

## Şerit Döküm Yöntemiyle Tek Katmanlı ve Çok Katmanlı Yapıda Malzeme Üretimi

Emine Özlem DENGİZ<sup>1\*</sup>, Mevlüt GÜRBÜZ<sup>2</sup>

### Öz

Şerit döküm yöntemi seramik, metal ve plastik malzemeler için ince şerit yapıların üretiminde kullanılan bir imalat tekniğidir. Sıvı faz üretim tekniği olarak sınıflandırılan şerit döküm yöntemi, diğer döküm yöntemlerinden teknik olarak ayrılmaktadır. Yöntemin işleyişi, havası alınmış döküm sıvısının altlık yüzey üzerine dökülerek Doctor Blade olarak da bilinen sıyrıcı bıçak yardımıyla istenen kalınlıkta katmanlar oluşturulmak üzere yüzeye yayılmasına dayanır. Döküm sürecince ya altlık yüzey hareketlidir ya da sıyrıcı bıçak hareketlidir. Döküm sıvısı; toz malzeme, çözücü, dağıtıcı, plastikleştirici ve bağlayıcı gibi sıvı içerisindeki dengeyi sağlayan bileşenlerden oluşur. Yüksek eş dağılımlı bir katman oluştuktan sonra çözücü buharlaştırılır ve geriye sağlam bir şerit kalır. Bu aşamada istenen özelliklere ya da kullanıma amacına göre şerit malzeme farklı işlemlerden geçirilerek süreç tamamlanır. Tek katmanlı ve çok katmanlı kompozit malzemelerin hazırlanmasında şerit döküm yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem, kolay uygulanabilir ve düşük maliyetli olması dolayısıyla, cazip bir uygulama metodu konumundadır. Bu çalışmada şerit döküm yöntemiyle tek katmanlı ve çok katmanlı ince malzemeler oluşturmak üzere yapılmış çalışmalar irdelenmiştir. Ayrıca Ti64 malzeme kullanılarak şerit döküm yöntemiyle ince katmanların üretilmesi için döküm sıvısının optimizasyonu ve döküm parametrelerinin belirlenmesi gerçekleştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Şerit döküm, tek katmanlı malzemeler, çok katmanlı malzemeler, Doctor Blade

## Production of Single-Layer and Multi-Layer Structures by Tape Casting Method

### Abstract

The tape casting method is a technique used to produce thin films for ceramic, metal, and plastic materials. The tape casting method, classified as a liquid phase production technique, is technically different from other casting methods. The process is based on pouring the deaerated casting liquid onto the substrate and spreading it on the surface with the help of a scraper blade, also known as Doctor Blade, to form films of the desired thickness. During the casting process, either the substrate surface or the scraper blade is movable. Casting fluid; powder material consists of several components that balance the liquid, such as solvent, dispersant, plasticizer, and binder. The solvent evaporates after forming a uniform layer, and a solid tape remains. At this stage, the tape material is processed differently depending on the desired properties or the purpose of use, and the process is completed. Tape casting method is widely used in the preparation of single-layer and multi-layer composite materials. This method is an attractive application method because it is easily applicable and low-cost. In this study, studies carried out to create single-layer and multi-layer thin materials by tape casting method were examined. In addition, optimization of the casting fluid and determination of casting parameters were carried out to produce thin layers by tape casting method using Ti64 material.

**Keywords:** Tape casting, single-layer structures, multi-layer structures, Doctor Blade

<sup>1</sup>Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun Türkiye, [eozen.dengiz@samsun.edu.tr](mailto:eozen.dengiz@samsun.edu.tr)

<sup>2</sup>Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye, [mgurbuz@omu.edu.tr](mailto:mgurbuz@omu.edu.tr)

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-2889-008X>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0003-2365-5918>

## 1. Giriş

Tek katmanlı ve çok katmanlı ince tabaka malzemeler elektrik-elektronik uygulamaları, havacılık ve uzay sektörü, otomotiv sektörü, biyomedikal uygulamalar ve daha birçok alanda kullanım yeri bulmaktadır. Metaller, seramik malzemeler ve plastik malzemeler istenen mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olarak ince katmanlar şeklinde üretilir ve ilgili alanlarda kullanılır. Birkaç yüz nanometreden milimetre boyutuna kadar olan kalınlıklardaki malzemeler ince katmanlar olarak nitelendirilirler. Bu tür tabakaların üretimi için sıvı faz ve katı faz üretim teknikleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin hepsinde bir altlık yüzey üzerine ya da bir kalıp içerisine sıvı veya katı fazdaki malzemenin uygulanması süreçleri gerçekleştirilir. Bu yöntemlerin başında geleneksel döküm yöntemi, şerit döküm yöntemi, kimyasal ve fiziksel buhar biriktirme, plazma sprey ve spin kaplama yöntemleri gelmektedir.

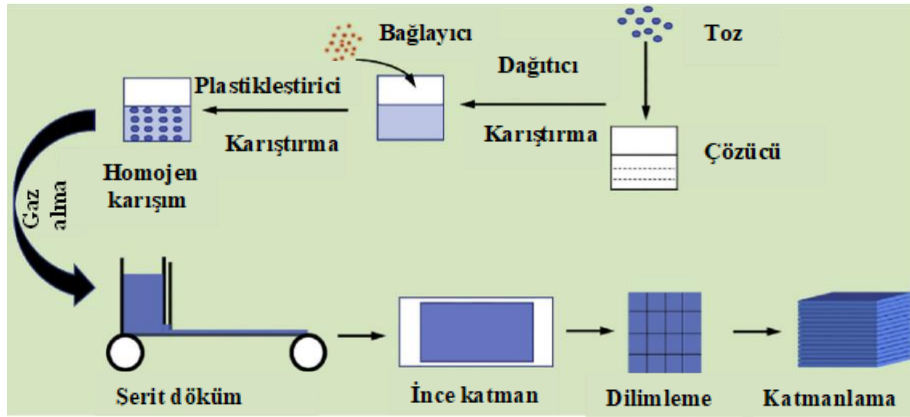
Şerit döküm yöntemi seramik malzemeler başta olmak üzere metaller, metal alaşımları ve plastikler gibi birçok malzemenin tek veya çok katmanlı ince yapıda üretimine olanak tanıyan bir üretim tekniğidir. Oda koşullarında döküm yapmanın mümkün olduğu yöntemde, katı fazdaki toz malzeme ve diğer birtakım elemanlar ile hazırlanan döküm bulamacı içerisinde bir altlık üzerine Doctor Blade olarak adlandırılan sistem yardımıyla dökülür. Kurutma, yardımcı elemanların ayrıştırılması ve gerekiyorsa ısıl ve mekanik işlemlerin ardından nihai ürün elde edilmiş olur. Sıvı faz üretim yöntemi olarak sınıflandırılan şerit döküm yöntemi, geleneksel döküm yöntemlerine kıyasla yaşanan malzeme kayıplarının en aza indirilmesini sağlamaktadır. İnce katman üretim yöntemlerinden plazma sprey, spin kaplama ve bunlar gibi diğer yöntemler pahalı ve uygulaması zordur. Buna karşın şerit döküm yöntemi kolay uygulama tekniği içeren ucuz bir yöntemdir. Katı faz üretim yöntemlerinin başında gelen toz metalurjisi yöntemi ile kıyaslandığında ise tozların topaklanma eğilimi ve dolayısıyla mekanik özelliklere olumsuz etkisi gibi bazı dezavantajların önüne geçilmesi sağlanmaktadır.

Titanyum (Ti) ve alaşımları yüksek özgül mukavemet, düşük yoğunluk, yüksek kimyasal direnç ve aynı zamanda iyi biyouyumluluk sergiler, bu da onları hem havacılık araçları hem de biyomedikal implantlar için temel yapısal malzeme konumuna getirmiştir (Daudt vd., 2019). Günümüzde Ti6Al4V (Ti64) en yaygın kullanılan titanyum alaşımıdır (Boyer, 1996; Niinomi, 1998). Farklı formlarda ve geometrilere üretilen Ti alaşımı malzemelerin, levhalar halinde kullanımı da oldukça yaygındır. Ti alaşımlarından tek katmanlı ve çok katmanlı kompozit levhalar üretilirken kullanım alanına göre farklı üretim teknikleri kullanılmaktadır. Bu tekniklerden biri olan şerit döküm yöntemi henüz literatürde geniş bir yer bulamamıştır. Ti64'ün kullanım alanının yaygın olması, şerit döküm yönteminin de kolay uygulanabilir ve uygun maliyetli olması, ancak literatürde az rastlanır bir örnek olması nedeniyle Ti64 katmanlarının şerit döküm yöntemiyle üretilmesi bu çalışmaya konu olmuştur.

## 2. Şerit Döküm Yöntemi

Şerit döküm ilk olarak ince piezoelektrik malzemelerin üretimi için İkinci Dünya Savaşı sırasında 1940'ların ortalarında Glen N. Howatt tarafından tanıtılmıştır. 1947'de Howatt, kapasitörler için ince seramik levhaların imalatı üzerine ilk makalesini yayınlamış, 1952'de bu yöntem, yüksek dielektrik yüksek yalıtımlı seramik plakalar üretmek için ABD'de patentlenmiştir (Hubadillah vd., 2018).

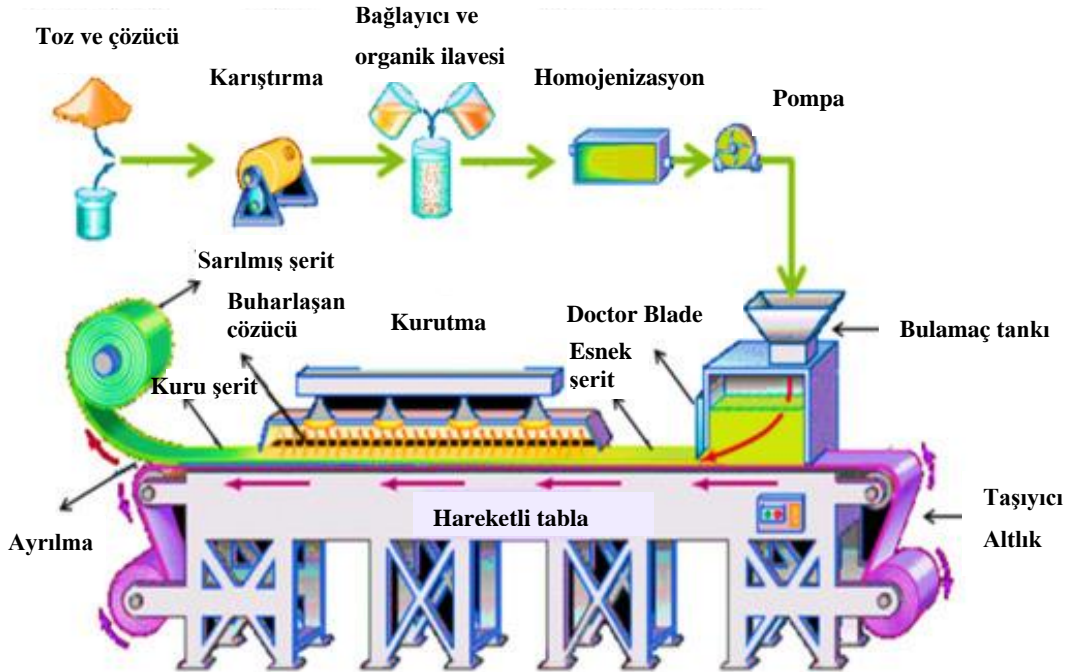
Şerit döküm yönteminde toz, çözücü, dağıtıcı, polimer (bağlayıcı), plastikleştirici ve diğer birtakım bileşenlerden oluşan macun benzeri bir süspansiyon, alt tabakaya sabit bir mesafede hareket eden bir bıçak tarafından bir alt tabaka üzerine dökülür (Tian vd., 2007). Doctor Blade olarak da bilinen bu cihaz yardımıyla kayar bant üzerine dökülen bulamaç yayılır (Rak & Walter, 2006). Daha sonra kurutma ve sinterleme işlemi uygulanır. Sinterlemeden önce, esnek levhalar istenen şekil ve boyutlarda kesilebilir ve genellikle levhalar çok katmanlı yapıları üretmek için istiflenir (Şekil 1). Bu yöntemle, sürekli olarak 10 ile 1000 µm arasında kalınlıklara sahip ince seramik levhalar üretilebilir (Trunec & Maca, 2014).



Şekil 1. Şerit döküm prosesi (Cheng vd., 2018)

Şerit döküm teknolojisinde çözücü olarak en sık kullanılanlar su, metil alkol, etil alkol, izopropil alkol, toluen, aseton, etil asetat olarak verilebilir. Sıvı içerisinde oluşabilecek çökelme ve topaklanma süreçlerinden kaçınmak amacıyla fosfat esterler, Menhaden balık yağı, gliseril trioleat gibi dağıtıcıların kullanılmaktadır. Bağlayıcı olarak kullanılan tipik organik bileşikler polisakkaritler, polivinil alkol, polivinil butiral, polimetil metakrilatlar ve diğerleridir. Tipik plastikleştiriciler, polietilen glikol (PEG), dioktil ftalat, trietilen glikol, dietil oksalat ve diğerleridir. Döküm süspansiyonunun organik bileşenleri sinterleme işlemi sırasında tamamen yanar. Nihai üründe bulunmazlar ancak nihai ürünün kalitesi üzerinde güçlü bir etkiye sahiptirler. Bu nedenle, şerit döküm işlemi için kaliteli bir döküm süspansiyonunun hazırlanması önemlidir (Rak & Walter, 2006).

Şerit döküm yöntemi, seramikler için yaygın olarak kullanılan bir üretim tekniğidir. Ancak metaller için literatürde çok yaygın kullanım alanı bulamamıştır. Literatürde bakır, titanyum, magnezyum ve alüminyum gibi metallerin şerit döküm yöntemiyle üretimi için örnekler bulunmakta ancak nicelik olarak yetersiz seviyede kalmaktadır. Metallerin şerit dökümü, neredeyse küçük seviyeli çelik sac üretimi ile sınırlıdır ve bunların üretimi genellikle diğer geleneksel biçimlendirme işlemleriyle yapılmaktadır. Buna karşın şerit döküm yönteminin diğer yöntemlere göre birtakım üstünlükleri bulunmaktadır. En az malzeme kaybı, düşük maliyetli ve basit üretim prosesleri içermesi ve bu sayede üretim maliyetlerinin az olması, üretim sonrası işleme maliyetlerinin bulunmaması ve döküm sürecinin yüksek sıcaklıklarda gerçekleşme zorunluluğunun bulunmaması bu yöntemin diğer yöntemlere göre avantajlarından bazılarıdır. Uygulama kolaylığı ve düşük maliyet özellikleri göz önünde bulundurulursa şerit döküm yöntemi nano seviyeden milimetre seviyesine kadar geniş aralıkta kalınlığa sahip malzemeler üretimi için uygun bir yöntemdir. Üretilen şeritler güçlü ve sağlamdır, aynı zamanda kolay kullanım ve depolama için rulo haline getirilecek kadar da esnek ve elastiktir (Şekil 2). Metal levha üretimi için kullanılan diğer geleneksel yöntemlerle çok ince kalınlıklara ulaşmak mümkün olmayabilir. Ancak şerit döküm yönteminde istenen incelikte levha üretimi mümkündür. Şerit döküm, geleneksel metal şekillendirme yöntemiyle işlenmesi zor olan titanyum ve alaşımları gibi daha az sünek metaller için istenen mekanik özelliklere sahip olarak üretim olanağı sağlayan çekici bir üretim yoludur.



Şekil 2. Şerit döküm ünitesi (Srinivasan vd., 2023)

Çok katmanlı kompozit malzemeler sergiledikleri yüksek mekanik özellikler nedeniyle yine biyomedikal ve havacılık gibi ağırlık/mekanik özellik oranının önemli olduğu sektörlerde sıklıkla

kullanılmaktadır. Çok katmanlı metal veya seramik malzemelerin oluşturulması için her bir katmanın mikrometre düzeyinde bir incelikte üretilmesi gerekmektedir. İnce tabaka üretimi için farklı yöntemler kullanılsa da, şerit döküm yöntemi tek katmanlı ve çok katmanlı kompozit malzemelerin hazırlanmasında yaygın olarak kullanılan düşük maliyetli ve kolay üretim süreci içeren bir yöntemdir (Gadow & Kern, 2014).

Şerit döküm yöntemi, yalnızca ince şeritler üretmek için değil, aynı zamanda bir malzemenin üzerini kaplamak için de kullanılabilir. Yine hem gözenekli hem de yoğun şeritler ve kaplamalar üretilebilir (Buekenhoudt vd., 2010).

### 3. Şerit Döküm Yöntemiyle Malzeme Üretimi Üzerine Yapılan Çalışmalar

Şerit döküm yöntemi kullanılarak ince katmanlı malzeme üretimi üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, özellikle son yıllarda seramik malzemeler, plastik malzemeler, metaller ve alaşımlarının istenen özelliklere sahip şekilde üretildiği görülmüştür. Yapılan çalışmalarda döküm bulamacındaki bileşenlerin optimizasyonu, döküm koşullarının optimizasyonu ve kurutma, sinterleme gibi döküm sonrası süreçlerin optimizasyonu çalışılmıştır.

Chen vd, yaptıkları çalışmada şerit döküm yöntemiyle yüksek yoğunluklu katmanlar üretmişlerdir. Yardımcı olarak  $Y_2O_3$  ve  $SiO_2$  katkıları kullanılmıştır. Şerit döküm yöntemiyle döküldükleri malzemelerin dilimlenmesinin ardından  $600^\circ C$  ve  $1200^\circ C$ 'de kademeli olarak organiklerin uzaklaştırılması sağlanmıştır.  $1650^\circ C$ 'de 2 saat süre ile sinterleme işlemi gerçekleştirilmiş ve ısı işlem sonrası %96.5 teorik yoğunluk elde edilmiştir. Daha sonra argon atmosferinde  $1650^\circ C$ 'de ve 207 MPa'da sıcak izostatik presleme işlemi uygulanmış, böylece tam yoğunluk elde edilmiştir. Numunelerin elektriksel iletkenlik davranışı incelenmiş ve hem düşük kayıp hem de düşük dielektrik sabiti  $MgO$ 'nun mikroelektronik, optoelektronik ve mikrodalga uygulamalarının çoğu için mükemmel bir malzeme olduğunu göstermiştir.  $100-1400^\circ C$  aralığındaki termal davranış incelenmiştir. Sonuçlar, literatür değerleriyle uyumlu termal iletkenlik davranışı elde edildiğini göstermiştir (Chen vd., 2020).

Du vd, yaptıkları çalışmada  $Al_2O_3$  ve  $AlN$  tozları kullanarak şerit döküm yöntemiyle şeffaf alüminat oksinitrid (AION) seramik levhalar üretmişlerdir. Döküm bulamacının altlık üzerine dökülmesi, kurutma işlemi, dilimleme ve sıcak preslemenin ardından organiklerin uzaklaştırılması süreçleri tamamlanmıştır. Nitrojen atmosferi altında  $1950^\circ C$ 'de 10 saat süre ile sinterleme işlemi tamamlanmıştır. Çalışmada presleme süresinin delaminasyon ve yoğunluk üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla farklı sürelerde pres uygulanmıştır. Sonuç olarak bu çalışma, şeffaf AION seramiğinin şerit döküm yöntemiyle büyük ve ince şekillerde imal edilmesi için etkili bir yöntem oluşunu ortaya koymaktadır (Du vd., 2023).

Huang vd bu çalışmada, BaZr<sub>0.1</sub>Ce<sub>0.7</sub>Y<sub>0.1</sub>Yb<sub>0.1</sub>O<sub>3-δ</sub> (BZCYYb) elektrolitli anot destekli çok katmanlı PCFC'leri şerit döküm yöntemiyle üretmişlerdir. Üretim sürecinde sıcak pres laminasyon teknolojisi ile birleştirilen optimize edilmiş bir sinterleme işlemi kullanılmıştır. Sinterleme büzülmesi ve termal genişleme davranışı optimize edilerek, yoğun BZCYYb elektrolitli anot destekli geniş alanlı PCFC'ler elde edilmiştir. Yakıt olarak H<sub>2</sub> kullanan hücrenin maksimum güç yoğunluğu 700°C'de 400 mW/cm<sup>2</sup>'ye ulaşmıştır. Hücre ayrıca 425 saatlik testte iyi bir termal döngü performansı ve dayanıklılık göstermiştir. Ön deneysel sonuçlar, çok katmanlı şerit döküm teknolojisinin, hücre üretim verimliliğini artırabilen ve geniş alanlı PCFC'ler için başarılı olduğunu göstermektedir (Huang vd., 2023).

Ghannadi vd, yaptıkları çalışmada şerit döküm bulamaç formülasyonunun ve sinterleme koşullarının, gözenekli titanya levhaların mikro yapısı ve geçirgenliği üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. En düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip optimum katı konsantrasyonu 0,61 g/cm<sup>3</sup>'te elde edilmiştir. Sıcaklık ve sinterleme süresinin nihai ürünün açık gözenekliliği ve kristal yapısı üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Sinterleme sıcaklığının 1000°C'den 1100°C'e yükseltilmesi, gözenek boyutunun 170 nm'den 264 nm'ye çıkarılmasına ve açık gözenekliliğin azalmasına neden olmuştur. Son olarak, geçirgenlik akısını ve maksimum çalışma basıncını değerlendirmek için gözenekli titanya levhalarının su geçirgenliği incelenmiştir. Sonuçlar, gözenekli titanya tabakasının geçirgenliğinin sadece açık gözenekliliğin artırılmasıyla değil, aynı zamanda gözenek boyutunun da artırılmasıyla yükseldiğini ortaya koymuştur. Şerit döküm yönteminin gözenekli ince tabakaların üretilmesinde pratik ve etkili bir yöntem olduğu görülmüştür (Ghannadi vd., 2020).

Stastny vd, yaptıkları çalışmada ince ve esnek alümina katmanların şerit döküm yöntemiyle üretimini gerçekleştirmişlerdir. Yüksek yoğunluklu ve ince taneli alümina katmanların mukavemetini ve esnekliğini incelemiş ve tartışmışlardır. Hacimce %42 alümina tozu içeren düşük viskoziteli bulamaç, taşıyıcı üzerine şerit döküm yöntemiyle 0,08 ile 0,4 mm kalınlık aralığında döküldükten sonra kontrollü bir sıcaklık ve atmosferde kurutularak sinterlenmiştir. Nihai ürün son derece pürüzsüz ve kusursuz olarak gözlenmiş ve bağıl yoğunluğunun %99.4 olduğu ölçülmüştür. Yapılan testler neticesinde yüksek mukavemete ve esnekliğe sahip olduğu ölçülmüştür (Stastny vd., 2020).

Daudt vd, şerit döküm yöntemiyle Ti ve %10 Nb tozları kullanarak 400 µm kalınlığında malzemeler üretmişlerdir. Dilimleme işleminin ardından, Argon atmosferinde 500°C'de 30 dakika organik malzemeler uzaklaştırılmıştır. 1100-1300°C'de 180 dakika vakum altında sinterleme yapılmıştır. Sinterleme sıcaklığının artmasıyla birlikte gözeneklilikte azalma görülmüştür. 1100 ve 1150°C sıcaklıklarda Ti matris içinde Nb parçacıkları tamamen çözünmezken sinterleme sıcaklığı 1200 ve 1300°C'ye çıkarıldığında tamamen çözülmüştür (Daudt vd., 2019).

Hackemüller vd, küresel gaz atomize (GA) titanyum tozları ve açısız hidrojenasyon-dehidrojenasyon (HDH) titanyum tozları kullanarak şerit döküm yöntemiyle 300 µm kalınlığında

plakalar üretmiş ve iki farklı yapıdaki tozun nihai ürün üzerindeki gözeneklilik etkilerini incelemişlerdir. Şerit döküm ile dökülen malzemelerden bağlayıcı uzaklaştırılması için argon atmosferinde 500°C'de 15 mbar basınç altında 30 dakika ısıl işlem uygulanmıştır. Sinterleme işlemi vakum altında 800, 900, 1000, 1200°C'lerde 2 saat süre ile gerçekleştirilmiştir. Ti-HDH tozları, gaz atomize tozlara kıyasla daha düşük maliyetleri nedeniyle tercih edilebilir. Bununla birlikte Ti-HDH tozundan oluşan malzemeler (belirli bir sinterleme sıcaklığında) Ti-GA tozundan oluşanlardan önemli ölçüde daha yüksek gözeneklilik sergilemiştir. Ayrıca, artan şerit kalınlığıyla kalıntı gözenekliliğin azaldığı görülmüştür (Hackemüller vd., 2019).

Rauscher vd yaptıkları bir çalışmada, şerit döküm yöntemiyle A316L çeliği kullanarak 350 µm kalınlığında tabakalar üretmişlerdir. Döküm sonrası kurutma, kesme ve 10 MPa basınç altında 10 dakika 70°C'de laminasyon gerçekleştirilmiştir. N<sub>2</sub> atmosferinde 700°C'de bağlayıcı uzaklaştırma işlemi yapılmış ve ardından 1000, 1100, 1150, 1250, ve 1300°C'de 3 saat N<sub>2</sub> atmosferinde sinterleme işlemi yapılmıştır. Farklı sıcaklıklarda sinterleme işlemi uygulanmış ve üretilen ürünlerin özellikleri incelenmiştir. Sinterleme sıcaklığındaki artış ile tabaka yoğunlukları artmıştır. Lamine çelik saclar için maksimum sinterlenmiş yoğunluk değerleri 1250°C'de elde edilmiştir. Sinterleme sıcaklığının 1300°C'ye yükselmesi homojen olmayan yüzeylere ve tabakaların eğilmesine yol açmıştır. Tek katman tabakanın yoğunluğu 7.26 g/cm<sup>3</sup> iken, çok katmanlı tabaka yoğunluğu 7.51 g/cm<sup>3</sup> olmuştur. Çelik saclardaki gözeneklilik seviyesi artan sinterleme sıcaklığı ile azalmıştır. Tek katmanlı ve çok katmanlı numunelerde yapılan mikroyapı incelemeleri sonucu çok benzer sonuçlar elde edildiği, katman sayısının mikroyapıya bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Katmanların ara yüzeyleri delaminasyon içermemektedir. Sinterleme sıcaklığının artmasıyla birlikte tane büyümesinin artışı ve bununla birlikte gözeneklilikte azalış meydana gelmiştir. Aşırı sinterlemenin bir sonucu olarak, 1300°C'de sinterlenen lamine levhaların mikroyapısı, önemli ölçüde tane büyümesi göstermiştir. Tipik bir 316L çeliğinin sertliği 126-187 HV arasındadır. 1250°C'de sinterlenmiş numunelerin sertliği 182 HV iken 1300°C'de sinterlenen numunelerde 280 HV ölçülmüştür. Tipik bir 316L çeliğinin çekme dayanımı 490-690 MPa arasındadır. Boyuna döküm yönünde ölçülen gerilme mukavemeti 495 MPa ve enine döküm yönünde ölçülen gerilme mukavemeti 475 MPa olarak ölçülmüştür. Elastisite modülü değerlerinin sırasıyla 140 GPa ve 139 GPa olduğu görülmüştür. Dolayısıyla mekanik özellikler izotropiktir (Rauscher vd., 2008).

Rak vd, titanyum tozuna ve TiH<sub>2</sub> katkısı yaparak şerit döküm yöntemi ile gözenekli katmanlar üretmişlerdir. Hazırlanan bulamaç şerit döküm yöntemiyle cam altlık üzerine 1 mm kalınlığında dökülmüştür. Üretilen katmanlar atmosfer koşullarında 24 saat kurumaya bırakılmıştır. 60°C'de 1 saat ısıl işleme sokularak kesme işlemleri gerçekleştirilmiş ve ardından organik maddeler uzaklaştırılmıştır. Sinterleme öncesi mikroyapı analizleri gerçekleştirilmiştir. Numuneler 600°C'de 1 saat argon ortamında sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Karışım içerisine ağırlık %0,15 oranında

eklenen TiH<sub>2</sub> molekülleri 288°C ve daha düşük sıcaklıklarda vakumda elementlerine ayırır, yapı içinde bulunan TiO<sub>2</sub> tabaksı ile tepkimeye girerek Ti ve su buharı oluşumları gözlenir. Sinterleme sonrası gözeneklilik oranı %36,2 olarak ölçülmüştür. Ortalama gözenek boyutu ise 22 µm'dir. 20 ile 1000°C arasında ısıl genleşme katsayısı  $8,3 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$  olarak ölçülmüştür (Rak & Walter, 2006).

Bidaux vd, şerit döküm yöntemiyle TiH<sub>2</sub> tozu kullanarak ince katmanlı malzeme üretmişlerdir. Silikon kaplı Mylar folyo üzerine döküm işlemi uygulanmıştır. Tabakalar kurutulduktan sonra altlık üzerinden soyulmuş ve istenen boyutta kesilmiştir. Numunelerden bağlayıcı madde uzaklaştırılmış ve dehidrojenize edilmiştir. Ardından argon atmosferinde 1000°C'de 1 saat sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Üretilen malzemeler çeşitli özellikleri yönünden incelenmiştir. Isıl işlemler sonrası numunelerdeki çekme miktarı, döküm yönünde yaklaşık %18, enine yönde %15 ve kalınlıkta %17 olmaktadır. Taramalı elektron mikroskobu gözlemleri, homojen olarak dağılmış bir gözenekliliği ortaya koymaktadır. Çekme dayanımı 150-320 MPa aralığında ve uzama %1'in altında ölçülmüştür. Düşük uzamaya rağmen levhalar bükülerek plastik olarak deforme edilebilmektedir. Titanyum hidrit tozu, saf titanyum tozuna kıyasla düşük maliyetli olması ve iyileştirilebilir özellikleri özellikleri nedeniyle yaygın kullanım alanı bulabilir (Bidaux vd., 2011).

Snel, yaptığı çalışmada titanyum oksit, nikel oksit ve saf titanyum tozu kullanarak şerit döküm yöntemiyle kompozit üretmiştir. Hidrofobizasyon davranışı ve mekanik özellikler bakımından incelenen kompozit malzemelerin biyomedikal olarak kullanılabilirliği tartışılmıştır. Toz karışım 8 saat boyunca aseton eklenerek bilyalı değirmende öğütülmüş ve stearik asit ile hidrofobizasyon işlemi uygulanmıştır. Organik maddeler ilave edilerek bilyalı değirmende 10 dakika karıştırılarak döküm bulamacı hazırlanmıştır. Şerit döküm yöntemiyle döküm işlemi gerçekleştirilmiş ve atmosferde kurumaya bırakılmıştır. 500°C'de organiklerin uzaklaştırılmasının ardından 2 saat süre ile 1350°C'de vakum ortamında sinterleme yapılmıştır. Hidrofobizasyon işlemi için ağırlıkça %0, 0.5, 1, 2, 4, 7 oranlarında stearik asit kullanılmış, en uygun sonuç %2 oranında elde edilmiştir. En iyi özelliklerin elde edildiği viskozite değeri incelenmiş ve hacimce %28 oranında toz içeren karışımın en iyi elastik modülü ve en iyi gerilme mukavemetini verdiği gözlenmiştir. Artan toz oranı için bu özelliklerde azalış görülmüştür. Ayrıca artan toz oranına bağlı olarak malzeme içerisinde kusurların oluştuğu gözlenmiştir. Akışkanın viskozitesi 4 Pa.s olarak ölçülmüştür. XRD analizlerine göre toz karışımında Ti, TiO<sub>2</sub> ve NiO fazları görülmüş, herhangi bir reaksiyona rastlanmamıştır. Sinterlenmiş numunelerin XRD analizine göre TiO, NiTi<sub>2</sub>, Ni<sub>3</sub>Ti fazları gözlenmiştir. Serbest Ni gözlenmemiştir ve bu da biyomedikal uygulamaların temel şartını oluşturmaktadır. Kompozitin üç nokta eğilme mukavemeti 121 MPa olarak ölçülmüştür. Bu da femur kemiğinin mukavemetine eşdeğerdir (Snel vd., 2008).

Zuo tarafından yapılan çalışmada susuz şerit döküm ile nanometrik TiO<sub>2</sub> levhaların üretilmesi gerçekleştirilmiştir. Stabil düşük viskoziteli bulamaçlar elde etmek için çözücü, dağıtıcı ve katı içeriğin reolojik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Polipropilen altlık üzerine 500 µm



kalınlığında tabakalar dökülmüştür. Oda sıcaklığında ve atmosfer şartlarında kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. 500°C’de vakum ortamında bağlayıcı uzaklaştırılmıştır. Spark plazma sinterleme yöntemiyle 35 MPa basınç altında ve 700°C’de 3 dakika boyunca sinterleme işlemi yapılmıştır. TiO<sub>2</sub> filmler, bileşimin homojenliği, yüzey pürüzsüzlüğü, gözenek ve çatlak içermemesi gibi iyi nitelikler sergiler ve bu da döküm bulamacının kaliteli olduğunu göstermiştir. Sonuçlar; katı içeriğine, sinterleme sıcaklığına ve sinterleme basıncına bağlı olarak yoğunluğun arttığını göstermektedir (Zuo vd., 2007).

Zeng vd, şerit döküm yöntemiyle katmanlı alümina-titanyum karbür malzemelerin üretimini yapmışlardır. Cam altlık üzerine şerit döküm yöntemiyle 200 µm kalınlığında tabakalar dökülmüştür. Vakum altında oda sıcaklığında kurutma katmanlama, organik maddelerin uzaklaştırılması, sıcak presleme ve sinterleme sonrası dilimleme işlemi ve analizler yapılmıştır. Pres değeri 50-200 MPa arasındaki değişken değerlerde numune üretilmiş ve yoğunluk ölçümü yapılmıştır. Basınç arttıkça yoğunluk artmıştır. TiC içeriğinin numune yoğunluğuna olan etkisi incelenmiştir. TiC içeriği arttıkça kompozitin yoğunluğunda azalma görülmüştür (Zeng vd., 2000).

Rincon vd, şerit döküm yöntemiyle grafen oksit katkılı alümina/zirkonya kompozitlerinin üretimini gerçekleştirmişler, grafen oksit katkısının etkilerini, karışım oranının etkilerini ve karıştırma parametrelerinin etkilerini incelemişlerdir. Alümina ve zirkonya tozlar 95:5 oranında olacak şekilde ayrı ayrı çözücüler içinde karıştırılmıştır. Hacimce %2 oranında grafen oksit tozu takviye edilmiştir. Mylar film üzerine şerit döküm yöntemiyle katmanlar dökülmüştür. Oda koşullarında 24 saat kurumaya bırakılan katmanlar kurumanın ardından dilimlenmiştir. Grafen oksit katkılı alümina-zirkonya (AZGO) ve grafen oksit katkısız alümina zirkonya olarak iki farklı numune üretmişlerdir. Kararlı bulamaçlar elde etmek için eklenen optimum dağıtıcı miktarı, alümina için ağırlıkça %0.8 ve zirkonya için ağırlıkça %1 olarak bulunmuştur. Grafen oksit için dağıtıcıya gerek olmadığı yapılan çalışmalarda saptanmış, yalnızca su içerisinde karıştırılmıştır. Süspansiyonların en iyi dağılım durumunu saptamak için darbeleri ve düz ultrasonik karıştırma yapılmıştır. En iyi dağılım gösteren karıştırma biçimi 0,5döngü/s’lik darbeleri modda elde edilmiştir. Homojen süspansiyonların katı madde/sıvı madde oranına bağlılığının saptanması için %47, 50, 53 ve 55 oranlarında katı madde içeren süspansiyonlar hazırlanmıştır. Bunlardan en iyi sonuç veren %55’lik süspansiyondur. AZ ve AZGO süspansiyonlarının bağlayıcı öncesi ve sonrası akışları incelenmiştir. AZ süspansiyonu için bağlayıcı ilavesi viskozitenin azalmasına neden olurken, AZGO süspansiyonuna bağlayıcı ilavesi viskozitenin çok daha az oranda düşmesine neden olmuştur. Şerit döküm yönteminin uygulanmasında GO ilavesinin olumsuz bir etkisinin olmadığı ortaya konmuştur (Rincón vd., 2014)

Cans vd, yaptıkları çalışmada grafit takviyeli bakır alaşımlarının şerit döküm yöntemiyle üretilerek tribolojik özelliklerinin incelenmesini sağlamışlardır. İki ayrı kombinasyon için (Cu/grafit ve Cu/MoS<sub>2</sub>) çalışmalar yapmış ve iki takviye elemanın kıyaslamasını yapmışlardır. Bu çalışmaya

göre; grafitin katı yağlayıcı özelliği ve malzeme içinde homojen dağılımı ile kompozit malzeme iyi tribolojik özellikler göstermiştir. Altlık malzeme ile kaplama malzemesi arasında sıcak preslemeden dolayı iyi bir yapışma gözlenmiştir. Kaplama ve altlık arasında ayrıca difüzyon gözlenmiştir. Grafit katkısı tribolojik özelliklerin iyileşmesini sağlamıştır. %15'lik grafit katkısı saf bakıra göre sürtünme katsayısını yarıya indirmiştir. Grafit katkısı sayesinde aşınma direncinde artış görülmüştür. Saf bakıra göre Cu-grafit malzemelerin kütle kaybı yaklaşık %10'dur. Cu-MoS<sub>2</sub> kompozit malzemelerinde ise Cu-grafit ile çok yaklaşık sonuçlar gözlenmiştir (Cans vd., t.y.).

Arunkumar vd, şerit döküm yöntemiyle TiO<sub>2</sub> malzemelerin katmanlı üretimini yapmış ve en iyi çözücü sisteminin tespit edilmesi için çökme davranışını incelemiştir. Ksilen-etanol, metil etil keton-etanol ve toluen-etanol çözücü kombinasyonları ile döküm bulamaçları hazırlanmıştır. 250 µm tabaka kalınlığında tabakalar halinde döküm yapılmış, kuruma öncesi kesme ve 80°C'de katmanların dizilmesi gerçekleştirilmiştir. 1,6 ton/cm<sup>2</sup> basınçla presleme işleminin ardından, 600°C'de organiklerin uzaklaştırılması işlemi yapılmıştır. 2 saat süre ile 1200, 1250, 1300,1350°C'de sinterleme yapılmıştır. 24 saat sonunda sedimantasyon yüksekliğine bakıldığında ksilen-etanol çözücü sisteminin metil etil keton-etanol veya toluen-etanol sisteminden daha iyi olduğu görülmüştür. Bu nedenle, bu çalışma için çözücü sistemi olarak ksilen-etanol seçilmiştir. Dağıtıcı olarak PE ve MFO malzemelerin kıyaslanması için viskozite ölçümüne bakıldığında MFO'lu bulamaçların, PE'ninkine kıyasla düşük viskozitelere sahip olduğu gözlenmektedir. Bu nedenle bu çalışma için dispersan olarak MFO seçilmiştir. Dağıtıcı MFO konsantrasyonunun etkisinin gözlenmesi için minimum çökme ve minimum viskozite etkisi yaratan ağ.%0,1 MFO katkısı uygun bulunmuştur. Optimum dispersiyon elde etmek için 50:50 oranında ksilen-etanol zeotropik çözücü sistemi ve dağıtıcı olarak ağırlıkça %1 MFO kombinasyonu kullanılmıştır. MFO, sterik bir dağıtıcı görevi görür ve TiO<sub>2</sub>'yi susuz ortamda etkili bir şekilde dağıttığı görülmüştür (Arunkumar vd., 2010).

Bitterlich ve Heinrich, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (silikonitrid) tozunu kullanarak, şerit döküm yöntemiyle malzeme oluşturmak üzere çalışma yapmışlardır. Bulamaç bileşiminin şerit malzeme özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için farklı oranlarda bağlayıcı içeriği ile bulamaç hazırlamışlardır. Döküm sıvısı için elektrokinetik davranış ölçümü ve viskozite ölçümü gerçekleştirmişlerdir. Yapılan ölçümler şerit döküm bulamacındaki toz parçacıklarının iyi bir elektrostatik stabilizasyona sahip olduğunu göstermiştir. Altlık üzerine dökülen şerit malzeme oda sıcaklığında kurutulmuş ve ardından 14 MPa altında 20 saniye sıkıştırılmıştır. Isıl işlem olarak 750°C'de piroliz işlemi uygulanmış, ardından 1800°C'de 60 dakika azot atmosferinde sinterleme yapılmıştır. Şerit malzemenin ham yoğunluğu ve ısıl işlem sonrası yoğunluğu ölçülmüştür. Düşük bileşim varyasyonları viskozite üzerinde nispeten büyük bir etkiye sahiptir. Zamana bağlı etkiler gözlenmemiştir. Bağlayıcı içeriği ağırlıkça %13-15 olan yaklaşık 250 mm maksimum kalınlığa sahip çatlaksız yeşil bantlar elde etmek mümkün olmuştur. Optimize edilmiş bantların sinterleme sonrası yoğunluğu oldukça yüksektir. Şerit

katmanlar, oda sıcaklığında sıkıştırılarak kolayca lamine edilme davranışı göstermiştir. Laminasyon sonrası mükemmel bir bağlantı elde edilmiş, sinterlenmiş lamine bileşenlerde ayrılmış katmanlar tespit edilmemiştir (Bitterlich & Heinrich, 2002).

Tian vd, yaptıkları çalışmada şerit döküm bulamacındaki dağıtıcı pH'nın hidroksiapatit (HA) parçacıklarının dağılıma kabiliyetine, bulamaçların reolojik davranışına ve bant döküm performansına olan etkileri incelemişlerdir. Sinterlenmiş HA numunelerinin mekanik ve mikroyapısal özellikleri de incelenmiştir. Şerit döküm ile üretilen tabakalardan 600°C'de 1 saat süre ile organiklerin uzaklaştırılmasının ardından 1300°C'de 1 saat sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Çeşitli ölçümler ve incelemelerin ardından tekdüze kalınlık ve esnekliğe sahip, yüksek yoğunluklu, yüksek mekanik dayanıma ve yüksek sertliğe sahip HA levhaların hazırlanabileceği ortaya konmuştur. Sonuç olarak, yeni tip biyomalzemelerin üretimi için şerit döküm tekniği kullanılması elverişli bir uygulamadır (Tian vd., 2007).

Jingxian vd, yaptıkları çalışmada şerit döküm bulamacında TiO<sub>2</sub> tozlarının dağılımı için farklı çözücü, dağıtıcı ve bağlayıcı elemanların etkisini incelemişlerdir. Etanol/metil etil keton, etanol/toluen, izopropanol/metil etil keton ve izopropanol/toluen bazlı dört azeotropik ikili çözücü karışımı incelenmiştir. Dağıtıcı ve bağlayıcı olarak iki farklı polivinil bütiral polimer (PVB79 ve PVB98) seçilmiş ve plastikleştirici olarak dibütil ftalat (DBP) kullanılmıştır. TiO<sub>2</sub> süspansiyonlarının dağılımlılığı, reolojik ölçümler ve sedimentasyon testleri ile karakterize edilmiştir. Şerit dökümünden sonra ham malzeme özellikleri yoğunluk, yüzey pürüzlülüğü ve mukavemet açısından test edilmiştir. Sonuçlar, azeotropik EtOH/MEK karışımının TiO<sub>2</sub> levhaların şerit dökümü için etkili solvent sistemi olduğunu göstermiştir. Çok katmanlı seramik/metal kompozit malzeme üretimi için şerit döküm yönteminin olumlu sonuçlar verdiği olduğu ortaya koyulmuştur (Jingxian vd., 2004).

Lobley ve Quo, Ti tozu kullanarak şerit döküm yöntemiyle farklı kalınlıklarda tabakalar üretmiştir. Döküm hızının ve ısıl işlem süreçlerinin optimizasyonu için incelemeler gerçekleştirmişlerdir. Üretilen katmanlar 100°C ve 420°C'de 1'er saat ısıl işleme tabi tutulup soğutulmuştur. Konsolidasyon, 3 saat boyunca 350°C'de bir yanmanın ardından 900°C'de ve 45 MPa'da bir vakumlu sıcak preste 1 saat süreyle gerçekleştirilmiştir. Optimum döküm hızı 0,25m/s olarak belirlenmiştir. Organik maddelerin uzaklaşma sıcaklığı 185-370°C aralığında olduğu belirlenmiştir. Kompozit içindeki fiber dağılımının homojen olduğu görülmüştür (Lobley & Quo, 1998).

#### 4. Ti64 Katmanlarının Şerit Döküm Yöntemiyle Üretimi

Bu çalışmada, tek katmanlı ve çok katmanlı levhaların üretimi toz formdaki Ti64 kullanılarak şerit döküm yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Döküm bulamacının optimizasyon çalışmaları yapılmış ve şerit döküm prosesi uygulanmıştır.

Şerit döküm yönteminde toz malzeme, çözücü, dağıtıcı, plastikleştirici ve bağlayıcıdan oluşan bir çamur kullanılır. Bu döküm çalışmasında matris malzeme olarak Ti64 kullanılmıştır. Plastikleştirici ve bağlayıcı olarak polivinil bütiral (PVB), ayrıca yine bağlayıcı olarak polietilen glikol (PEG) kullanılmıştır. Çözücü olarak etanol, metiletilketon (MEK) ve ksilen, dağıtıcı olarak balık yağı kullanılmıştır.

Tablo 1’de kullanılan bileşenler ve çalışılan farklı kompozisyonlardaki bileşenlerin ağırlıkça yüzdeleri verilmiştir. Döküm bulamacının optimizasyon çalışmaları sürecinde homojen çözünme, homojen dağılım ve optimum viskozite unsurları göz önünde bulundurulmuştur.

**Tablo 1.** Şerit döküm bulamacında kullanılan bileşenler ve ağırlıkça yüzdeleri

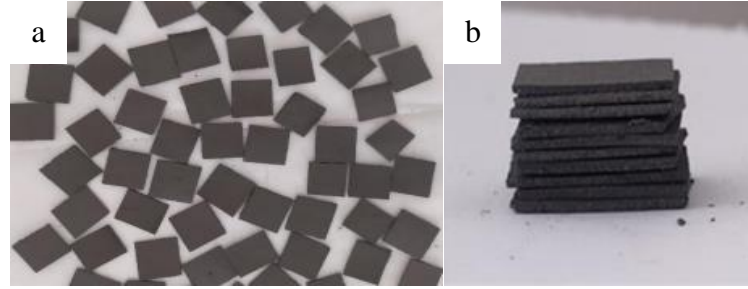
Bileşen	Ağırlıkça Yüzde (ağ.%)						
	1. Komp	2. Komp	3. Komp	4. Komp	5. Komp	6. Komp	7. Komp
Ti64	65	70	47	60	60	60	60
Etanol	15	12,5	23	15	20	10	10
Ksilen	15	12,5	23	-	-	5	10
PVB	2,5	2,5	3,5	3	3	3	3
PEG	2	2	3	1	1	2	1
Balık Yağı	0,5	0,5	0,5	-	-	-	-
MEK	-	-	-	16	16	20	16

Döküm bulamacı için optimizasyon işlemleri ile eş zamanlı olarak şerit döküm prosesine ait bir takım süreçler de kontrollü olarak çalışılmıştır. Tablo 2’de altlık malzeme ve kurutma ortamı ile ilgili parametreler verilmiştir. Döküm bulamacı verilen altlık yüzeyler üzerine kontrollü bir şekilde uygulanmış ve 0,5 mm kalınlığında homojen bir şekilde yüzeye yayılmıştır. Tablo 2’de verilen kurutma ortamlarında 24 saat kurumaya bırakılmıştır.

**Tablo 2.** Şerit döküm altlık malzemesi ve kurutma parametreleri

Kompozisyon	Altlık Malzeme	Kurutma Ortamı	Kurutma Süresi
1	Cam	Atmosfere açık	24 saat
2	Silikon kaplı cam	Atmosfere açık	24 saat
3	Cam WD40 kaplı cam	Atmosfere açık	24 saat
4	Silikon kaplı selüloz kağıt	Atmosfere açık ve atmosfere kapalı	24 saat
5,6,7	Silikon kaplı selüloz kağıt	Atmosfere kapalı	24 saat

Kurumanın ardından ince tabakalar  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  boyutlarında dilimlenmiştir (Şekil 3-a). Katmanlı yapı oluşturmak amacıyla on katman olarak dizilim gerçekleştirilmiş ve ardından hidrolik preste 20 bar basınç altında preslenmiştir (Şekil 3-b).



Şekil 3. a) Dilimlenmiş ince tabakalar, b) dizilim uygulanmış katmanlı yapı

## 5. Sonuçlar ve Öneriler

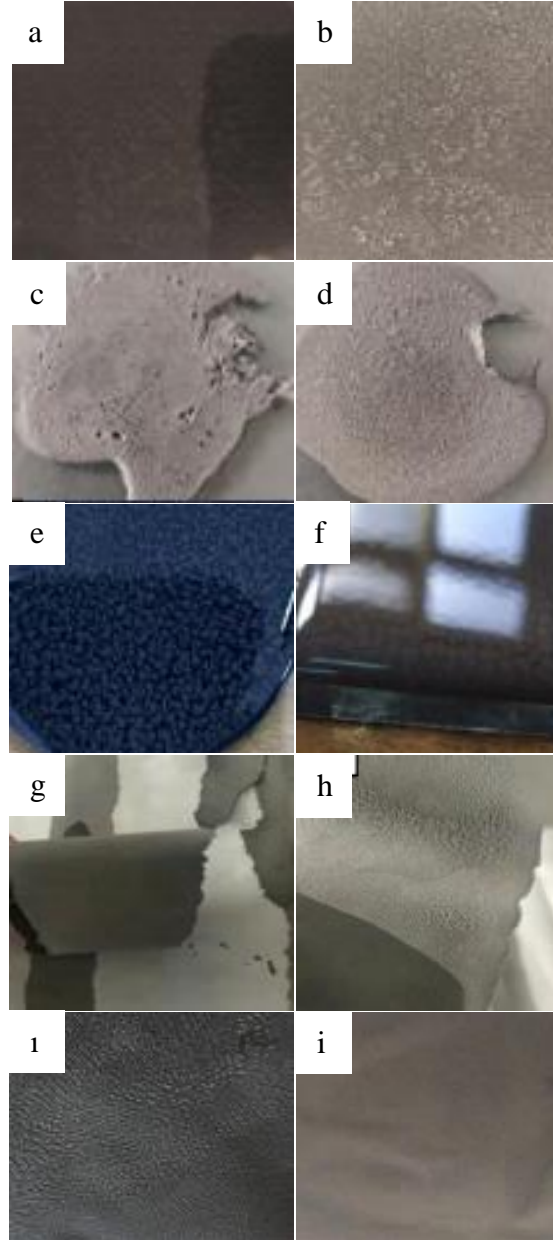
Şerit döküm yöntemi; uygulama kolaylığı, minimum malzeme kaybına ve düşük maliyetli üretime olanak sağlaması nedeniyle birçok alanda kullanılmak üzere cazip bir yöntemdir. Diğer geleneksel döküm yöntemlerinden birçoğu gibi sıcak döküm gerektirmediği için oda koşullarında döküm yapma olanağı sağlamaktadır. Seramikler, metaller ve alaşımları gibi birçok malzeme türünün ince katmanlı yapıda üretilmesini mümkün kılmaktadır. Yapılan çalışmalar gösteriyor ki, istenen mekanik ve fiziksel özellikleri sağlayan malzemelerin elde edilmesi şerit döküm yöntemiyle gerçekleştirilebilir. Malzemenin gözenekliliği, sertliği, mekanik dayanımı, termal ve ısı iletkenliği, esnekliği ve diğer birtakım parametreleri özelleştirilebilmektedir. Döküm bulamacındaki elemanların oranlarını ve döküm koşullarını optimize ederek nihai ürün özelliklerini istendiği gibi değiştirmek mümkündür. Bunun yanı sıra döküm sonrası ısı işlemlerin ve mekanik işlemlerin optimizasyonu ile de üretilen malzemelerin özelliklerini değiştirmek mümkün olmaktadır. Altlık olarak farklı malzemelerin tercih edilebileceği görülmektedir. İstenen kalınlıkta katman oluşturmak üzere malzeme dökümü gerçekleştirilebilmektedir. Doctor Blade olarak adlandırılan ve çok çeşitli kapasitede üretim imkanı sunan şerit döküm sistemleri endüstriyel amaçlı ve araştırma amaçlı olarak kullanılmaktadır. Şerit döküm yöntemiyle tek katman olarak üretilen malzemeler kullanım yeri ve amacına göre çok katmanlı olarak da üretilebilir. Yalnızca malzeme üretimi değil, aynı zamanda istenen özelliklerde yüzey kaplaması yapmak da mümkündür. Seramik malzemelerin üretiminde daha sık kullanım yeri bulan şerit döküm yönteminin, metaller için kullanımı son yıllarda artmış olsa da literatürde yeterince yer bulamamıştır. İnce katmanlı metallerin yaygın kullanıldığı otomotiv endüstrisi, elektrik ve elektronik endüstrisi, havacılık uygulamaları ve biyomedikal amaçlı

kullanımlar için şerit döküm yöntemiyle istenen özelliklerde malzeme üretimi yüksek potansiyele sahiptir.

Ti64 tozu, organik malzemeler ve çözücü malzemeler ile hazırlanan döküm bulamacının optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon çalışmaları için bir takım fiziksel ve kimyasal davranışların incelenmesi ve en uygun şartların oluşturulması sağlanmıştır. Bu özellikler; sıvı viskozitesinin döküm prosesindeki çalışma kolaylığı, karışım içerisindeki katı partiküllerin homojen dağılımı ve sıvı içerisinde asılı kalma davranışı, çözücü malzemelerin kimyasal olarak uyum sağlaması ve herhangi bir reaksiyona yol açmaması, döküm malzeme/altlık yüzey ilişkisi, kuruma koşulları olarak sıralanabilir.

İlk kompozisyonda ağırlık %65 oranında Ti64 içeren döküm karışımında homojen olmayan bir dağılım meydana gelmiştir. Aynı durum kuruyan malzeme içerisinde gözle görülür bir şekilde bulunmaktadır (Şekil 4-a,b). Aynı kompozisyon için altlık yüzey olarak cam malzeme kullanılmıştır. Atmosfere açık şekilde ve tam kuruma sağlandığında ince levha yapısına ulaşması ve yüzeyden kolayca kalkması beklenen tabaka yavaşça sıyrılmaya çalışılmıştır. Ancak dökülen malzemenin yüzeyi iyi bir şekilde tuttuğu ve kolaylıkla sıyrılmadığı görülmüştür. İkinci kompozisyon olarak çalışılan döküm sıvısında %70 Ti64 kullanılmış, katı malzeme miktarındaki artışın döküm yüzeyindeki bölgesel ayrışmaya olan etkisinin incelenmesi öngörülmüştür. Burada cam altlık yüzeyinin silikon ile kaplanması gerçekleştirilerek şerit döküm uygulanmıştır. Atmosfere açık şekilde kuruma sağlanmıştır. İnce şeridin yüzeyden kaldırılması aşamasında yüzeye tutunma davranışının devam ettiği, ayrıca yüzeye uygulanan silikon kaplama ile döküm sıvısının tepkimeye girdiği gözlenmiştir (Şekil 4-c). Üçüncü kompozisyonda homojen olmayan ve topaklanma eğilimi gösteren bölgelerin ortadan kaldırılması amacıyla katı partikül oranının azaltılması ve %47 oranında Ti64 malzeme kullanılması gerçekleştirilmiştir. Altlık yüzey olarak dökümün cam yüzeye tutunmasını önlemek amacıyla WD40 (çözücü ve yağlayıcı malzeme) kaplanmış cam yüzey kullanılmıştır. Ancak bu numunedeki sonuç da beklenen etkiyi göstermemiş, yüzeye tutunmayı azaltmamıştır (Şekil 4-d). Ti64 oranının azaltılması viskoziteyi büyük oranda düşürmüştür. Bu da döküm sıvısının yüzeyde kontrol edilebilirliğini azaltmaktadır. Dağıtıcı olarak kullanılan balık yağının karışıma etkisinin incelenmesi amacıyla, döküm sıvısı kaplamasız cam yüzey üzerine dökülerek kuruma esnasında gözlenmiştir. Ancak sıvı yüzeyinde görülen ayrışma ve homojen olmayan topaklanma bölgelerinin varlığı neticesinde balık yağının olumlu bir etkisinin görülmediği belirlenmiştir (Şekil 4-e,f). Dördüncü kompozisyonda viskoziteyi artırıcı etki yaratmak amacıyla Ti64 oranı ağırlık %60'a yükseltilmiş, çözücü etkisinin incelenmesi için ksilen ilavesi durdurulmuştur. Bunun yerine MEK ilavesi yapılmıştır. Viskozite gözle görülür bir biçimde artmıştır. Bu da sıvıyı döküm esnasında kontrol etmeyi kolaylaştırmıştır. Ti64 çökmesi azalmış, ancak tamamen homojen bir karışım elde edilememiştir. Altlık yüzey olarak silikon kaplı selüloz kağıt (fırın kağıdı) kullanılmıştır. Yüzeyden

sıyırılma performansının oldukça iyileştiği gözlenmiştir (Şekil 4-g,h). Altlık fırın kâğıdı kullanımına bağlı olarak nemden dolayı genleşme problemi ortaya çıkmıştır. Kurutma koşullarının etkisini incelemek amacıyla malzeme eş zamanlı olarak atmosfere açık ortamda ve atmosfere kapalı ortamda kurumaya bırakılmıştır. Açık alanda kurumaya bırakılan numunelerde aynı şekilde ayrışma ve pürüzlü bir yüzey görülmüştür (Şekil 4-ı). Kapalı atmosferde kurumaya bırakılan numunelerde ise kuruma esnasında sıvı yüzeyde görülen ayrışma yok denecek kadar azdır, numunelerin yüzey pürüzlülüğü büyük oranda iyileşme göstermiştir (Şekil 4-i).



**Şekil 4.** a-b) 1. kompozisyon uygulamasına ait malzeme görüntüleri, c) silikon kaplı cam altlık üzerine uygulanmış döküm malzeme, d)WD40 kaplı cam altlık üzerine uygulanmış döküm malzeme, e-f) kuruma esnasında döküm yüzeyinden bir görüntü, g-h) kağıt altlık üzerine dökülen numunelere ait yüzeyden ayrılma görüntüsü ve yüzey pürüzlülüğü, ı) açık havada kurutulan numune, i) kapalı havada kurutulan numune.

Bu çalışmada şerit döküm yöntemiyle Ti64 ince katmanlar oluşturmaya yönelik döküm sıvısı ve döküm parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Uygulama sonuçları göstermiştir ki, şerit döküm yöntemi toz malzemeler için uygun koşullarda uygulaması kolay ve düşük maliyetli bir yöntemdir. Ayrıca diğer geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla en az malzeme kaybına sebebiyet veren bir yöntemdir.

### Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

### Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

### Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

### Kaynaklar

- Arunkumar, K. V., Panicker, R. N., Vasanthakumari, K. G., Satheesh, M., Raghu, N., & Unnikrishnan, N. V. (2010). Dispersion and rheological characterization of TiO<sub>2</sub> tape casting slurry. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 7(6), 902-908. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7402.2009.02386.x>
- Bidaux, J. E., García-Gómez, J., Hamdan, H., Zufferey, D., Rodriguez-Arbaizar, M., Girard, H., & Carreño-Morelli, E. (2011). Tape casting of porous titanium thin sheets from titanium hydride. *Proceedings of the Euro International Powder Metallurgy Congress and Exhibition, Euro PM 2011*, 2(October).
- Bitterlich, B., & Heinrich, J. G. (2002). Aqueous tape casting of silicon nitride. *Journal of the European Ceramic Society*, 22(13), 2427-2434. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(02\)00029-8](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(02)00029-8)
- Boyer, R. R. (1996). An overview on the use of titanium in the aerospace industry. *Materials Science and Engineering A*, 213(1-2), 103-114. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(96\)10233-1](https://doi.org/10.1016/0921-5093(96)10233-1)
- Buekenhoudt, A., Kovalevsky, A., Luyten, J., & Snijkers, F. (2010). Basic Aspects in Inorganic Membrane Preparation. *Comprehensive Membrane Science and Engineering*, 1, 217-252. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-093250-7.00011-6>
- Cans, M., Hamdam, H., & Öner, Y. (t.y.). *Tape Casting of Copper Alloys for Tribological Applications*.
- Chen, C. F., Baker, T. J., Synowicki, R., Tegtmeier, E. L., Forsyth, R. T., Bissell, A. L., Orłowski, A. G., Christopher, J. M., & Savrun, E. (2020). Tape casting and characterizations of MgO ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 103(12), 6666-6676. <https://doi.org/10.1111/JACE.17136>
- Cheng, L., Sun, M., Ye, F., Bai, Y., Li, M., Fan, S., & Zhang, L. (2018). Structure design, fabrication, properties of laminated ceramics: A review. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 1(3), 126-141. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2018.08.002>
- Daudt, N. F., Hackemüller, F. J., & Bram, M. (2019). Manufacturing of Ti-10Nb based metal sheets by tape casting. *Materials Letters*, 237, 161-164. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.11.109>
- Du, W., Lu, K., He, B., Zhou, X., Huang, X., Qi, J., & Lu, T. (2023). Direct tape casting of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AlN slurry for AlON transparent ceramic wafers via one-step reaction sintering. *Journal of the European Ceramic Society*, 43(8), 3538-3543. <https://doi.org/10.1016/J.JEURCERAMSOC.2023.01.056>



- Gadow, R., & Kern, F. (2014). Advanced Manufacturing of Hard Ceramics. İçinde *Comprehensive Hard Materials* (ss. 207-230). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096527-7.00025-8>
- Ghannadi, S., Abdizadeh, H., & Babaei, A. (2020). Fabrication of porous titania sheet via tape casting: Microstructure and water permeability study. *Ceramics International*, 46(7), 8689-8694. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2019.12.103>
- Hackemüller, F. J., Borgardt, E., Panchenko, O., Müller, M., & Bram, M. (2019). Manufacturing of Large-Scale Titanium-Based Porous Transport Layers for Polymer Electrolyte Membrane Electrolysis by Tape Casting. *Advanced Engineering Materials*, 21(6), 1-10. <https://doi.org/10.1002/adem.201801201>
- Huang, Z., Yang, Y., Lv, H., Shi, C., Li, T., Ling, Y., Chen, T., & Wang, S. (2023). Large-area anode-supported protonic ceramic fuel cells combining with multilayer-tape casting and hot-pressing lamination technology. *Journal of the European Ceramic Society*, 43(2), 428-437. <https://doi.org/10.1016/J.JEURCERAMSOC.2022.09.057>
- Hubadillah, S. K., Othman, M. H. D., Matsuura, T., Ismail, A. F., Rahman, M. A., Harun, Z., Jaafar, J., & Nomura, M. (2018). Fabrications and applications of low cost ceramic membrane from kaolin: A comprehensive review. *Ceramics International*, 44(5), 4538-4560. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2017.12.215>
- Jingxian, Z., Dongliang, J., Weisensel, L., & Greil, P. (2004). Binary solvent mixture for tape casting of TiO<sub>2</sub> sheets. *Journal of the European Ceramic Society*, 24(1), 147-155. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(03\)00340-6](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(03)00340-6)
- Lobley, C. M., & Quo, Z. X. (1998). Processing of Ti-SiC metal matrix composites by tape casting. *Materials Science and Technology*, 14(9), 1024-1028. <https://doi.org/10.1179/mst.1998.14.9-10.1024>
- Niinomi, M. (1998). Mechanical properties of biomedical titanium alloys. *Materials Science and Engineering A*, 243(1-2), 231-236. [https://doi.org/10.1016/s0921-5093\(97\)00806-x](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(97)00806-x)
- Rak, Z. S., & Walter, J. (2006). Porous titanium foil by tape casting technique. *Journal of Materials Processing Technology*, 175(1-3), 358-363. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.04.066>
- Rauscher, M., Besendörfer, G., & Roosen, A. (2008). Steel-sheet fabrication by tape casting. *International Journal of Powder Metallurgy (Princeton, New Jersey)*, 44(6), 39-48.
- Rincón, A., Moreno, R., Chinelatto, A. S. A., Gutierrez, C. F., Rayón, E., Salvador, M. D., & Borrell, A. (2014). Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-3YTZP-Graphene multilayers produced by tape casting and spark plasma sintering. *Journal of the European Ceramic Society*, 34(10), 2427-2434. <https://doi.org/10.1016/J.JEURCERAMSOC.2014.02.011>
- Snel, M. D., Snijkers, F., Luyten, J., Kodentsov, A., & de With, G. (2008). Tape casting and reaction sintering of titanium-titanium oxide-nickel oxide mixtures. *Journal of the European Ceramic Society*, 28(6), 1185-1190. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.11.001>
- Srinivasan, S. A., & Sampath, S. (2023). 1-Flexible ceramics: an introduction. *Advanced Flexible Ceramics*, 3-11. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-98824-7.00001-4>
- Stastny, P., Chlup, Z., & Trunec, M. (2020). Gel-tape casting as a novel method for the production of flexible fine-grained alumina sheets. *Journal of the European Ceramic Society*, 40(7), 2542-2547. <https://doi.org/10.1016/J.JEURCERAMSOC.2019.10.042>
- Tian, T., Jiang, D., Zhang, J., & Lin, Q. (2007). Aqueous tape casting process for hydroxyapatite. *Journal of the European Ceramic Society*, 27(7), 2671-2677. <https://doi.org/10.1016/J.JEURCERAMSOC.2006.10.009>
- Trunec, M., & Maca, K. (2014). Advanced Ceramic Processes. İçinde *Advanced Ceramics for Dentistry* (ss. 123-150). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394619-5.00007-9>
- Zeng, Y. P., Jiang, D. L., & Watanabe, T. (2000). Fabrication and properties of tape-cast laminated and functionally gradient alumina-titanium carbide materials. *Journal of the American Ceramic Society*, 83(12), 2999-3003. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01673.x>
- Zuo, K. H., Jiang, D. L., Zhang, J. xian, & Lin, Q. L. (2007). Forming nanometer TiO<sub>2</sub> sheets by nonaqueous tape casting. *Ceramics International*, 33(3), 477-481. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2005.10.013>