sonra ikincil fazların çökmesiyle ortadan kaybolurlar. Bu geçici doğa, mikro yapının yeniden düzenlenmesini sağlar ve gözenekliliğin azaltılmasında etkili bir rol oynar. Kararlı sıvı fazlar ise, sinterleme tamamlandığında sistemde kalıcı olarak bulunabilir ve nihai malzemenin özelliklerini doğrudan etkiler. Özellikle seramik matrisli kompozitler ve intermetalik sistemlerde, sıvı fazın kararlılığı, malzemenin yüksek sıcaklıkta gösterdiği davranış açısından kritik öneme sahiptir. Sıvı fazın aşırı kararlı olması ise, tane büyümesini tetikleyebilir ve bu da istenmeyen mekanik özelliklere yol açabilir (Shan vd., 2019). Bu nedenle, RLPS tasarımlarında sıvı fazın kontrollü bir şekilde geçici kalması çoğu zaman tercih edilir.

Sinterleme Kinetiği Üzerine Etkileri

Sıvı fazın reaktif olarak oluşması, sinterleme kinetiğinde önemli bir ivmelenmeye neden olur. Klasik sinterleme mekanizmaları olan yüzey difüzyonu, tane sınırı difüzyonu ve hacim difüzyonu RLPS ile desteklendiğinde, çözünme-çökme, viskoz akış ve kapiler kuvvetlerin etkisiyle yeniden düzenlenme gibi sıvı faza özgü mekanizmalar devreye girer. Bu mekanizmalar, partiküller arası bağların daha hızlı kurulmasını sağlayarak yoğunlaşmayı hızlandırır. Özellikle düşük viskoziteli geçici sıvı fazların varlığı, partiküllerin yeniden düzenlenmesini ve gözeneklerin kapanmasını kolaylaştırır (Haglund ve Argen, 1998; Martin ve Cáles, 1998). Bu süreç, sinterleme sıcaklığında ve süresinde önemli kazanımlar sağlayarak enerji verimliliğini artırır. Ayrıca, sinterleme hızının artması, reaktif fazların istenmeyen şekilde büyümesini engeller ve daha homojen bir mikro yapı elde edilmesine katkı sağlar. Sinterleme kinetiğinin

modellenmesinde, RLPS için Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov (JMAK) modelleri ve sıvı faz katkılı difüzyon modelleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür modeller, proses parametrelerinin optimizasyonunda ve endüstriyel ölçekte uygulanabilirliğin değerlendirilmesinde önemli bir araç olarak kullanılmaktadır (Haglund ve Argen, 1998; Yoshimura ve Goldenstein, 2009). Tablo 2’de Reaktif Sıvı Faz Sinterlemede Etkili Termodinamik ve Kinetik Faktörlerin karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 2: Reaktif Sıvı Faz Sinterlemede Etkili Termodinamik ve Kinetik Faktörler

Faktör	Açıklama	RLPS Sürecindeki Rolü
Termodinamik serbest enerji	Reaksiyonun gerçekleşebilirliğini belirler	Sıvı faz oluşumunu sağlar veya engeller
Difüzyon hızı	Atomların arayüzeylerde hareket hızını etkiler	Sinterleme hızını ve sıvı faz oluşumunu sınırlar
Sıvı faz kararlılığı	Oluşan sıvı fazın kalıcılığı veya geçiciliği	Mikro yapı kontrolü ve faz dönüşümünü etkiler
Reaksiyon kinetiği	Reaksiyonların hızını ve mekanizmasını belirler	Sinterleme sürecinin verimliliğini belirler

Mikro Yapı Gelişimi ve Mekanik Özellikler Üzerindeki Etkiler

Mikro Yapı Kontrolü ve Faz Dağılımı

Reaktif Sıvı Faz Sinterleme (RLPS), mikro yapının tasarımında olağanüstü bir kontrol olanağı sunar. Reaktif olarak oluşan sıvı faz, partiküller arası bağların hızlıca kurulmasını sağlarken aynı zamanda yeni fazların oluşumuna zemin hazırlar. Bu süreçte çözünme-çökelme mekanizması, sıvı faz içindeki çözünmüş

elementlerin daha kararlı ikincil fazlar halinde çökelmesi ile mikro yapı çeşitliliğini artırır. Özellikle intermetalik fazlar (örneğin NiAl, MoSi₂) veya seramik takviyeler (örneğin TiB₂, ZrB₂), nihai yapının sertlik, yüksek sıcaklık kararlılığı ve aşınma direnci gibi kritik mekanik özelliklerini geliştirir. Mikro yapı kontrolü, sadece elde edilen fazların türü ile değil, aynı zamanda bu fazların morfolojisi, tane boyutu ve dağılım homojenliği ile de doğrudan ilişkilidir. RLPS sırasında geçici sıvı fazın sağladığı hareketlilik sayesinde taneler arası yeniden düzenlenme daha homojen bir yapı elde edilmesini mümkün kılar. Bu da makroskobik özelliklerde öngörülebilirliği ve güvenilirliği artırır.

Faz Kararlılığı ve Sıcaklık Dayanımı

Reaktif sinterleme sonucu oluşan yeni fazların kararlılığı, özellikle yüksek sıcaklık uygulamaları için kritik öneme sahiptir. Oluşan intermetalik veya seramik fazlar, sahip oldukları yüksek erime noktası, düşük difüzyon katsayısı ve termal genleşme kararlılığı sayesinde yapısal kararlılığı artırır. RLPS ile geliştirilen malzemeler, bu nedenle yüksek sıcaklıkta çalışan türbin bileşenleri, kesici takımlar veya ısıl bariyer kaplamaları gibi uygulamalarda büyük avantaj sağlar. Ancak faz kararlılığı, her zaman olumlu bir faktör olarak değerlendirilemez. Aşırı kararlı veya termodinamik olarak metastabil kalan fazlar, servis koşullarında faz dönüşümlerine veya termomekanik çatlamalara neden olabilir (Tokita, 2013). Bu sebeple RLPS uygulamalarında, nihai fazların hem işlem sıcaklığına hem de servis koşullarına uygun kararlılıkta olması sağlanmalıdır. Bu bağlamda, yüksek sıcaklıkta XRD (in-situ XRD) analizleri ve termogravimetrik yöntemlerle yapılan karakterizasyon çalışmaları oldukça değerlidir.

Gözeneklilik Azaltma ve Yoğunluk Artışı

Gözeneklilik, sinterlenmiş malzemelerin mekanik özelliklerini doğrudan etkileyen önemli bir mikro yapı parametresidir. RLPS sürecinde oluşan sıvı faz, partiküller arasında yüzey enerjisini düşürerek kapiler etkiler yoluyla boşlukların kapanmasını teşvik eder. Özellikle düşük viskoziteli sıvı fazlar, partiküllerin yeniden yerleşmesini ve yüzey temaslarının artmasını sağlayarak daha yüksek yoğunluklu yapıların oluşmasına yardımcı olur. Bu süreçte gözenekliliğin azaltılması yalnızca mekanik dayanımı artırmakla kalmaz, aynı zamanda korozyon direnci, termal iletkenlik ve aşınma davranışı gibi özellikleri de iyileştirir (Williams, 2003; Lou vd., 2018). Ayrıca, RLPS sırasında geçici sıvı fazın zamanında geri çekilmesi ve uygun bir sinterleme atmosferi kullanılması, kapanmayan açık gözeneklerin önlenmesinde kritik rol oynar. Bu bağlamda, vakum altında yapılan RLPS prosesleri, oksitlenme riskini azaltarak gözenekliliği daha da düşürmektedir.

Mekanik Performans Üzerindeki Etkiler

RLPS yöntemiyle elde edilen malzemeler, sahip oldukları kompleks faz yapısı ve yüksek yoğunlukları sayesinde geniş bir mekanik performans yelpazesi sunar. Oluşan intermetalik fazlar, yüksek sertlik, aşınma direnci ve oksidasyon kararlılığı gibi özellikleri desteklerken; metalik fazlar ise tokluğu ve mekanik sürekliliği artırır. Bu iki faz grubunun dengeli bir şekilde mikro yapıya dağılması, özellikle sertlik-tokluk dengesi açısından avantaj sağlar. Mekanik testler (örneğin mikro sertlik, eğme mukavemeti ve kırılma tokluğu ölçümleri) ile yapılan değerlendirmeler, RLPS ile üretilmiş malzemelerin, konvansiyonel sinterleme yöntemlerine kıyasla %10-30 arasında daha yüksek mekanik performans gösterebildiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, prosesin sadece mikroyapısal değil, aynı zamanda uygulama yönlü mühendislik çözümleri üretmede de etkin olduğunu göstermektedir.

Reaktif Sıvı Faz Sinterleme (RLPS) Yönteminin Uygulama Alanları

RLPS, karmaşık faz içeren, yüksek performans gerektiren mühendislik malzemelerinin üretiminde özgün bir yaklaşım sunmakta ve çeşitli endüstriyel alanlarda önemli bir rol oynamaktadır. Bu yöntem, özellikle seramik matrisli kompozitler, sert metaller, intermetalik bileşikler, yüksek sıcaklık alaşımları ve kaplama teknolojileri gibi özel uygulamalarda tercih edilmektedir.

Seramik Matrisli Kompozitler (CMC); Yüksek sıcaklıklarda mukavemetini koruyabilen ve aşınmaya dirençli malzemelere olan gereksinim, RLPS yönteminin seramik matrisli kompozit üretiminde kullanılmasını yaygınlaştırmıştır. Özellikle SiC, ZrB₂, TiB₂, Al₂O₃ gibi matrislerin, reaktif sinterleme yoluyla takviye fazlarla (örneğin TiC, MoSi₂) birlikte işlenmesi, gelişmiş mekanik ve termal performans sağlayan yapılar oluşturur. RLPS sayesinde, bu sistemlerde hem bağ yapılarının bütünlüğü hem de takviye fazların matrisle uyumu optimize edilebilmektedir (Skorokhod, Vlajic ve Krstic, 1998). Sert Metaller ve Takım Malzemeleri; Sert metal üretiminde, özellikle karbür esaslı takım malzemeleri (örneğin WC-Co, TiC-Ni) RLPS yöntemiyle mikro yapı kontrolü açısından üstünlük kazanmaktadır. Geleneksel sıvı faz sinterlemede kullanılan bağlayıcı metalin RLPS yoluyla reaktif olarak oluşturulması, homojen bir dağılım ve daha ince tane boyutu sağlamaktadır. Bu sayede takım malzemelerinde hem sertlik hem de tokluk performansı dengelenmiş hale gelmektedir. Ayrıca RLPS, kobalt alternatifleri arayan yeni nesil takım tasarımlarında da çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliği desteklemektedir. (Wang, Li ve Seetharaman, 2002; Tokita, 2007). Intermetalik Bileşikler ve Yapısal Alaşımlar; RLPS, özellikle NiAl, FeAl, TiAl gibi intermetalik sistemlerin üretiminde reaksiyon kontrollü bir sinterleme platformu sunar. Bu malzemeler, yüksek sıcaklık dayanımı, oksidasyon direnci ve düşük

yoğunluk gibi özellikleriyle havacılık ve uzay uygulamalarında önem taşır. RLPS'nin difüzyon kontrollü faz oluşumu mekanizmaları sayesinde, bu intermetaliklerin gözeneksiz ve kontrollü mikro yapılarla elde edilmesi mümkün olmaktadır (Turpin-Launay vd., 1983). Yüksek Sıcaklık Uygulamaları İçin Alaşımlar; Reaktif sıvı faz sinterleme, yüksek sıcaklıkta çalışan türbin kanatları, ısı değiştiriciler ve nükleer reaktör bileşenleri gibi kritik uygulamalar için özel olarak tasarlanan alaşımların üretiminde kullanılmaktadır. Bu tür uygulamalarda RLPS, düşük sıcaklıkta yüksek yoğunluk elde edilmesini sağlayarak enerji maliyetini azaltırken, sinterleme sırasında oluşan özel fazlar sayesinde termal yorulma ve korozyon direnci açısından iyileştirme sunar (Yawei, Nan ve Runzhang; 1997b). Fonksiyonel Kaplama Malzemeleri; RLPS ile elde edilen seramik ve intermetalik fazlar, aşınma ve korozyon direncini artırmak amacıyla kaplama teknolojilerinde de kullanılmaktadır. Özellikle reaktif sinterlenmiş toz karışımları, plazma püskürtme veya lazer sinterleme ile birlikte yüzey kaplaması şeklinde uygulanmakta; böylece yüksek performanslı yüzey özellikleri sağlanmaktadır. Bu yöntem, RLPS ile uyumlu tozların reaktif olarak kaplama yüzeyinde sinterlenmesiyle yeni fazlar oluşturarak yüzey performansını artırır (Cheng vd., 2001).

Sonuç ve Öneriler

Reaktif Sıvı Faz Sinterleme (RLPS), katı reaktanlar arasındaki difüzyon kontrollü reaksiyonlar yoluyla sinterleme sırasında sıvı faz oluşumunu sağlayan özgün bir yöntem olarak, malzeme mühendisliği literatüründe önemli bir yer edinmiştir. Bu teknik, yalnızca yoğunluk artışı sağlamakla kalmayıp aynı zamanda mikro yapının yeniden düzenlenmesi, faz kontrolü ve hedeflenen bileşiklerin in situ oluşturulmasına da olanak tanımaktadır.

RLPS yönteminin en belirgin üstünlüğü, mikro yapının yüksek oranda kontrol edilebilmesidir. Oluşan sıvı faz, ıslanma ve çözünme-çökelme mekanizmaları sayesinde parçacıklar arası bağlantıları geliştirerek sinterleme etkinliğini artırmakta ve daha düşük sıcaklıklarda yüksek yoğunlukta ürünler elde edilmesine imkân tanımaktadır. Ayrıca reaktif ortamda oluşan ara fazlar sayesinde, hedeflenen özel fazların doğrudan üretilebilmesi, bu yöntemi fonksiyonel ve yüksek sıcaklık uygulamaları için cazip kılmaktadır. Termodinamik dengeye dayalı faz oluşumlarının kinetik olarak yönlendirilmesi, tasarlanabilir mikro yapılar geliştirilmesini mümkün kılarak özellikle seramik matrisli kompozitlerde ve intermetalik sistemlerde RLPS'nin etkinliğini artırmaktadır.

RLPS'nin bazı sınırlamaları da göz ardı edilmemelidir. Özellikle reaktif fazların oluşum süreçlerinin karmaşıklığı, istenmeyen ara fazların meydana gelmesi veya kararsız sıvı fazların süreç boyunca kontrolsüz yayılımı gibi durumlar, prosesin dikkatle optimize edilmesini gerektirir. Ayrıca difüzyon kontrollü reaksiyonların zamanla sınırlı olması ve bazı sistemlerde çok dar bir sıcaklık aralığında gerçekleşmesi, prosesin hassas termal kontrol gereksinimini artırmaktadır. RLPS, geleneksel sinterleme yöntemlerine kıyasla daha fazla ön işlem bilgisi ve hesaplamalı termodinamik/kinetik öngörü gerektirir.

Kaynaklar

Thümmeler, F., & Oberacker, R. (1993). *An introduction to powder metallurgy*. Cambridge University Press. ISBN: 0-901716-26-X

Upadhyaya, G. S. (2002). *Powder metallurgy technology*. Cambridge International Science Publishing. ISBN: 1898326401

Tosun, G., Kılıç, M., Özler, L., & Tosun, N. (2018). Characterization of a porous nickel-titanium alloy produced with self-propagating high-temperature synthesis. *Metalurgija*, 52(4), 435.

Lou, J., He, H., Li, Y., Zhu, C., Chen, Z., & Liu, C. (2016). Effects of high O contents on the microstructure, phase-transformation behaviour, and shape-recovery properties of porous NiTi-based shape-memory alloys. *Materials and Design*, 106, 37–44.

Frage, N., Kalabukhov, S., Sverdlov, N., Ezersky, V., & Dariel, M. P. (2010). Densification of transparent yttrium aluminum garnet (YAG) by SPS processing. *Journal of the European Ceramic Society*, 30(16), 3331–3337.

Turpin-Launay, D., Thevenot, F., Delvoye, F., & Boch, P. (1983). Reactive hot-pressing of aluminum oxynitride. *Materials Science Monographs*, 16, 891–897.

Wang, X., Li, W., & Seetharaman, S. (2002). Thermodynamic study and synthesis of γ -aluminum oxynitride. *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 31(1), 1–6.

Zheng, J., & Forslund, B. (1995). Carbothermal synthesis of aluminum oxynitride (AlON) powder: Influence of starting materials and synthesis parameters. *Journal of the European Ceramic Society*, 15, 1087–1100.

Ish-Shalom, M. (1982). Formation of aluminium oxynitride by carbothermal reduction of aluminium oxide in nitrogen. *Journal of Materials Science Letters*, 1, 147–149.

Yawei, L., Nan, L., & Runzhang, Y. (1997). The formation and stability of γ -aluminium oxynitride spinel in the carbothermal reduction and reaction sintering processes. *Journal of Materials Science*, 32, 979–982.

Yawei, L., Nan, L., & Runzhang, Y. (1997). Carbothermal synthesis of aluminium oxynitride spinel powders at low temperatures. *Journal of Materials Science Letters*, 16, 185–186.

Bandyopadhyay, S., Rixecker, G., Aldinger, F., Pal, S., Mukherjee, K., & Maiti, S. (2002). Effect of reaction parameters on AlON formation from Al_2O_3 and AlN. *Journal of the American Ceramic Society*, 85, 1010–1012.

Tokita, M. (2007). Introduction of an emerging compaction technology—Spark plasma sintering (SPS) method and systems. In *MPIF/APMI International Conference on Powder Metallurgy*.

German, R. M. (Erişim Tarihi: 03.05.2025). *Powder metallurgy and particulate materials processing*.

Cercom İTÜ. (Erişim Tarihi: 03. 05.2025). Retrieved from <http://www.cercom.itu.edu.tr>

Kang, S. J. L. (2005). Basis of liquid phase sintering. In *Sintering* (pp. 199–203).

Shan, Y., Wei, X., Sun, X., Torresani, E., Olevsky, E. A., & Xu, J. (2019). Effect of heating rate on properties of transparent aluminum oxynitride sintered by spark plasma sintering. *Journal of the American Ceramic Society*, 102(2), 662–673.

Haglund, S., & Argen, J. (1998). Solid state sintering of cemented carbides: An experimental study. *Zeitschrift für Metallkunde*, 89, 316–322.

Martin, C., & Calès, B. (1989). Synthesis and hot pressing of transparent aluminum oxynitride. *Proceedings of SPIE*, 1112, 20–24.

Yoshimura, N. H., & Goldenstein, H. (2009). Light scattering in polycrystalline alumina with bi-dimensionally large surface grains. *Journal of the European Ceramic Society*, 29, 293–303.

Tokita, M. (2013). Spark plasma sintering (SPS) method, systems, and applications. In *Handbook of Advanced Ceramics* (pp. 1149–1177).

Williams, A. (2003). Ceramic armor and armor systems. In *Ceramic Transactions* (Vol. 151).

Skorokhod, V., Vlajic, M. D., & Krstic, V. D. (1998). Pressureless sintering of B₄C–TiB₂ composites. *Materials Science Forum*, 282–283, 219–224.

Cheng, J., Agrawal, D., Zhang, Y., & Roy, R. (2001). Microwave reactive sintering to fully transparent aluminum oxynitride (AlON) ceramics. *Journal of Materials Science Letters*, 20(1), 77–79.

BÖLÜM 2

SÜRTÜNME KAYNAĞI TEKNİKLERİNDE SON GELİŞMELER VE ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARI

Ertuğrul ÇELİK¹
Büşra TUNÇ²

Giriş

Farklı mühendislik malzemelerinin güvenilir ve yüksek kaliteli birleştirilmesi, günümüz üretim süreçlerinde sürdürülebilirlik, hafiflik, maliyet etkinliği ve yapısal bütünlük gibi çok boyutlu gereksinimlerin karşılanması açısından kritik bir öneme sahiptir. Konvansiyonel ergitme kaynak yöntemleri, birleşim sırasında yüksek ısı girdisi nedeniyle kaynak bölgesinde meydana gelen metalürjik değişimler, artık gerilmeler, çatlak oluşumu ve kaynak sonrası işleme gereksinimleri gibi dezavantajlar nedeniyle sınırlı bir uygulama alanına sahiptir. Bu bağlamda, katı hâl birleştirme yöntemlerinden biri olan sürtünme kaynağı, çeşitli

¹ Doç. Dr, Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tunceli, Türkiye, 0000-0001-7104-8288

² Öğr. Gör., Artvin Çoruh Üniversitesi, Borçka Acarlar Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Artvin, Türkiye, 0000-0002-0090-5227

malzeme çiftleri için homojen, güvenilir ve mekanik olarak üstün birleşimler sağlamasıyla ön plana çıkmaktadır (Özdemir, 2002).

Sürtünme kaynağı, birleştirilecek parçalar arasında oluşturulan göreceli hareket ve eksenel kuvvet yardımıyla yüzeyler arası sürtünme ile ısı üretilmesi esasına dayanan ve birleşim sıcaklığın malzemelerin erime noktasının altında kalan bir kaynak yöntemidir. Bu yöntem sayesinde birleşim, malzemenin sıvı faza geçmeden, yalnızca plastik deformasyona uğraması yoluyla gerçekleşmekte, böylece ergitme kaynaklarında yaygın olarak karşılaşılan pek çok kaynak kusurunun önüne geçilmektedir (Anık, 1991). Yöntem, kullanılan harekete göre başlıca üç alt kategoriye ayrılmaktadır: döner sürtünme kaynağı (Rotary Friction Welding – RFW), doğrusal sürtünme kaynağı (Linear Friction Welding – LFW) ve sürtünme karıştırma kaynağı (Friction Stir Welding – FSW). Her bir yöntemin kendi içinde farklı işlem parametreleri, ekipman yapıları ve uygulama alanları bulunmakta; bu durum sürtünme kaynağının çok çeşitli endüstriyel ihtiyaçlara cevap verebilmesini sağlamaktadır. Son yıllarda sürtünme kaynağına olan ilgi, özellikle alüminyum, magnezyum, titanyum ve yüksek mukavemetli çelikler gibi geleneksel yöntemlerle kaynaklanması güç olan malzemelerin birleştirilmesinde gösterdiği yüksek başarı sayesinde artmıştır. Düşük ısı girdisi, daha az kaynak hatası, sınırlı deformasyon ve düşük artık gerilmeler gibi avantajları, bu yöntemin havacılık, otomotiv, uzay, demiryolu ve savunma sanayii gibi ileri mühendislik alanlarında yaygın şekilde tercih edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, prosesin otomasyona uygunluğu ve enerji verimliliği açısından sağladığı avantajlar, sürtünme kaynağını sürdürülebilir üretim stratejileriyle uyumlu hâle getirmektedir (Özdemir ve Orhan, 2002; Çelik, 1997; Ateş ve Türker, 2003) .

Bu derleme çalışmasının amacı, sürtünme kaynağı yöntemine ilişkin güncel literatürü sistematik biçimde inceleyerek

yöntemin tarihsel gelişimini, temel prensiplerini, işlem parametrelerini, avantajlarını, sınırlılıklarını ve endüstriyel uygulamalardaki performansını kapsamlı bir şekilde ortaya koymaktır. Ayrıca, her alt yöntemin teknik özellikleri ve uygulama örnekleri karşılaştırmalı olarak ele alınmakta; sürtünme kaynağının gelecekteki potansiyel gelişim alanlarına dair öngörüler sunulmaktadır. Böylece bu çalışma, mühendislik uygulamalarında sürtünme kaynağını kullanmayı planlayan araştırmacılar ve endüstri profesyonelleri için kapsamlı bir başvuru kaynağı sunmayı hedeflemektedir.

Sürtünme Kaynağının Tarihsel Gelişimi Ve Temel Prensipleri

Sürtünme kaynağı, ergitme olmaksızın malzemelerin birleştirilmesini mümkün kılan katı hâl kaynak yöntemlerinden biridir. Bu yöntemin ilk uygulamaları, 20. yüzyılın ortalarında, özellikle savunma ve havacılık sektörlerinde ortaya çıkmış olup, zamanla teknolojik gelişmelerle birlikte yaygınlık kazanmıştır. İlk patentli çalışmalar 1950'li yıllara uzanmakta ve özellikle silindirik parçaların aksenal kuvvet altında döndürülerek birleştirilmesine dayanmaktadır. Bu dönemde sürtünme ile ısı üretimi kavramı temel alınarak, özellikle çelik parçaların verimli şekilde birleştirilebilmesi sağlanmıştır. 1960'lı yıllarda İngiltere'de The Welding Institute (TWI) tarafından yürütülen çalışmalar, yöntemin bilimsel temellerinin oluşmasına öncülük etmiştir. Zamanla bu yöntemin yalnızca homojen malzemelerde değil, aynı zamanda farklı mekanik ve termal özelliklere sahip malzemelerin birleştirilmesinde de etkili olduğu anlaşılmıştır. 1991 yılında, yine TWI tarafından geliştirilen Sürtünme Karıştırma Kaynağı (Friction Stir Welding - FSW) yöntemi, katı hâl kaynak teknolojilerinde bir dönüm noktası olmuştur. Bu yöntemle birlikte alüminyum ve alaşımlarının kaynağında görülen geleneksel ergitme kaynak problemleri büyük ölçüde aşılmış, mikro yapısal süreklilik ve mekanik mukavemet

değerlerinde önemli artışlar elde edilmiştir Chludzinski vd., 2019). Günümüzde sürtünme kaynağı, robotik sistemlerle entegre edilebilmekte, otomasyon kabiliyeti sayesinde savunma, otomotiv, uzay, havacılık ve raylı sistemler gibi stratejik sektörlerde yaygın bir şekilde uygulanabilmektedir.

Sürtünme kaynağı yönteminin temel prensibi, birleştirilecek iki malzemenin arayüzeyinde sürtünme hareketiyle ısının ortaya çıkması ve bu ısının etkisiyle malzemelerin yüzeylerinin yumuşayarak plastik deformasyon geçirmesidir. Uygulanan eksenel basınç ve sürtünme hareketi sonucunda meydana gelen sıcaklık, malzeme sıcaklığının ergime noktasının altında kalacak şekilde sınırlıdır. Böylece erime olmadan birleştirme gerçekleşir ve kaynak bölgesinde tipik olarak ergitme kaynaklarında karşılaşılan çatlaklar, boşluklar ve gözenekler gibi kaynak hatalarının oluşması engellenir. Bu işlem sırasında, malzemeler akışkan bir hâl almasa da, lokal sıcaklık artışı ve mekanik etkiler sayesinde arayüzeyde mikroyapısal yeniden düzenlenmeler meydana gelir. Özellikle dinamik yeniden kristalleşme sonucu, ince taneli ve homojen mikro yapılar elde edilerek kaynak bölgesinin mekanik özellikleri iyileştirilir (Ünal, Karaca ve Sarsılmaz, 2019). Bu durum, özellikle FSW yöntemiyle yapılan kaynaklarda açıkça gözlemlenmektedir. Ayrıca, sürtünme kaynağı ile elde edilen birleşme mukavemeti, çoğu zaman ana malzemenin kendisiyle kıyaslanabilecek düzeydedir.

Katı hâl birleştirme prensibi ile çalışan sürtünme kaynağı, ergitme kaynak yöntemlerine göre birçok avantaja sahiptir. Bunlar arasında düşük ısı girdisi, düşük artık gerilme, daha az distorsiyon, daha az kaynak sonrası işlem ihtiyacı ve çevreye duyarlı üretim olanakları yer alır. Öte yandan, ergitme kaynaklarında karşılaşılan eriyik havuzunun kontrol zorluğu ve mikroyapısal bozulmalar, sürtünme kaynağında minimum düzeydedir (Paylaşan, 2000).

Sonuç olarak, sürtünme kaynağı yöntemi hem tarihsel gelişimi hem de sağlam bilimsel temelleri ile özellikle modern mühendislik uygulamalarında kritik öneme sahiptir. Yöntemin temel prensiplerine dayanan bilimsel gelişmeler, hem malzeme bilimi hem de imalat mühendisliği açısından sürdürülebilir, yüksek performanslı birleşim çözümleri sunmaktadır (Ersözlü, 2006). Literatürdeki güncel eğilimler, bu yöntemin gelecekte daha geniş malzeme yelpazesi ve otomasyon düzeyleriyle entegre edilerek çok daha yaygın bir uygulama alanı bulacağını göstermektedir.

Sürtünme Kaynağı Türleri

Sürtünme kaynağı, uygulanan hareket türüne ve ekipman tasarımına bağlı olarak çeşitli alt yöntemlere ayrılmaktadır. Bu yöntemler arasında en yaygın olanları Döner Sürtünme Kaynağı (Rotary Friction Welding – RFW), Doğrusal Sürtünme Kaynağı (Linear Friction Welding – LFW) ve Sürtünme Karıştırma Kaynağı (Friction Stir Welding – FSW) olarak sınıflandırılmaktadır. Her bir yöntem, belirli uygulama alanları, malzeme türleri ve teknik gereklilikler doğrultusunda geliştirilmiştir (zdemir ve Orhan, 2002).

Döner Sürtünme Kaynağı (Rotary Friction Welding – RFW)

Döner sürtünme kaynağı, özellikle simetrik ve silindirik parçaların birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde birleştirilecek parçalardan biri sabit tutulurken diğeri belirli bir hızda döndürülür. İki parça belirli bir eksenel kuvvet altında bir araya getirilerek arayüzeyde oluşan sürtünme ile ısı üretilir. Sıcaklık artışı malzemelerin plastik deformasyona uğramasına neden olur ve döndürme işlemi durdurulduğunda soğuma aşamasına geçilerek kaynak tamamlanır. Bu yöntemde

kullanılan ekipmanlar genellikle yüksek devirli döner tabla sistemleri, aksel kuvvet kontrol üniteleri ve otomatik soğuma kontrol mekanizmalarını içerir. RFW yöntemi; akslar, valfler, tork şaftları gibi otomotiv ve demiryolu endüstrilerinde kullanılan parçaların üretiminde yaygın şekilde tercih edilmektedir. Ancak, yalnızca dairesel kesitli parçaların birleştirilebilmesi yöntemin önemli bir sınırlılığıdır (Gürleyik, 1984; Alvisi, Masoni ve Wallve, 2002).

Doğrusal Sürtünme Kaynağı (Linear Friction Welding – LFW)

Doğrusal sürtünme kaynağı, genellikle simetrik olmayan ya da dairesel olmayan parçaların birleştirilmesinde tercih edilmektedir. Bu yöntemde, parçalardan biri yüksek frekansta ileri-geri doğrusal harekete tabi tutulurken, diğeri sabit kalır. Arayüzeyde sürtünme ile oluşan ısı sayesinde malzemeler plastik deformasyona uğrar ve aksel kuvvetin etkisiyle birleşme gerçekleşir. LFW yöntemi, özellikle yüksek performanslı ve ısıya dayanıklı metal alaşımlarının birleştirilmesinde üstünlük sağlamaktadır. Titanyum, nikel bazlı süperalaşımlar ve kompozit malzemeler bu yöntemde sıkça kullanılan malzemelerdir. Havacılık ve savunma sanayii başta olmak üzere, türbin kanatları, motor parçaları ve yüksek mukavemet gerektiren birleşimlerde LFW, geleneksel kaynak yöntemlerinin yerini almaktadır. Yöntemin en büyük avantajlarından biri, geometrik sınırlamaların daha esnek olması ve kaynak kalitesinin oldukça yüksek seviyede elde edilmesidir (Alvisi, 2002).

Sürtünme Karıştırma Kaynağı (Friction Stir Welding – FSW)

Sürtünme karıştırma kaynağı, katı hâl sürtünme kaynak yöntemleri arasında en çok dikkat çeken yeniliklerden biridir. Bu

yöntemde, dönen bir takım (shoulder ve pin bileşenlerinden oluşur) kaynak yapılacak malzemelerin birleşim hattı boyunca ilettilerek hem ısı üretimi hem de malzeme karışımı sağlanır. Takım, kaynak bölgesinde mekanik etkileşimle plastik deformasyon oluşturur ve malzemelerin birbiri içinde karışarak homojen bir yapıda birleşmesini sağlar. FSW yönteminde, takım tasarımı ve malzeme özellikleri büyük önem taşır. Shoulder kısmı sürtünme ile ısı üretirken, pin kısmı malzemeleri karıştırarak birleştirmenin gerçekleşmesini sağlar. Bu yöntemin en önemli avantajlarından biri, özellikle alüminyum ve alaşımlarında yüksek kaynak kalitesi sunması ve gözenek, çatlak gibi kaynak hatalarının neredeyse hiç görülmemesidir. Ayrıca kaynak bölgesinde ince taneli bir mikro yapı oluşur ve bu da mekanik özelliklerin gelişimine katkı sağlar. FSW; otomotiv, denizcilik ve havacılık gibi sektörlerde, özellikle yakıt verimliliği ve hafiflik gerektiren parçalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Tablo 1’de her bir sürtünme kaynağı türünün (RFW, LFW, FSW) işlem prensibi, kullanılan ekipman, avantajları ve sınırlılıklarını özetleyen yer almaktadır (Gürleyik, 1984; Alvisi, Masoni ve Wallve, 2002).

Tablo 1: *Farklı proses parametrelerinin (dönme hızı, eksenel kuvvet, süre) kaynak kalitesi üzerindeki etkileri*

Kaynak Türü	İşlem Prensibi	Kullanılan Ekipman	Avantajları	Sınırlılıkları
Döner Sürtünme Kaynağı (RFW)	Döner hareket + aksiyal basınç	Döner mili olan kaynak makinesi	Yüksek verim, hızlı kaynak	Sadece simetrik parçalar için
Doğrusal Sürtünme Kaynağı (LFW)	Lineer hareket + basınç	Lineer sürücüler ve pres	Karmaşık şekilli parçalara uygun	Ekipman maliyeti yüksek
Sürtünme Karıştırma Kaynağı (FSW)	Döner takım ve plastik deformasyon	Özel takım ve CNC tezgah	Düşük ısı etkisi, iyi mekanik özellik	Kalın malzemelerde sınırlı

Proses Parametrelerinin Birleşim Kalitesine Etkisi

Sürtünme kaynağı süreçlerinde elde edilen birleşim kalitesi, büyük ölçüde uygulanan proses parametrelerine bağlıdır. Her bir kaynak yönteminde farklı olmakla birlikte, genel olarak dönme hızı, eksenel kuvvet, sürtünme süresi ve soğuma süresi gibi parametreler birleşim performansını doğrudan etkiler. Bu parametrelerin uygun şekilde optimize edilmesi, kaynak bölgesinde istenilen mikro yapı ve mekanik özelliklerin elde edilmesinde kritik rol oynar.

Dönme Hızı ve Sürtünme Süresi: Dönme hızı, sürtünme ile oluşan ısının seviyesini belirlerken, sürtünme süresi bu ısının kaynak bölgesine ne kadar süreyle etki edeceğini belirler. Yüksek dönme hızları genellikle daha fazla ısı üretimine neden olur; ancak bu durum, kontrolsüz ısı artışına ve malzeme özelliklerinin bozulmasına yol açabilir. Benzer şekilde, çok kısa sürtünme süreleri kaynak bölgesinde yeterli plastik deformasyonun oluşmamasına neden olabilir (Kırık ve Özdemir, 2012).

Eksenel Kuvvet ve Soğuma Süresi: Eksenel kuvvet, iki parçanın bir araya gelmesini ve etkin bir kaynak oluşmasını sağlar. Yetersiz kuvvet, yüzey temasının zayıf kalmasına neden olurken; aşırı kuvvet ise malzemenin aşırı deformasyonuna ve hata oluşumuna yol açabilir. Soğuma süresi ise kaynak bölgesindeki yapısal dönüşümleri ve yeniden kristalleşme davranışını etkileyerek, nihai mikroyapının belirlenmesinde önemli rol oynar (Kırık ve Özdemir, 2012).

Bu parametrelerin mikro yapı üzerindeki etkileri; tane boyutu, faz dönüşümleri ve yeniden kristalleşme davranışları ile ortaya çıkar. Uygun parametrelerle yapılan kaynaklarda, ince taneli ve homojen bir yapı elde edilirken; uygunsuz parametre seçimleri,

tane büyümesi, düzensiz faz dağılımı ve kaynak hatalarına yol açabilir. Mekanik özellikler açısından, parametrelerin birleşim bölgesindeki çekme dayanımı, sertlik ve tokluk gibi değerlere doğrudan etkisi olduğu görülmektedir. Literatürde yapılan birçok çalışmada, bu parametrelerin optimizasyonu sayesinde kaynak performansının önemli ölçüde iyileştirilebildiği rapor edilmiştir. Örneğin, Taguchi analizi ve yapay sinir ağları gibi optimizasyon teknikleri, proses parametrelerinin en uygun seviyede belirlenmesine olanak tanımaktadır. Sürtünme kaynağının başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için proses parametrelerinin dikkatle kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu parametrelerin birleşim kalitesi üzerindeki etkilerinin anlaşılması, hem deneysel hem de sayısal çalışmalarla desteklenmeli ve uygulamaya dönük proses haritalarının oluşturulması hedeflenmelidir. Tablo 2’de Farklı proses parametrelerinin (dönme hızı, eksenel kuvvet, süre) kaynak kalitesi üzerindeki etkilerini gösteren özet tablo yer almaktadır (Kırık ve Özdemir, 2012).

Tablo 2: Farklı proses parametrelerinin (dönme hızı, eksenel kuvvet, süre) kaynak kalitesi üzerindeki etkilerini gösteren özet tablo

Parametre	Etki Alanı	Kaynak Kalitesi Üzerindeki Etkisi
Dönme Hızı	Isı üretimi	Yüksek hız = artan ısı, fakat aşırı hız çatlaklara neden olabilir
Eksenel Kuvvet	Plastik deformasyon	Yeterli kuvvet kaynak bölgesinde iyi birleşme sağlar
Sürtünme Süresi	Malzeme akışı ve mikro yapı	Uzun süreler tane incelmeye sağlar, ama aşırı süre malzeme zararına yol açabilir

Malzeme Bazlı Uygulamalar ve Endüstriyel Kullanım Alanları

Sürtünme kaynağı, malzeme mühendisliğinde katı hâl birleştirme yöntemlerinin başında gelen, yüksek mukavemetli,

gözeneksiz ve homojen kaynak bölgeleri oluşturulmasına olanak tanıyan bir tekniktir. Bu yöntemin sahip olduğu termomekanik prensipler, özellikle ergitme kaynaklarında karşılaşılan çatlak, gözenek, ergime hatası gibi problemleri bertaraf ederek, çok çeşitli malzeme gruplarında etkili bir birleştirme sağlamaktadır. Aynı zamanda, sürtünme kaynağının artan endüstriyel uygulamaları, bu yöntemin malzeme-tabanlı performansını ortaya koymaktadır. Aşağıda, farklı malzeme türlerine göre sürtünme kaynağının uygulanabilirliği ve bu uygulamaların karşılık bulduğu sanayi alanları birlikte ele alınmaktadır.

Alüminyum ve Alaşımları

Alüminyum ve alüminyum alaşımları, sürtünme karıştırma kaynağının (FSW) en yaygın olarak uygulandığı malzemelerdir. Bu malzemelerde kaynak bölgesinde dinamik yeniden kristalleşme ile ince taneli ve homojen bir yapı oluşmakta, bu da kaynak dayanımını olumlu yönde etkilemektedir. Özellikle 2XXX, 6XXX ve 7XXX serisi alaşımlarda kaynak sonrası mekanik özelliklerin temel malzemeye yakın değerlere ulaşabildiği rapor edilmiştir. Otomotiv endüstrisinde, alüminyum FSW yöntemiyle araç gövdeleri, yakıt tankları ve şasi parçaları birleştirilmektedir. Havacılık ve uzay sektöründe, uçak gövdelerinde kullanılan büyük paneller, FSW yöntemiyle düşük distorsiyon ve yüksek mukavemet sağlayacak biçimde birleştirilmektedir. Ayrıca alüminyum-kompozit veya alüminyum-magnezyum gibi farklı malzeme birleşimleri de hibrit yapılar için FSW ile kaynaklanmaktadır.

Magnezyum ve Hafif Metaller

Magnezyum alaşımları, düşük yoğunlukları ve yüksek özgül mukavemetleri ile otomotiv ve havacılık sektöründe tercih edilmektedir. Ancak bu malzemelerin ergitme kaynaklarında

yaşanan ergime kusurları, FSW ve LFW yöntemlerinin bu alanda yaygınlaşmasına neden olmuştur. Sürtünme kaynağıyla AZ serisi magnezyum alaşımlarında mikroyapı homojenliği artmakta ve mekanik özelliklerde belirgin iyileşme sağlanmaktadır. Otomotiv endüstrisinde, koltuk çerçeveleri, motor bileşenleri ve yapısal parçalar gibi hafif parçalar FSW ile birleştirilmektedir. Savunma sanayii uygulamalarında ise magnezyumun hafifliği, zırh sistemleri ve insansız hava aracı (İHA) bileşenlerinde avantaj sağlamaktadır (Meriç, 2008).

Çelikler ve Yüksek Mukavemetli Alaşımlar

Çelik malzemeler, özellikle yüksek dayanımlı yapılar için RFW ve LFW yöntemleriyle kaynaklanmaktadır. Düşük karbonlu çeliklerde yüksek süneklik sağlanabilirken, alaşımlı ve martensitik çeliklerde mikro yapı dönüşümleri dikkatli kontrol edilmelidir. Yeniden kristalleşmiş bölge ve TMAZ, kaynak performansını doğrudan etkilemektedir. Raylı sistemlerde, tekerlek-mil birleşimleri için RFW yaygın olarak kullanılmakta olup, bu yöntemin hızlı ve yüksek kaliteli birleşim sağlaması tercih nedenidir. Enerji sektöründe, yüksek basınçlı boru hatlarının ve nükleer yakıt çubuklarının birleştirilmesinde sürtünme kaynak yöntemleri kullanılmaktadır. Savunma sanayiinde, zırh taşıyıcı yapılarda yüksek dayanım–düşük ağırlık oranı sunan çelik yapıların kaynağı yine RFW ile yapılmaktadır (Meriç, 2008; Ersözlü, 2006).

Titanyum ve Süperalaşımlar

Titanyum ve nikel bazlı süperalaşımlar, yüksek sıcaklık dayanımları ve korozyon dirençleri nedeniyle havacılık, uzay ve enerji uygulamalarında tercih edilmektedir. Ancak bu alaşımların ergitme kaynaklarındaki zorlukları, sürtünme kaynağı yöntemlerinin bu alanda benimsenmesini sağlamıştır. LFW ile kaynaklanan Ti-

6Al-4V gibi alaşımlarda homojen mikro yapılar ve yüksek mekanik dayanım elde edilmektedir. Havacılık ve uzay sanayii, türbin diskleri, titanyum kanat parçaları gibi karmaşık bileşenlerde LFW'yi tercih etmektedir. Enerji sektörü, özellikle gaz türbinleri ve yüksek sıcaklıkta çalışan boru hatlarında bu alaşımların kaynaklanmasında sürtünme kaynak yöntemlerinden yararlanmaktadır (Ersözlü, 2006, Kırık ve Özdemir, 2012; Meriç, 2008).

Farklı Malzemelerin Birbirine Kaynağı (Dissimilar Welding)

Farklı malzemelerin birleştirilmesi, özellikle hibrit yapılar ve ağırlık optimizasyonu gerektiren sistemler için büyük önem taşımaktadır. Sürtünme kaynağı, bu tür birleşimlerde intermetalik bileşik oluşumunu minimize edebilmesiyle öne çıkmaktadır. Alüminyum-çelik, bakır-alüminyum gibi sistemlerde uygun proses parametreleri ile yüksek kaliteli birleşimler sağlanabilmektedir. Otomotiv endüstrisinde, gövde yapılarında hafif malzeme kullanımını artırmak amacıyla çelik-alüminyum birleşimleri FSW veya RFW ile yapılmaktadır. Savunma sanayiinde, fonksiyonel geçişli yapılarda, hafif ve ağır zırh materyallerinin bir araya getirilmesi için farklı malzeme kaynaklarına başvurulmaktadır. Havacılık uygulamalarında, metal-kompozit geçiş bölgelerinde farklı malzeme birleşimleri, ağırlık-dayanım optimizasyonunu mümkün kılmaktadır. Tablo 3'te farklı malzemelerde sürtünme kaynağının uygulanabilirliği, mikro yapı ve mekanik özelliklerin özetlendiği tablo gösterilmektedir (Paylaşan, 2000).

Tablo 3: Farklı malzemelerde sürtünme kaynağının uygulanabilirliği, mikro yapı ve mekanik özelliklerin özetlendiği tablo

Malzeme Türü	Kaynak Edilebilirlik	Kaynak Bölgesi Mikro yapısı	Mekanik Özellikler	Başlıca Uygulama Alanları
Alüminyum ve Alaşımları	Yüksek	İncelmiş tane yapısı, az çatlak	Yüksek dayanım, iyi süneklik	Havacılık, otomotiv
Magnezyum ve Hafif Metaller	Orta-Yüksek	Dinamik yeniden kristalleşme	Düşük yoğunluk, iyi mukavemet	Elektronik, hafif yapı elemanları
Çelik ve Yüksek Mukavemetli Alaşımlar	Yüksek	Karbon oranına bağlı farklılıklar	Sertlik ve dayanım yüksek	Savunma, ağır makine

Sonuçlar

Bu derleme çalışmasında, sürtünme kaynağı teknikleri; temel prensipleri, yöntem çeşitleri, proses parametreleri ve malzeme ile endüstriyel uygulamaları kapsamlı ve sistematik bir şekilde incelenmiştir. Katı hâl birleştirme yöntemi olan sürtünme kaynağı, düşük ısı etkisi, minimal deformasyonu ve yüksek kaynak kalitesi gibi önemli avantajları nedeniyle geleneksel kaynak yöntemlerine kıyasla üstünlük göstermektedir. Döner, doğrusal ve sürtünme karıştırma kaynak tekniklerinin, farklı uygulama alanlarına özgü avantajları bulunmakta olup, proses parametrelerinin kaynak kalitesine doğrudan ve belirleyici etkileri olduğu literatür bulgularıyla desteklenmiştir.

Malzeme bazlı uygulamalarda, özellikle hafif metaller (alüminyum, magnezyum) ve yüksek mukavemetli alaşımlarda sürtünme kaynağının yüksek performans sergilediği; otomotiv, havacılık, savunma ve enerji sektörlerinde kullanımının giderek arttığı gözlenmiştir. Ayrıca, farklı malzemelerin birleştirilmesinde sağladığı avantajlar sayesinde hibrit ve fonksiyonel geçişli yapılar geliştirilmesine olanak tanıdığı ortaya konmuştur.

Önümüzdeki dönemde, proses parametrelerinin optimizasyonu ve endüstriyel entegrasyon çalışmalarının yoğunlaşması ile sürtünme kaynağı teknolojisinin, daha yaygın ve etkin biçimde kullanılmasının sağlanacağı öngörülmektedir.

Kaynaklar

Özdemir, N. (2002). Tane küçültülmüş düşük alaşımlı yüksek karbonlu çeliklerin sürtünme kaynağı ile birleştirilebilirliğinin araştırılması (Doktora tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Anık, S. (1991). Sürtünme kaynağı (ss. 134–137). Gedik Holding Yayını.

Özdemir, N., & Orhan, N. (2002). Yeni tasarlanmış bir sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinasının imalatı. Mühendis ve Makina, (508), 31–35.

Çelik, İ. (1997). Alüminyum ve bakır çubukların sürtünme kaynağı üzerine bir araştırma (Yüksek lisans tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı).

Ateş, H., & Türker, M. (2003, Ağustos). Laboratuvar boyutlu sürtünme kaynak makinesi tasarımı ve imalatı. In 3. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (ss. 146–153).

Chludzinski, M., Santos, R. E. D., Pissanti, B. R., Kroeff, F. C., Mattei, F., Dalpiaz, G., & Paes, M. T. P. (2019). Full-scale friction welding system for pipeline steels. Journal of Materials Research and Technology, 8(2), 1773–1780. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.10.001>

Ünal, E., Karaca, F., & Sarsılmaz, F. (2019). Investigation of interface microstructure properties of AISI 316L / AISI 4140 steel

couple welded by friction welding process. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34(2), 701–708.

Paylaşan, Ü. (2000). Bronz ve düşük karbonlu çeliğin sürtünme kaynağı ile birleştirilmesi ve parametrelerinin incelenmesi (Yüksek lisans tezi, Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Ersözlü, İ. (2006). Sürtünme kaynak makinasının bilgisayar kontrollü çalıştırılması ve SAE 4140 ve SAE 1050 çeliklerine uygulanması (Yüksek lisans tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı).

Gürleyik, M. Y. (1984, Kasım). Sürtünme kaynağı. In 1. Ulusal Kaynak Sempozyumu Tebliği Özetleri (ss. 13–15). İstanbul.

Alvise, L. D., Masoni, E., & Wallve, S. J. (2002). Finite element modelling of the inertia friction welding process between dissimilar materials. Journal of Materials Processing Technology, 125–126, 387–391. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00318-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00318-4)

Kırık, İ., & Özdemir, N. (2012). PLC kontrollü sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesinin tasarım ve imalatı. In International Conference on Welding Technologies and Exhibition.

Meriç, C., Köksal, N. S., Erdoğan, M. T., & Okur, A. (2008). Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş farklı malzemelerin kaynak bölgesinin incelenmesi. Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 4(2), 135–144.

BÖLÜM 3

KALSIYUM FOSFAT VE BİYOAKTİF CAM TABANLI DENTAL GREFTLER

Büşra GÜNHAN¹

Giriş

Günümüzde modern tıp ve diş hekimliğinin önemli uygulama alanlarından birini teşkil eden greft cerrahisinde kullanılan malzeme türleri, malzeme-doku etkileşimlerinin anlaşılması ve canlı dokuları taklit eden biyomimetik yaklaşımların geliştirilmesi ile oldukça çeşitlenmiştir. Bu çeşitlenme ile hasarlı bölgeye yerleştirilen malzemenin alıcı dokuya entegrasyonundan maksimum verim elde edilmesi, böylece hastanın yaşam standartlarının yükseltilmesi mümkün olabilmektedir.

Kemik greftleri, hasarlı kemik dokusunun iyileşmesini desteklemek veya kayıp kemik dokusunun yerini almak üzere tasarlanmış doğal ve alternatif/sentetik cerrahi malzemeleri kapsayan genel bir tanımdır. Ortopedi, travmatoloji, nöro cerrahi, spinal cerrahi, plastik cerrahi, el cerrahisi, baş ve boyun cerrahisi, maksillofasiyal cerrahi (ağız, diş ve çene cerrahisi) gibi tıp ve diş hekimliği alanlarında aktif olarak tercih edilen kemik greftleri, anatomik, histolojik ve biyokimyasal prensiplere bağlı olarak başarı sağlamaktadır.

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Müh. Böl., Orcid: 0000-0002-0938-8473

Bu bölümde kemik greftlerinin önemli bir alt grubunu oluşturan kalsiyum fosfat ve biyoaktif cam tabanlı dental greft malzemeleri ele alınacaktır. Dental greft malzemelerine değinmeden önce malzeme-doku etkileşimlerinin ve buna bağlı geliştirilen sınıflandırmaların daha iyi anlaşılması amacıyla genel olarak kemik greftlerinden bahsedilecektir.

Kemik Grefti

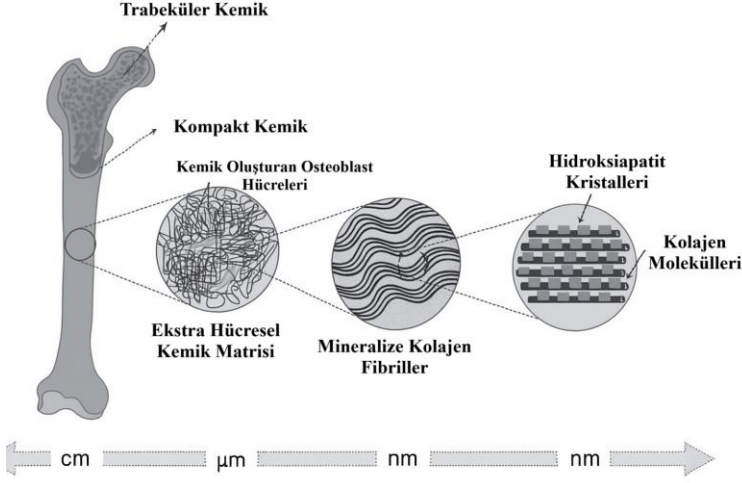
İnsan vücudunda en yaygın kullanılan implant malzemesi olan kemik greftler, ilk olarak 19. yüzyılda ortaya çıkmıştır. 1846'da William Thomas Green Morton'ın anesteziyi uygulaması ve sonrasında Joseph Lister'in cerrahi uygulamalarda gözlenen enfeksiyonları önleyen antiseptikleri geliştirmesi ve en nihayetinde 1895 yılında X-ışınlarının keşfi ile röntgen teknolojisinin geliştirilmesi özellikle Birinci Dünya Savaşı sürecinde cerrahi müdahalelerin niteliğinde çığır açıcı bir ilerleme kaydedilmesini sağlamıştır (Woods & Woods, 2006). Metalurji biliminde kaydedilen gelişmeler ile kemik iyileşmesine dair biyolojik süreçlerin aydınlığa kavuşturulması mümkün hale gelmiş ve düşük bir ivmeyle de olsa bu alanda önemli bir bilgi birikimi oluşmaya başlamıştır. Aslında greft uygulamalarına (transplantasyon-canlı hücre transferi) benzer implantasyon (cansız hücrelerin transferi) örnekleri, antik Mısır Medeniyeti 'ne kadar dayanmaktadır. Kaybedilen uzuvların, ikame rekonstrüksiyonlar ile tamamlanması o dönemde rastlanan uygulamalar arasındadır (Forshaw, 2009). Orta çağda Matteo di Pacino tarafından resmedilen ve Türkçeye *siyah bacak mucizesi* olarak çevirebileceğimiz bir tablo, ilgili dönemde Etiyopyalı bir donöre ait uzvun Justinian isimli kilise hizmetlisine naklini tasvir etmekte ve homoplastik (aynı türden bireyler arasında yapılan doku veya organ nakli) transplantasyon uygulamalarının ilk örneklerinden birini temsil etmektedir. Bu ileride tanımlayacağımız ve allogreft sınıfında yer alan kemik grefti uygulamalarına karşılık gelmektedir. 1600'lü yıllara gelindiğinde Job van Meekeren isimli cerrahın geliştirdiği modern tekniklere rastlansa da bu teknikler herhangi bir sistematikten uzaktır. Köpek kafatasından alınan parçanın yaralı bir askerin kafasına nakledildiği bu uygulama tarihteki ilk heterolog kemik grefti uygulaması olarak değerlendirilmektedir (Hampel vd.,

2022). Bu alanda ilk sistematik tanımlama, I. Dünya Savaşı sırasında cerrah olarak hizmet veren Fred H. Albee tarafından savaşın yeni ittifaklar ve cephelerle genişlediği ve ileride fiziksel, psikolojik ve toplumsal açıdan uzun vadeli yıkıcı etkilere yol açacağı 1915 senesinde yayınladığı “Bone Graft Surgery” isimli elkitabı ile yapılmıştır (Albee, 1996).

Bu noktada kemik greftlerinin tarihsel gelişimini alt türler bazında incelemeden önce, kemik dokusuna dair temel bilgileri paylaşmak ve bu bilgilerden hareketle içerik ve fonksiyona göre greft türlerine değinmek yerinde olacaktır.

Kemik temel olarak hücrelerin, hücreler arası sert bir madde içine gömülü şekilde bulunduğu, sert bir vücut dokusu olarak tanımlanmaktadır (Heaney & Whedon, 2025). Yumuşak dokuların (kas) mekanik hareketleri için yapısal destek sağlayan, yumuşak organ ve dokuları ile özel dokular (kemik iliği vb.) için koruyucu bir ortam oluşturan ve endokrin sistemde dolaşım halindeki vücut sıvılarında bulunan kalsiyum ve fosfat muhteviyatını düzenleyen bir mineral deposu işlevi gören kemik, malzeme bilimi açısından birçok ölçekte farklı düzenlemelere sahip, heterojen, anizotropik ve hiyerarşik bir kompozit malzeme olarak tanımlanmaktadır (Jiang & Liu, 2016). Şekil 1’de kemik ve kemiğin farklı seviyelerdeki hiyerarşik yapısı şematize edilmiştir.

Şekil 1 Kemiğin farklı seviyelerdeki hiyerarşik yapısı



Kaynak: (Leonor vd., 2016)

Kemik, kemik doku, kemik iliği ve bunları çevreleyen bağ doku (periosteum) isimli bileşenlerden oluşmaktadır. Organik bir bileşen olan kolajen lif demetlerinin (organik matriks) içerisinde dağılmış halde inorganik mineral bileşenler (inorganik matriks) bulunmaktadır. Bu mineral bileşenlerin başlıcaları kalsiyum ve fosfattır. Mineraller zaman içerisinde apatite dönüşerek kristalleşir ve amorf yapılarını kaybederler. Saf olmayan hidroksiapatit ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) bahsedilen yapının ana bileşenini temsil eder ve değişen oranlarda kristal formda karbonat, sitrat, magnezyum, flor ve stronsiyum ihtiva eder. (Bloom & Fawcett, 1975; Gokhale vd., 2001; Heaney & Whedon, 2025). Kemiğin yapısı oluşturan bir diğer önemli bileşen osteoblast (kemik hücresi) olarak tanımlanan hücrelerdir. En basit tabirle kemik hücresini oluşturacak öncü hücre olarak ifade edilen osteoblastlar, mevcut görevlerinin yanı sıra kemiğin yeniden şekillenmesi (*ingilizce*: remodelling) sürecinde kemik dokusunun sentezinden ve mineralizasyonundan da sorumludurlar (Heaney & Whedon, 2025).

Kemik greft materyalleri temelde dört ana gruba ayrılmaktadır: (i) otoplast, (ii) allogreft, (iii) ksenogreft ve (iv) alloplast (kemik dışı sentetik biyomalzeme) (Elsinger & Leal, 1996). Mevcut sınıflandırmayı Tablo 1’de görüldüğü gibi alt gruplar ile detaylandırmak mümkündür (Hoexter, 2002). Tüm bu türler

haricinde kompozit kemik greftleri (*ingilizce: composite graft*) olarak isimlendirilen özel greft türleri de bulunmaktadır (Kale vd., 2023). Örneğin, Hung ve ark. CaO-MgO-SiO₂ cam seramik ve CaSO₄ seramikten ürettikleri kompozit alloplast greft ile kemik oluşum hızında önemli bir iyileşme sağlamışlardır (Hung vd., 2024).

Tablo 1 Kemik greftlerinin türlerine göre sınıflandırılması

Otogreft	Kortikal kemik
	Kansellöz kemik
	Kortiko-kansellöz kemik
Allogreft	Taze dondurulmuş kemik
	Dondurulmuş kurutulmuş kemik
	Demineralize dondurulmuş kurutulmuş kemik
Ksenogreft	Demineralize edilmiş kemik
	Proteini çıkarılmış kemik
Alloplast	Doku kaynaklılar
	Metaller
	Jelatin Film
	Polimerler
	Kalsiyum sülfat
	Kalsiyum karbonat
	Kalsiyum fosfat
	Biyoaktif Cam

Kaynak: (Işık, 2008)

Kemik greftlerinin uygulanması neticesinde oluşacak yeni kemik dört farklı mekanizma (iyileşme süreci) ile gelişmektedir: (i) osteointegrasyon, (ii) osteokondüksiyon, (iii) osteoindüksiyon ve (iv) osteogenezis. Greft türleri bazında gözlenen kemik oluşum (iyileşme) mekanizmalarına değinmeden önce ilgili mekanizmaların ne ifade ettiğini belirtmek isabetli olacaktır. *Osteointegrasyon* mekanizmasında greft ile kemik yüzeyi arasında kimyasal bağlanma

meydan gelir. *Osteokondüksiyon* sürecinde greft, yerleştirildiği kemik dokusunun içerisine rezorbe olarak yeni kemik oluşumu için konak hücrelerin büyüyebileceği bir iskele görevi üstlenmektedir. *Osteoindüksiyonda* greft malzemesinin yerleştirildiği çevre dokulardaki kök hücreleri değiştirerek ‘osteogenezis’ sürecini başlattığı gözlenmektedir. Bu süreçte konak kök hücreleri greft uygulanan bölgeye doğru hareket eder ve kök hücreler süreç sonunda osteoblastlara dönüşmek üzere uyarılır. *Osteogenezis* mekanizması, greft uygulandıktan sonra greft malzemesi içerisindeki canlı kemik hücreleri (osteoblastik hücreler veya osteoprogenitör hücreler) vesilesiyle yeni kemiğin şekillenmesi sürecini ifade etmektedir. Bu süreçte ilk olarak kemik matrisi oluşturulur, depolanır ve zaman içerisinde yapının mineralize edilmesiyle yeni kemik dokusu üretimi tamamlanır.

İyileşme sürecinde gözlenen mekanizmalara göre mevcut greft türlerinin sınıflandırılması ise Tablo 2’de verilmiştir. Görüldüğü üzere her bir greft türü birden fazla yeni kemik oluşum mekanizmasını tetiklemektedir.

Tablo 2 Kemik greftine göre iyileşme (yeni kemik oluşumu) mekanizmaları

Graft Türü	İyileşme Sürecinde Gözlenen Mekanizma		
	Osteokondüktif	Osteogenetik	Osteoindüktif
Otograft	+	+	+
Allograft	+	-	+/-
Ksenograft	+	-	+
Alloplast	+	-	-

Kaynak: (Klokkevold & Jovanovic, 2002)

Burada konu akışımıza kısa bir ara verip, iyileşme mekanizmaları ve çeşitli biyomalzeme türleri tarafından oluşturulan doku cevapları arasındaki fark üzerinde duracağız. Böylece esasen doku/implant etkileşiminin bir sonucu olarak ortaya çıkan iyileşme (yeni kemik oluşum) mekanizmalarının ilerleyişini, gelecek başlıklarda yakından inceleyeceğimiz allograftlar açısından daha iyi anlayabileceğiz.

Öncelikle şunun altını çizelim: buradaki amacımız biyomalzeme-biyouyumluluk ekseninde greft uygulaması sonrasında gözlenen iyileşme mekanizmaları ve biyomalzemelerin dokuda oluşturduğu cevabın ele alınmasında biyoloji/tıp disiplini dışındaki okuyucularımız için oluşabilecek kavram karmaşasının önüne geçmek. Yukarıda bahsettiğimiz dört farklı iyileşme mekanizması (osteointegrasyon, osteokondüksiyon, osteoindüksiyon ve osteogenezis), kemik grefti uygulandıktan sonra gelişen ve yeni kemik oluşumuna katkı sağlayan temel biyolojik süreçleri ifade etmektedir. Doku cevabı ise biyomalzemenin maruz kaldığı değişken koşullar karşısında vücudun malzemeye ev sahipliği yapan canlı dokuları tarafından oluşturulan tepkidir ve biyouyumluluğu belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Genel olarak malzeme türüne bağlı olarak gelişen üç temel doku cevabı mevcuttur:

- Toksik malzemeler çevresindeki dokunun ölümüne neden olur.
- Biyoinert malzemeler, etkileşimde olduğu dokuda farklı kalınlıklarda fibröz doku (fibrozis) oluşumuna yol açar.
- Biyoaktif malzemeler ise doku-implant arayüzeyinde bağlanma sağlar.
- Şayet malzeme çözünür bir yapı sergiliyorsa doku, implantın yerini almakta yani implant ile bütünleşmektedir.

İleride bahsedeceğimiz üzere alloplast grubu içerisinde ele alınan kalsiyum fosfat ve biyoaktif cam malzemeler, seramik tabanlı biyomalzeme (biyoseramik) sınıfına dahildir. Biyoseramikler kendilerini çevreleyen dokuda toksik etki oluşturmama özellikleriyle karakterize edilirler. Seramik gözeneksiz, yoğun ve inert (örneğin; alümina ve zirkonya) ise dokuda morfolojik sabitleme (çok ince fibröz doku oluşumu, *ingilizce*: morphological fixation) gözlenmekte, seramiğin gözenekli ve inert (örneğin; hidroksiapatit) olması halinde ise biyolojik sabitleme (gözenek içerisine doku büyümesi, *ingilizce*: biological fixation) görülmektedir. Gözenek içermeyen biyoaktif seramiklerde (örneğin; biyoaktif camlar, cam-seramikler ve hidroksiapatit) izlenen doku cevabı, doku-implant

arayüzeyinde bağlanma (biyoaktif sabitleme, *ingilizce*: bioactive fixation) şeklindedir. Rezorbe olan seramikler (örneğin, trikalsiyum fosfat ve biyoaktif cam) etkileşimde oldukları doku tarafından emilir (Hench, 2013). Tablo 3’te çeşitli biyoseramik malzemelerin vücut içerisinde oluşturdukları doku yanıtları özetlenmiştir.

Tablo 3 Biyoseramiklerin oluşturduğu doku cevapları

Biyoseramik Türü	Doku Cevabı	Örnek
Gözeneksiz, yoğun ve inert seramikler	Çok ince fibröz doku oluşumu (morfolojik sabitleme)	Alümina, zirkonya
Gözenekli, inert seramikler	Gözenek içerisine doku büyümesi (biyolojik sabitleme)	Hidroksiapatit
HA ile kaplanmış metaller Gözeneksiz, biyoaktif seramikler	Doku-implant arayüzey bağlanması (biyoaktif sabitleme)	Biyoaktif camlar Cam-seramikler Hidroksiapatit
Rezorbe olan seramikler	Emilim	Trikalsiyum fosfat, biyoaktif camlar

Doku-implant etkileşiminin bir sonucu olarak iyileşme mekanizmalarını değerlendirecek:

- Osteointegrasyonu dokunun yabancı maddeyi (burada kemik grefti) reddetmeyip stabil bir arayüzey oluşturması neticesinde gözlemleriz. Biyoaktif seramikler bu bağlama örnek gösterilebilir.
- Osteokondüksiyon, dokunun greft malzemesini kabul etmesi ve içine hücre göçü başlatması sonucunda gelişmektedir.
- Osteoindüksiyonda greft malzemesinin biyokimyasal olarak aktif doku ile etkileşme girmesi sonucunda gözlenmektedir.

- Osteogenezis, doğrudan kemik üretimi içeren bu süreçte uygun doku cevabı gereklidir.

Alloplastlar osteokondüktif mekanizma sergilemektedir (Hwang vd., 2012).

Akışa geri dönecek olursak yukarıda detaylı bir şekilde anlattığımız gibi kemik greftlerinin kullanım alanı ve etkinliğini belirleyen en önemli mekanizma doku cevabına bağlı gelişen iyileşme sürecidir.

Kemik greftleri arasında genel bir değerlendirme yapmadan önce ana greft türleri kısaca açıklanacaktır (Ashfaq vd., 2024).

Otogreft: Bu tür greftlerde donör ve konak aynı bireydir. Greft malzemesi uygulama yapılacak bölgeden alınmaktadır.

Allogreft: Aynı tür içinde farklı bir donörden alınıp konağa uygulanan greftlerdir.

Ksenogreft: Herhangi bir türden elde edilen greftin farklı bir türe uygulandığı (en yaygın örnek; hayvandan elde edilen greftin insana uygulanması) ile yani donör ve alıcının farklı tür olduğu durumları kapsayan bir greft türüdür.

Alloplast: Sentetik yolla üretilen greft malzemeleridir. Özellikle maksillofasiyal cerrahide daha çok tercih edilmektedir.

Genel olarak, bahsi geçen türler arasında otogreftlerin osteojenik (kemik yapıcı) potansiyeli dolayısıyla allogreft ve kseneogreftlere nazaran daha avantajlı olduğu, fakat sınırlı miktarda elde edilebilmesi, donör ve konağın aynı birey olması dolayısıyla ağrı ve operasyon süresinin (buna bağlı olarak anestezi süresinin) artması ve donör bölgede görülen hastalık (donör alan morbiditesi) gibi dezavantajlar otogreftlerin kullanımını önemli ölçüde sınırlandırmaktadır (Damien & Parsons, 1991). Ayrıca donörün yaşa bağlı gelişen sağlık sorunları veya bozukluklar da mevcut uygulama için engel teşkil etmektedir (Ferraz, 2023). Allogreftlere uygulanan demineralizasyon işlemi dolayısıyla osteokondüktif özellikleri azalmaktadır. Ayrıca bakteriyel enfeksiyon ve HIV gibi viral hastalıkları taşımaları nedeniyle yüksek risk teşkil etmektedirler (Buck vd., 1989). Ksenogreftler ise yabancı cisim reaksiyonu (*ingilizce*: foreign body reaction, bağışıklık sisteminin yabancı

olarak tanımladığı greft materyaline karşı oluşturduğu immünolojik yanıt) oluştururlar (Bannister & Powell, 2008). Yabancı cisim reaksiyonunu baskılamak amacıyla uygulanan yöntemler ise osteojenik kapasiteyi düşürücü etki yapmaktadır (Işık, 2008).

Alloplastlar diğer greft türlerine nazaran oldukça avantajlı konumdadır. Herhangi bir donör gerektirmemeleri ve istenilen miktar ve büyüklükte üretilebilmeleri gibi özellikleriyle ön plana çıkan bu greft grubunda malzeme türüne bağlı olarak sadece ostekondüksiyon mekanizması görülmekte, bazı durumlarda ise yabancı cisim reaksiyonu tespit edilmektedir. Bu olumsuzluklara karşın alloplastik malzemelerin kimyasal bileşim, biyokararlılık ve mekanik özellikleri bu malzemelerin başarısında önemli bir rol oynamaktadır. Alloplastların önemli bir diğer özelliği de enfeksiyon riskinin bazen oldukça düşük, çoğu durumda da hiç olmamasıdır (Ashfaq vd., 2024).

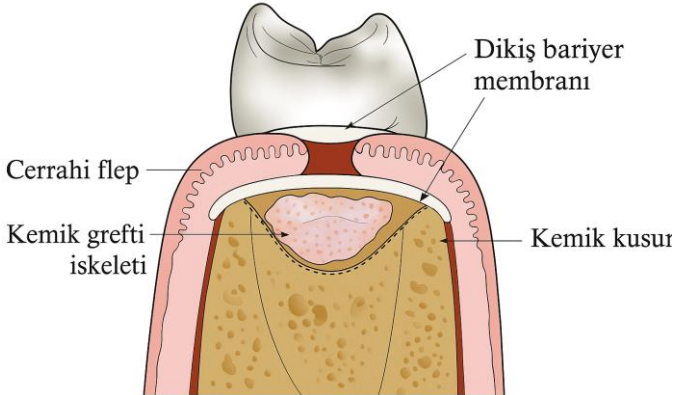
Dental Graft

Önceki konuş başlığında kemik greftlerinin ortopediden maksillofasiyal cerrahiye uzanan oldukça geniş bir skalada kullanıldığından bahsetmiştik. Yaygın bir şekilde kullanıldıkları bir diğer alan da periodontal cerrahidir. Diş implantları temel olarak iki kısımda incelenir. Bunlardan ilki subperiosteal yani periost altına yerleştirilen implantlar, ikincisi ise endosteal yani kemik içi implantlardır. Plaka tipi ve kök tipi olmak üzere iki farklı şekilde olabilen endosteal implantların uygulanması, periodontal rejenerasyon sürecini de beraberinde getirir. Periodonsiyum; dişeti, alveol kemiği, periodontal ligament ve sementten oluşan, diş destekleyen bir yapı bütünü olarak tanımlanmaktadır. Periodontal hastalıklar nedeniyle periodonsiyumun hasara uğraması sonucu gerçekleştirilen tedaviler neticesinde bir miktar diş eti çekilmesi, cep derinliğinde azalma gibi çeşitli problemler gözlenmiş ve bunların periodontal rejenerasyonla giderilebileceği öngörülmüştür. Periodontal cerrahide, kemik grefti denince, tedavi amacıyla periodontal kemik defektinin içine yerleştirilen maddeler anlaşılmaktadır. Bu maddelerin, dokunun osteojenik sürecine herhangi bir şekilde katkıda bulunmaları gerekmektedir.

Tarihi gelişim sürecine baktığımızda dental alloplastların öncülleri, alevolar kemik grefti uygulamalarıdır. Damak-dudak yarığı gibi kusurların ilk olarak M.Ö. 400 civarında Hipokrat döneminde ve M.S. 150’de Galen döneminde gerçekleştirildiği kaydedilmiştir. Cerrahi tekniklerin gelişmesiyle birlikte dudak-damak yarığı tedavisinde erken dönem raporlar sıklıkla rastlanır. Aleveole kemik grefti uygulanan ilk kayıtlar von Eiselsberg’e aittir. 1914 yılına gelindiğinde ise Drächter alevolar bir kemik üzerinde ilk başarılı kemik grefti uygulamasını raporlamıştır (Coots, 2012). Kemik greftlerinin periodontal cerrahide kullanılması, Macar hekim Zoltan Hegedüs ile 1923’te başlamıştır. Hegedüs periodontal hastalığa bağlı kemik kayıplarını önceleri ağız içi kaynaklı otojen kemik greftleri ile tedavi etmiştir. Sonraları ağız dışı kemik kaynaklarına da yönelmiş ve bir hastasını, yüzeyinde periostu da bulunan otojen tibial kemik parçası ile tedavi etmiştir (Hegedus, 1923).

Şekil 2’de alveolar kemikteki bir kemik defekti içine yerleştirilen kemik grefti iskelesi (*ingilizce*: bone graft scaffold) örneği görülmektedir (Zhao vd., 2021).

Şekil 2 Alevolar kemiğe yerleştirilen kemik grefti örneği



Kaynak: (Zhao vd., 2021)

Önceki bölümde kemik greftinin yerleştirildiği dokuya mekanik destek sağlama ve osteorejenerasyon (kemik yenilenmesi) görevlerini yerine getirebilmesi için gözlenmesi muhtemel dört

biyolojik süreçten bahsetmiş ve alloplastlarda gözlenen *osteokondüksiyon* sürecinde konak kök hücrelerinin greft bölgesine hareket ettiğini öğrenmiştik. Bu mekanizmada greft uygulanan bölgede bulunan yerel protein ve diğer faktörler [trombosit kaynaklı büyüme faktörleri (PDGF), fibroblast büyüme faktörleri (FGF), transforme edici büyüme faktörleri (TGF-β)] kök hücrelerin osteoblastlara dönüşmesini sağlıyor. Genel olarak tüm greft materyalleri osteorejeneratif süreçlerin gerçekleşebilmesi için yapısal bir iskele (*ingilizce*: scaffold) görevi üstleniyor; fakat iyileşme mekanizması greft temelinde bir veya birden fazla biyolojik mekanizma ile sağlanıyor. Peki alloplastlar sadece osteokondüksiyon göstermesine karşın, birden fazla mekanizma gözlenen greftlere nazaran nasıl avantajlı olmaya devam edebiliyor? Alloplastlar genellikle inert malzemeler. Bu nedenle uygulandıkları bölgede hemen hemen hiç osteoindüktif mekanizma gelişmiyor. Kullanım özelliklerini iyileştirmek amacıyla çeşitli taşıyıcılar ve *osteoindüksiyon* mekanizmasını tetiklemek için de biyoaktif proteinler ile kombine ediliyorlar (Precheur, 2007). Böylece uygulama açısından arzu edilen sonuçlara ulaşılması mümkün olabiliyor.

Şimdi alloplastlar bazında özelleşip biraz daha derine ineceğiz. Kemik grefti başlığında değindiğimiz üzere birçok farklı türde alloplast mevcut. Bunlardan seramik malzeme grubuna giren kalsiyum fosfat $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ türevleri ve biyoaktif camlar oldukça dikkat çekicidir. Özellikle kalsiyum fosfat türevlerinin özel bir türü olan hidroksiapatit (HA) kemiğin inorganik fazına olan benzerliği konusunda önemli avantajlar sunmaktadır. Şimdi bu iki malzemeyi daha detaylı bir şekilde ele alacağız.

Kalsiyum Fosfat

Kalsiyum fosfat (CaP) genellikle “çimento” formunda uygulanmaktadır. Kalıplanabilir olma ve yerinde sertleşme yetenekleri nedeniyle esnek bir uygulama sağlayan bu alloplastlar, kemik doku mühendisliği için oldukça kullanışlı bir malzeme olarak değerlendirilmektedir (Hench, 2013).

Kimyasal olarak H_2SO_4^- , H_2PO_4^- veya PO_4^{-3} iyonlarını içeren bileşikler, kalsiyum fosfat bileşiği olarak adlandırılmaktadır. Bu bileşim, diş ve kemiklerdeki inorganik mineral fazın benzeridir. Söz konusu benzerlik bu malzemeleri dental uygulamalar için biçilmiş kaftan haline getirmektedir. Tablo 4 çeşitli CaP bileşiklerini ve öne çıkan özelliklerini özetlemektedir.

Tablo 4 Kalsiyum fosfat bileşikleri

İsim ve Kısaltma	Kimyasal Formül	Ca/P oranı	Yoğunluk (g/cm^3)	Oda sıcaklığında çözünürlük (mg/L)
Amorf Kalsiyum Fosfat (ACP)	-	1,5	3,01	25,6-32,8
Hidroksiapatit (HA)	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$	1,67	3,16	~0,3
Kalsiyum eksik Hidroksiapatit (Calcium-deficient HA-CDHA)	$\text{Ca}_{10-x}(\text{HPO}_4)_x(\text{PO}_4)_{6-x}(\text{OH})_{2-x}$	1,5-1,67	3,16	~9,4
Dikalsiyum Fosfat (DCPA)	CaHPO_4	1	2,92	~48
Dikalsium Fosfat Dihidrat (DCPD)	$\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	1	2,27	~88
Monokalsiyum Fosfat Monohidrat (MCPM)	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	0,5	2,23	~18,000
Oktakalsiyum Fosfat (OCP)	$\text{Ca}_8(\text{HPO}_4)_2(\text{PO}_4)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	1,33	2,61	~8,1
α -Trikalsiyum Fosfat (α -TCP)	$\alpha\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	1,5	2,86	~2,5

β -Trikalsiyum Fosfat (β -TCP)	β -Ca ₃ (PO ₄) ₂	1,5	3,07	~0,5
Tetrakalsiyum Fosfat (TTCP)	Ca ₄ (PO ₄) ₂ O	2,0	3,05	~0,7

Kaynak: (Kucko vd., 2019)

Tablo 3’de görülen alternatifler arasında ticari olarak en çok HA ve β -TCP tercih edilmektedir. Tabloda verilen özellikler arasında en önemlisi CaP bileşiklerinin çözünürlüğüdür. Çözünürlük ilgili biyoseramiğin in vivo ortamlardaki davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Bozunma hızı ve buna bağlı olarak gelişen yeni kemik oluşumu gibi özellikler de doğrudan kimyasal çözünebilirlik ile ilişkilidir. Nötr pH’a sahip ortamlarda CaP bozunma hızı, en hızlı çözünürden an az çözünür türe göre şu şekilde sıralanmaktadır: MCPM>TTCP> α -TCP>DCPD>DCPA>OCP> β -TCP>CDHA>HA (Kucko vd., 2019).

1970 ve 1980’li yıllarda yoğun ya da gözenekli blok veya granül formunda üretilen kalsiyum fosfat türevleri, dental cerrahide ağırlıklı olarak alevolar kemik ogmentasyonu ve periodontal kemik defekleri için dolgu malzemesi olarak kullanılmıştır (Kucko vd., 2019).

HA oluşumu sıvı ortamda 900°C’nin altındaki sıcaklıklarda gerçekleşirken, β -TCP oluşumu için kuru ortam ve yüksek sıcaklıklar gereklidir. CaP seramiklerin yukarıda söz edilen her iki formu da yüksek biyouyumluluğa sahiptir (Pasinli & Aksoy, 2010).

Burada hidroksiapatite öneminden dolayı özel bir başlık açacağız.

Hidroksiapatit (HA)

Apatit grubuna ait bir mineral olan hidroksiapatitin, etimolojik kökeni *apatê* sözcüğüne dayanmaktadır. Aldatma veya hile anlamına gelen bu sözcüğün hidroksiapatitin şekli ve rengindeki çeşitlilikten dolayı verildiği düşünülmektedir. Apatitin iki temel kaynağı bulunmaktadır: (i) mineral yatakları ve (ii) biyolojik kaynak. Biyolojik apatitler, saf hidroksiapatitten kompozisyon, kristal boyu, morfolojisi ve stokiyometrik bakımdan farklılıklar göstermektedirler. Saf hidroksiapatitteki Ca/P molar oranı 1,67 iken

insan diş minesindeki biyolojik hidroksiapatit için bu oran 1,62 veya 1,64'tür. Kemik apatitleri için Ca/P oranı ilerleyen yaş ile artmasına karşın genel olarak biyolojik apatitler stokiometrik olmayan ya da eksik Ca içeren apatitler olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca biyolojik apatitler eksik kalsiyumlu olmalarının yanı sıra karbonat içermektedirler. Bu nedenle, biyolojik apatitlerin hidroksiapatit yerine karbonat apatit olarak adlandırılmaları daha doğru kabul edilmektedir.

İnsan vücudunda dentin, tırnak ve kemikte bulunan apatit, yaygın olarak hidrotermal sentez yöntemiyle üretilmektedir. Mevcut yöntem ek olarak çöktürme veya hidroliz yöntemleriyle de üretilebilmekte ve 950-1300°C arasında sinterlenmesiyle nihai üretim tamamlanmaktadır (Park, 2008). Tablo 5'te hidroksiapatit üretiminde kullanılan yöntemler detaylı bir şekilde listelenmiştir.

Tablo 5 Hidroksiapatit Üretim Yöntemleri

Üretim Yöntemi	Başlangıç Kimyasalları	Ortam
Katı-hal reaksiyonu	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + \text{CaCO}_3$	900-1300°C, su buharı akışı eşliğinde
Yaş kimyasal yöntem	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_3\text{PO}_4$	Oda sıcaklığı-100°C pH:7-12
Hidrotermal sentez	Yaş kimyasal teknikle hazırlanmış HA, diğer kalsiyum fosfatlar, çekirdeklenme	100-200°C (1-2 MPa) 300-600 (1-2 kbar)
Jel büyütme yöntemi	$\text{Jel} + \text{Ca}^{+2} + \text{PO}_4^{-3}$	Oda Sıcaklığı~60°C pH:7-10
Ergitme büyütme yöntemi	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + \text{PO}_4^{-3}$ $\text{CaF}_2, \text{CaCl}_2$	1650°C
Akışkan büyütme yöntemi	$\text{CaF}_2, \text{CaCl}_2$, akışkan olarak $\text{Ca}(\text{OH})_2$	1325°C

Kaynak: (Park, 2008)

Hidroksiapatit, Tablo 4'te özetlenen yöntemlerin yanı sıra deniz/okyanus mercanlarından elde edilebilmektedir. Mercan, kireçtaşı yapısında iskelete sahip bir deniz omurgasızıdır ve

gözenekli bir yapı sergiler. Koral karbonat saf hidroksiapatite basit bir teknikle dönüştürülerek, mercanın kendine özgü yapısı kimyasal reaksiyon süresince herhangi bir değişikliğe uğramadan korunur. Reaksiyon sonucunda elde edilen gözenekli hidroksiapatitin bünyesinde barındırdığı organik malzemelerin uzaklaştırılması için arıtma işlemi gerçekleştirilir. Bu implantlar 1982'den itibaren klinik uygulamalarda kullanılmaktadır (Erdoğan, 1991).

Hidroksiapatit, kemiğin doğal yapısındaki kalsiyum ve fosfat iyonlarından oluştuğu için implante edildiği kemik dokusu ile kalsiyum ve fosfat alışverişi yaparak ortamdaki sıvı ve katı dengesine katılabilir. Hidroksiapatit yapı bakımından (i) gözenekli ve (ii) gözeneksiz olmak üzere ikiye ayrılır. *Gözeneksiz HA*, oksidasyonla elde edilen hidroksiapatit partiküllerinin 1100-1300°C arasında değişen yüksek sıcaklıklarda sinterlenmesi ile elde edilen yoğun formdur. Yükleme olmayan yerlerde kemik defekti tamirinde, alveolar kemiğin korunması amacıyla kullanıldığı raporlanmıştır. *Gözenekli HA* ise kalsiyum fosfat tuzlarının uygun boyutlardaki partiküllerinin birleştirilmesi ile elde edilir. Gözenekli bir yapı oluşturulmasındaki amaç kemik gelişiminin implant içine doğru gerçekleşmesidir. Gözeneksiz hidroksiapatite nazaran daha kolay kırılabilir. Alveolar kret yükseltilmesinde, periodontal ve cerrahi defektlerin onarımında kullanılmaktadır (Erdoğan, 1991; Pasinli & Aksoy, 2010).

Kalsiyum fosfat grubunda bir diğer önemli alternatif trikalsiyum fosfattır. HA, kemik mineraline nazaran daha fazla kristal içerdiğinden kimyasal olarak daha karardır; yani biyolojik olarak parçalanmaz. Bu nedenle vücut tarafından emilemez, diğer bir deyişle rezorpsiyon gerçekleşmez. Rezorpsiyonun gerçekleşmemesi halinde kemik hasarları görülme ve kemik kırığı riski artar. β -TCP ise HA'in aksine yüksek rezorpsiyon kabiliyeti dolayısıyla yeni kemikle kolaylıkla yer değiştirir. Takip eden başlıkta trikalsiyum fosfatı (TCP) daha yakından inceleyeceğiz.

Trikalsiyum Fosfat (TCP)

Trikalsiyum fosfat Tablo 3'te görüldüğü üzere iki farklı formda bulunmaktadır. Göreceli olarak hangi fazın tercih edileceğini

uygulama biçimi belirlemektedir. α -TCP, β -TCP fazına kıyasla daha hızlı rezorpsiyona uğradığından enjekte edilebilir çimento formülasyonlarında (örneğin; periodontal cep dolguları) kullanıma daha uygundur. Ayrıca α -TCP fazının yabancı cisim reaksiyonuna yol açtığı da önemli bir dezavantaj olarak kaydedilmiştir. Daha çok yapısal destek gerektiren blok (iskele) formundaki uygulamaların tercih edilmesi durumunda ise daha yavaş rezorbe olarak kemik hacmini koruyan β -TCP ön plana çıkmaktadır (Merten, Wiltfang, Grohmann, & Hoenig, 2001; Yamada, Shiota, Yamashita, & Kasugai, 2007)

Yukarıda β -TCP'in rezorbe olabildiğinden ve yeni kemik oluşumunu desteklediğinden bahsetmiştik. Buna ek olarak çözünürlüğü, kemik mineraline oldukça yakındır ve fizyolojik koşullarda çözünmez. Osteoklast hücrelerinin β -TCP'in bölgesel çözünmesi için asitleşme sağlaması sayesinde β -TCP rezorbe edilir kabiliyet kazanmaktadır; fakat gözenekli yapının kırılğan olması nedeniyle rezorpsiyon arzu edilenden daha hızlı gerçekleşmektedir (Roca-Millan vd., 2022). Bu dezavantajın haricinde β -TCP'nin yüksek osteoindüktif karakter sergilediği de kaydedilmiştir ki bu mekanizma alloplastlarda nadiren gözlenir ve önemli bir avantaj olarak değerlendirilmektedir (Bohner, Santoni, & Döbelin, 2020).

β -TCP, dişçilikte periodontal defekt (dişeti hastalığına bağlı kemik kaybı) tedavisi, apeks kapanması (*ingilizce*: apical closure), diş çekim boşluğunun doldurulması, çenenin rekonstrüktif cerrahisi ve sinüs tabanı yükseltilmesi (*ingilizce*: sinüs lift/floor augmentation) gibi uygulamalarda kullanılmaktadır (Bohner vd., 2020). Fakat, dental cerrahi açısından değerlendirildiğinde β -TCP kullanımı, hidroksiapatit içeren formülasyonlara kıyasla oldukça sınırlı kalmaktadır. Bunun temel nedeni, β -TCP'nin hızlı absorbe olmasıdır. Yani malzemenin çözünerek ilgili doku tarafından emilmesi (degradasyon) süreci oldukça hızlı gelişmektedir. Bu durumda greft yeni kemik hücresi gelişene kadar dayanamamaktadır. β -TCP'in biyouyumluluğundan ödün vermeksizin çözünürlük ve rezorpsiyon özelliklerini iyileştirebilmek amacıyla çeşitli katkılar kullanılmıştır. Kullanılan katkıların seçiminde antimikrobiyal veya osteojenik özelliklerin optimize edilmesi gibi amaçlar gözetilmiştir (Fadeeva vd., 2017; Kannan, Goetz-Neunhoffer, Neubauer, &

Ferreira, 2009; S. Liu vd., 2015; Mayer, Cuisinier, Gdalya, & Popov, 2008; Rau vd., 2019; Spaeth, Goetz-Neunhoeffler, & Hurle, 2020; Torres vd., 2014). Katkılanan katyonlar arasında gümüş (Ag), bakır (Cu), Li (lityum) ve Zn (çinko) dikkat çekmektedir. Fakat mevcut çabalar, iyon katkılı β -TCP özelinde hedeflenen terapötik iddia çerçevesinde geliştirici firmalara ilave yasal yükümlülükler getirmektedir. Bu nedenle bahse konu olan yaklaşım henüz ticarileşmemiştir (Bohner vd., 2020).

Bu alanda bir diğer yaklaşım, yüksek saflıktaki β -TCP'ın yüzeyi modifiye edilmiş alternatiflerinin kullanımıdır. Örneğin; Choi ve ark. gerçekleştirdikleri çalışmada nanokristal bir kaplama ile yüzeyi modifiye edilen β -TCP iskeleler (Neo Bone®) kullanarak rezorpsiyon sürecini yeni hücre oluşumu sonrasına öteleyebilmişlerdir. (Choi, Chang, Kim, Lee, & Lee, 2023).

Biyoaktif Cam

Biyoaktif camı açıklamadan önce *biyoaktif sabitleme* konseptini açıklamak faydalı olacaktır. Bir malzemenin biyoaktif olarak tanımlanabilmesi için (i) ilgili tepkimelerin malzeme ile doku arayüzeyinde gerçekleşmesi ve (ii) etkileşim neticesinde malzeme-doku arasında bağ oluşumu ile sonuçlanan özgül bir biyolojik yanıt gelişmesi gerekmektedir.

İlk biyoaktif cam, 1971 senesinde Larry Hench tarafından 45S5® Bioglass ticari ismiyle piyasaya sürülmüştür (Hench, 2013; Skallevoid, Rokaya, Khurshid, & Zafar, 2019; Tulyaganov vd., 2024). Tablo 5'te biyoaktif cam ve çeşitli cam seramiklerin bileşim oranları ve öne çıkan özellikleri verilmiştir (Hench, 2016).

Tablo 5 Medikal ve dental uygulamalarda kullanılan biyoaktif cam ve cam-seramiklerin kompozisyon ve özellikleri

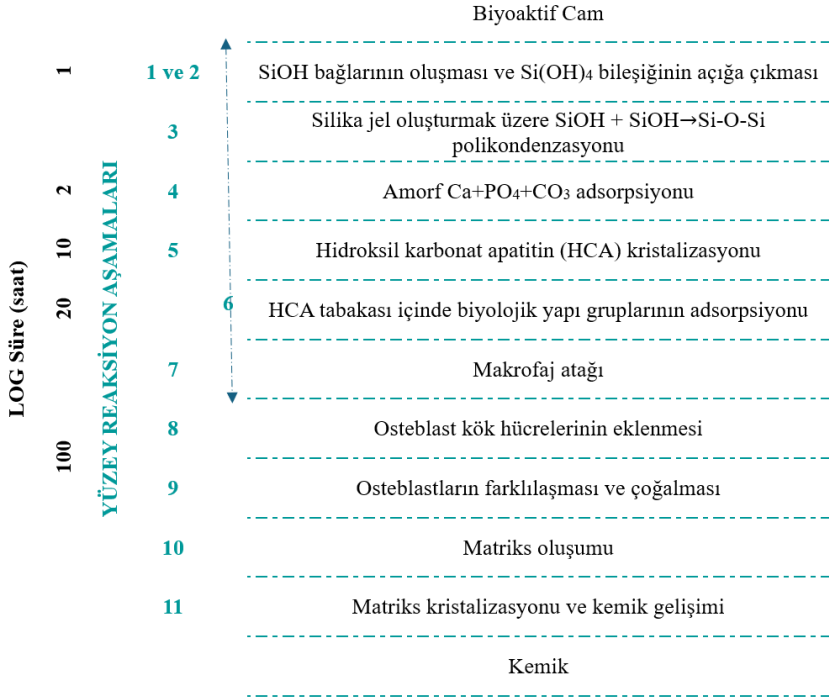
Kompozisyon	45S5 Bioglass (Novabone)	S53P4 (AmbiDent1)	A/W cam-seramik (cerabone)
Na ₂ O	24,5	23	0
CaO	24,5	20	44,7
CaF ₂	0	0	0,5

MgO	0	0	4,6
P ₂ O ₅	6	4	16,2
SiO ₂	45	53	34
Fazlar	Cam	Cam	Apatit Beta-wollastonit camı
Biyoaktivite sınıfı	A*	A	B

Kaynak: (Hench, 2016)

Silikat esaslı biyoaktif camın canlı doku ile etkileşim sürecinde Şekil 4'te görülen 11 basamaklı bir dizi yer almaktadır. 1-5 arasındaki adımlarda cam yüzeyinde hidroksiapatit benzeri bir tabaka oluşmaktadır. Aslında biyoaktif cama atfedilen “biyoaktif” tanımı, çözünme esnasında yüzeyde oluşan HA benzeri tabaka ve in vitro/in vivo testler esnasında gözlenen biyolojik olarak aktif iyon salınım mekanizması ile doğrudan ilişkilidir (Tulyaganov vd., 2024).

Şekil 4 45S5 biyoaktif cam ile arayüzeyde kemik oluşumunu sağlayan reaksiyon basamakları ve hızları



Kaynak: (Hench, 2016)

Tablo 3'te görüldüğü üzere biyoaktif camlar, biyoaktif sabitleme, emilme gibi doku cevapları oluşturabilmekte, bu nedenle de hem osteokondüktif hem de osteoindüktif iyileşme mekanizmaları sergilemektedir (Tulyaganov vd., 2024).

Üretim geleneksel cam üretimi ile aynıdır. Bunun haricinde sol-jel tekniği de uygulanabilir. Kirliliğin önlenmesi amacıyla yüksek saflıkta hammaddeler tercih edilir veya saflaştırma işlemi uygulanır. Hammaddeler reçeteye uygun miktarda tartılarak harman hazırlanır. Harmanın ergitilmesi (1300-1450°C) sonrasında homojenizasyon gerçekleştirilir. Bu süreçleri şekillendirme izler. Tüm bu adımlarda safsızlıkların bünyeye girmesi veya Na₂O ve P₂O₅ gibi uçucu bileşenlerin kaybı önlenmeye çalışılır. Şekillendirme esnasında grafit veya çelik kalıplara döküm yapılır yahut şekillendirme enjeksiyon kalıplama ile gerçekleştirilir. Tavlama işlemi kritik öneme sahiptir ve biyoaktif camların ısıl genleşme katsayısı yüksek olduğundan 450-550°C aralığında yapılmalıdır. Şayet greft granül

veya toz formda isteniyorsa ergiyik cam, suya veya havaya dökülüp hızlıca soğutulur. Ardından öğütülerek arzu edilen tane boyutuna indirgenir (Hench, 2013). Biyoaktif camın biyoaktivitesi, yapı ve bileşim, üretim yöntemi ve iyon çözünme hızı gibi faktöre bağlıdır. En yüksek biyoaktiviteye sahip camlar, daha yüksek çözünme hızı ve dolayısıyla daha hızlı apatit oluşumu sağlayan camlar olarak değerlendirilmesi doğru olacaktır (Skallevold vd., 2019)

Biyoaktif camlar, dental defekt (ağız ve diş bölgesindeki genel doku kaybı), kayıp diş, dentin hassasiyeti, kanal tedavisi, alevol kret augmentasyonu, sinüs yükseltme işlemi ve periodontal doku onarımı gibi dental uygulamalarda tercih edilmektedir (Hench, 2013; Skallevold vd., 2019).

Son yıllarda biyoaktif cam greft uygulamalarını konu alan araştırma sayısının ciddi artış gözlenmiştir. Örneğin; Na içermeyen biyoaktif camların geliştirilmesi ile cam ağ yapısını bozan sodyum gibi bileşenlerin dezavantajları elimine edilmiş ve yerine antimikrobiyal özellikleri arttırmak amacıyla Si, P, Sr, Cu, Ag, F, Zn ve F gibi çeşitli elementler ilave edilerek malzeme optimize edilmiştir (Besinis, Peralta, & Handy, 2014; Rodriguez, Alhalawani, Arshad, & Towler, 2018; Skallevold vd., 2019).

Genel Değerlendirme ve Geleceğe Bakış

Sonuç olarak, kalsiyum fosfat greftler ve biyoaktif camlar, kemik rejenerasyonu ve diş hekimliği uygulamaları başta olmak üzere geniş bir yelpazede umut vadeden biyoseramikler olarak ön plana çıkmaktadır. Kalsiyum fosfatların biyoyumlu, osteokondüktif ve kimi formlarda osteoindüktif özellikleri, onları kemik dokusu ile yüksek düzeyde etkileşime giren greft alternatifleri haline getirirken; biyoaktif camların yüzey reaktivitesi, iyon salınımına bağlı antimikrobiyal etkileri ve apatit oluşturarak doğal doku ile kimyasal bağ kurma yeteneği, bahsi geçen malzemeleri diğer greft türleri arasında ileri düzey bir seçenek haline getirmiştir. Gelecekte bu iki malzeme grubunun bir arada kullanıldığı hibrit sistemlerin geliştirilmesiyle hem biyomekanik dayanımın hem de biyolojik etkinliğin daha üst seviyelere taşınması mümkün olacaktır. Bu doğrultuda, malzeme bilimi, biyoloji ve sağlık bilimlerini buluşturan

disiplinler arası çalışmalar, doku mühendisliğinde yeni nesil rejeneratif çözümlere öncülük etmeye devam edecektir.

Kaynakça

Albee, F. H. (1996). Bone-Graft Surgery. Clinical Orthopaedics and Related Research, 324, 5-12. <https://doi.org/10.1097/00003086-199603000-00002>

Ashfaq, R., Kovács, A., Berkó, S., & Budai-Szűcs, M. (2024). Developments in Alloplastic Bone Grafts and Barrier Membrane Biomaterials for Periodontal Guided Tissue and Bone Regeneration Therapy. International Journal of Molecular Sciences, 25(14). <https://doi.org/10.3390/ijms25147746>

Bannister, S. R., & Powell, C. A. (2008). Foreign Body Reaction to Anorganic Bovine Bone and Autogenous Bone With Platelet-Rich Plasma in Guided Bone Regeneration. Journal of Periodontology, 79(6), 1116-1120. <https://doi.org/https://doi.org/10.1902/jop.2008.060475>

Besinis, A., Peralta, T. De, & Handy, R. D. (2014). The antibacterial effects of silver, titanium dioxide and silica dioxide nanoparticles compared to the dental disinfectant chlorhexidine on Streptococcus mutans using a suite of bioassays. Nanotoxicology, 8(1), 1-16. <https://doi.org/10.3109/17435390.2012.742935>

Bloom, W., & Fawcett, D. W. (1975). A Textbook of Histology. Saunders. Geliş tarihi gönderen <https://books.google.com.tr/books?id=hahqAAAAMAAJ>

Bohner, M., Santoni, B. L. G., & Dbelin, N. (2020). ̢-tricalcium phosphate for bone substitution: Synthesis and properties. Acta Biomaterialia, 113, 23-41. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.06.022>

Buck, B., Malinin, T., & Brown, M. (1989). Bone transplantation and human immunodeficiency virus. An estimate of risk of acquired immunodeficiency syndrome (AIDS). *Clinical Orthopaedics and Related Research*, (240), 129-136.

Choi, Y.-J., Chang, H.-J., Kim, M. J., Lee, J.-H., & Lee, B.-K. (2023). Efficacy of pure beta tricalcium phosphate graft in dentoalveolar surgery: a retrospective evaluation based on serial radiographic images. *Maxillofacial Plastic and Reconstructive Surgery*, 45(1), 25. <https://doi.org/10.1186/s40902-023-00390-w>

Coots, B. K. (2012). Alveolar Bone Grafting: Past, Present, and New Horizons. *Seminars in Plastic Surgery*, 26(04), 178-183. <https://doi.org/10.1055/s-0033-1333887>

Damien, C. J., & Parsons, J. R. (1991). Bone graft and bone graft substitutes: A review of current technology and applications. *Journal of Applied Biomaterials*, 2(3), 187-208. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jab.770020307>

Elsinger, E. C., & Leal, L. (1996). Coralline hydroxyapatite bone graft substitutes. *The Journal of Foot and Ankle Surgery*, 35(5), 396-399. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1067-2516\(96\)80058-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1067-2516(96)80058-5)

Erdoğan, F. (1991). İnsan ve Hayvan Kemiklerinden Elde Edilen Biyolojik Kaynaklı Hidroksiapatitin Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerinin Sentetik Hidroksiapatit ile Karşılaştırılması (Uzmanlık Tezi). İstanbul: İstanbul Üniversitesi.

Fadeeva, I. V., Gafurov, M. R., Kiiaeva, I. A., Orlinskii, S. B., Kuznetsova, L. M., Filippov, Ya. Yu., ... Barinov, S. M. (2017). Tricalcium Phosphate Ceramics Doped with Silver, Copper, Zinc, and Iron (III) Ions in Concentrations of Less Than 0.5 wt.% for Bone Tissue Regeneration. *BioNanoScience*, 7(2), 434-438. <https://doi.org/10.1007/s12668-016-0386-7>

Ferraz, M. P. (2023). Bone Grafts in Dental Medicine: An Overview of Autografts, Allografts and Synthetic Materials. *Materials*, 16(11). <https://doi.org/10.3390/ma16114117>

Forshaw, R. J. (2009). The practice of dentistry in ancient Egypt. *British Dental Journal*, 206(9), 481-486. <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.2009.355>

Gokhale, J. A., Boskey, A. L., & Robey, P. G. (2001). Chapter 4 - The Biochemistry of Bone. İçinde R. Marcus, D. Feldman, & J. Kelsey (Ed.), *Osteoporosis (Second Edition)* (ss. 107-188). San Diego: Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-012470862-4/50005-2>

Hampel, G. A., Yilmaz, E., Massrey, C., Clifton, W., Iwanaga, J., Loukas, M., & Tubbs, R. S. (2022). History of Bone Grafts in Spine Surgery. *Cureus*. <https://doi.org/10.7759/cureus.24655>

Heaney, R. P., & Whedon, G. D. (2025, Mayıs). Bone. *Encyclopedia Britannica*. Geliş tarihi gönderen <https://www.britannica.com/science/bone-anatomy>

Hegedus, Z. (1923). The rebuilding of the alveolar processes by bone transplantation. *Den. Cosmos*, 736-742.

Hench, L. L. (2013). *An Introduction to Bioceramics (2nd bs)*. IMPERIAL COLLEGE PRESS. <https://doi.org/10.1142/p884>

Hench, L. L. (2016). Bioactive Glass Bone Grafts: History and Clinical Applications. İçinde I. V. Antoniac (Ed.), *Handbook of Bioceramics and Biocomposites* (ss. 23-33). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12460-5_5

Hoexter, D. L. (2002). Bone Regeneration Graft Materials. *Journal of Oral Implantology*, 28(6), 290-294. [https://doi.org/10.1563/1548-1336\(2002\)028<0290:BRGM>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1563/1548-1336(2002)028<0290:BRGM>2.3.CO;2)

Hung, G.-Y., Wang, C.-Y., Hsiao, H.-Y., Tu, C.-S., Mana-ay, H., Chen, C.-T., ... Chen, P.-Y. (2024). Composite bone graft of CaO–MgO–SiO₂ glass–ceramics and CaSO₄ ceramics for boosting bone formation rate. *J. Mater. Chem. B*, 12(26), 6394-6409. <https://doi.org/10.1039/D4TB00262H>

Hwang, J.-W., Park, J.-S., Lee, J.-S., Jung, U.-W., Kim, C.-S., Cho, K.-S., ... Choi, S.-H. (2012). Comparative evaluation of three calcium phosphate synthetic block bone graft materials for bone regeneration in rabbit calvaria. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 100B(8), 2044-2052. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jbm.b.32768>

Işık, D. (2008, Haziran 20). ER,CR:YSGG Lazer ve Cerrahi Frezle Oluşturulan Kemik Defektlerinde Kemik Morfogenetik Protein (BMP) VE Graft Materyali (B-TCP+HA) Uygulanarak Kemik İyileşmesinin Histopatolojik Olarak Değerlendirilmesi (Doktora Tezi). İstanbul: İstanbul Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü.

Jiang, W., & Liu, H. (2016). 11 - Nanocomposites for bone repair and osteointegration with soft tissues. İçinde H. Liu (Ed.), *Nanocomposites for Musculoskeletal Tissue Regeneration* (ss. 241-257). Oxford: Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-452-9.00011-X>

Kale, P. P., Kant, K., Kshirsagar, J., Pasha, Z., & Deshmukh, K. S. (2023). Advances in bone grafting techniques for dental implants: A comprehensive review. *IP International Journal of Periodontology and Implantology*, 8(4), 195-199. <https://doi.org/10.18231/j.ijpi.2023.038>

Kannan, S., Goetz-Neunhoeffler, F., Neubauer, J., & Ferreira, J. M. F. (2009). Synthesis and Structure Refinement of Zinc-Doped β -Tricalcium Phosphate Powders. *Journal of the American Ceramic*

Society, 92(7), 1592-1595.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2009.03093.x>

Klokkevold, P., & Jovanovic, S. (2002). Advanced Implant Surgery and Bone Grafting Techniques. İçinde M. Newman, H. Takei, & F. Carranza (Ed.), Carranza's Clinical Periodontology (9th ed., ss. 907-908).

Kucko, N. W., Herber, R.-P., Leeuwenburgh, S. C. G., & Jansen, J. A. (2019). Chapter 34 - Calcium Phosphate Bioceramics and Cements. İçinde A. Atala, R. Lanza, A. G. Mikos, & R. Nerem (Ed.), Principles of Regenerative Medicine (Third Edition) (ss. 591-611). Boston: Academic Press.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809880-6.00034-5>

Leonor, I. B., Rodrigues, A. I., & Reis, R. L. (2016). 13 - Designing biomaterials based on biomineralization for bone repair and regeneration. İçinde C. Aparicio & M.-P. Ginebra (Ed.), Biomineralization and Biomaterials (ss. 377-404). Boston: Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-338-6.00014-4>

Liu, S., Fan, C., Jin, F., Zhao, L., Dai, K., & Lu, J. (2015). Preparation and Antibacterial Activities of Porous Silver-doped β -Tricalcium Phosphate Bioceramics. International Journal of Applied Ceramic Technology, 12(2), 294-299.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1111/ijac.12156>

Mayer, I., Cuisinier, F. J. G., Gdalya, S., & Popov, I. (2008). TEM study of the morphology of Mn²⁺-doped calcium hydroxyapatite and β -tricalcium phosphate. Journal of Inorganic Biochemistry, 102(2), 311-317.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jinorgbio.2007.09.004>

Merten, H. A., Wiltfang, J., Grohmann, U., & Hoenig, J. F. (2001). Intraindividual Comparative Animal Study of α - and β -Tricalcium Phosphate Degradation in Conjunction with Simultaneous Insertion of Dental Implants. *Journal of Craniofacial Surgery*, 12(1). Geliş tarihi gönderen
https://journals.lww.com/jcraniofacialsurgery/fulltext/2001/01000/intraindividual_comparative_animal_study_of____and.10.aspx

Park, J. (2008). Hydroxyapatite. İçinde *Bioceramics: Properties, Characterizations, and Applications* (ss. 177-197). New York, NY: Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-0-387-09545-5_9

Pasinli, A., & Aksoy, R. (2010). Yapay Kemik Uygulamaları için Hidroksiapatit. *BiyoTeknoloji Elektronik Dergisi*, 1, 41-51.

Precheur, H. V. (2007). Bone Graft Materials. *Dental Clinics of North America*, 51(3), 729-746.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cden.2007.03.004>

Rau, J. V, Fadeeva, I. V, Fomin, A. S., Barbaro, K., Galvano, E., Ryzhov, A. P., ... Uskoković, V. (2019). Sic Parvis Magna: Manganese-Substituted Tricalcium Phosphate and Its Biophysical Properties. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 5(12), 6632-6644. <https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.9b01528>

Roca-Millan, E., Jané-Salas, E., Marí-Roig, A., Jiménez-Guerra, Á., Ortiz-García, I., Velasco-Ortega, E., ... Monsalve-Guil, L. (2022). The Application of Beta-Tricalcium Phosphate in Implant Dentistry: A Systematic Evaluation of Clinical Studies. *Materials*, 15(2). <https://doi.org/10.3390/ma15020655>

Rodriguez, O., Alhalawani, A., Arshad, S., & Towler, M. R. (2018). Rapidly-Dissolving Silver-Containing Bioactive Glasses for Cariostatic Applications. *Journal of Functional Biomaterials*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/jfb9020028>

Skallevold, H. E., Rokaya, D., Khurshid, Z., & Zafar, M. S. (2019). Bioactive Glass Applications in Dentistry. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(23). <https://doi.org/10.3390/ijms20235960>

Spaeth, K., Goetz-Neunhoeffler, F., & Hurle, K. (2020). Cu²⁺ doped β -tricalcium phosphate: Solid solution limit and crystallographic characterization by rietveld refinement. *Journal of Solid State Chemistry*, 285, 121225. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jssc.2020.121225>

Torres, P. M. C., Vieira, S. I., Cerqueira, A. R., Pina, S., da Cruz Silva, O. A. B., Abrantes, J. C. C., & Ferreira, J. M. F. (2014). Effects of Mn-doping on the structure and biological properties of β -tricalcium phosphate. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 136, 57-66. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jinorgbio.2014.03.013>

Tulyaganov, D. U., Agathopoulos, S., Dimitriadis, K., Fernandes, H. R., Gabrieli, R., & Baino, F. (2024). The Story, Properties and Applications of Bioactive Glass “1d”: From Concept to Early Clinical Trials. *Inorganics*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/inorganics12080224>

Woods, M., & Woods, M. B. (2006). *The History of Medicine. Twenty-First Century Books.*

Yamada, M., Shiota, M., Yamashita, Y., & Kasugai, S. (2007). Histological and histomorphometrical comparative study of the degradation and osteoconductive characteristics of α - and β -tricalcium phosphate in block grafts. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 82B(1), 139-148. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jbm.b.30715>

Zhao, R., Yang, R., Cooper, P. R., Khurshid, Z., Shavandi, A., & Ratnayake, J. (2021). Bone Grafts and Substitutes in Dentistry: A Review of Current Trends and Developments. *Molecules*, 26(10). <https://doi.org/10.3390/molecules26103007>

İLERİ MALZEME VE ÜRETİM TEKNİKLERİNE YÖNELİK GÜNCEL ÇALIŞMALAR

