

Araştırma Makalesi/Research Article

Metal Enjeksiyon Kalıplama Yönteminde Dijital Radyografinin Önemi

The Importance of Digital Radiography in Metal Injection Molding Method

Levent URTEKİN^{1*} ve Yusuf USTA²

Geliş / Received : 12/ 04/2018

Revize / Revised : 15/10/2018

Kabul / Accepted : 17/10/2018

Öz- Bu çalışmada ortopedik kilitleme plakalarının (Ti alaşım) toz enjeksiyon kalıplama (TEK) yöntemiyle kusursuz üretim parametreleri için ara ve son kontrolün sağlanması amaçlanmıştır. TEK yönteminde reoloji, kalıplama, bağlayıcı giderme ve sinterleme aşamaları için birden çok parametrenin belirlenmesi uzun zaman, enerji ve yüksek maliyet gerektirmektedir. Metal enjeksiyon kalıplamada besleme stok davranışı özellikle viskozite değerleri kalıp dolumu sırasında en önemi verilerden biridir. Bu kapsamda reoloji çalışması tamamlanmış bir besleme stoku için akış analizleri yapılarak kalıp içerisindeki davranışı hakkında önemli bilgilere ulaşılmaktadır. Akış analizleri neticesinde elde edilen kalıplama parametreleri gerçek uygulamada kullanılmaktadır. Kalıplama sonrası ise ham parçaların içyapı analizi yapılması oldukça zordur. Ham parçada meydana gelen kusurlar (iç çatlak, mikro gözenek, jetting vb) sinterleme sonrası tahribatlı muayene ile ortaya çıkmaktadır. Yöntemin bu aşamasında dijital radyografi (tahribatsız muayene) cihazı ile bağlayıcı giderme ve sinterleme aşamasına geçmeden öncesi ham parçanın içyapı analizinin belirlenmesi sağlanacaktır. Yönteme dijital radyografi entegrasyonu ile bağlayıcı giderilmiş ve sinterlenmiş parçaların denetimi de sağlanacaktır. TEK ile üretilen parçalarda kusurlar bazen o derece fazla olabilmektedir ki reoloji çalışmasına kadar dönülen durumlar meydana gelebilmektedir. Yapılan çalışma ile tıbbi uygulamalarda kullanılan ortopedik kilitleme plakası hatasız üretimi için bir yol haritası belirlenmiş olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Metal Enjeksiyon Kalıplama, Dijital Radyografi, Ortopedik Kilitleme Plakası

Abstract - In this study, it is aimed to provide intermediate and final control for perfect production parameters by powder injection molding (PIM) method of orthopedic locking plates (Ti alloy). Determination of multiple parameters for rheology, molding, binder removal and sintering steps in the PIM method requires long time, energy and high cost. In metal injection molding, feedstock behavior, especially viscosity values are one of the most important data during mold filling. In this context, flow analysis is performed for a feedstock that has completed its rheology study and important information about the behavior of the mold is reached. The molding parameters obtained as a result of flow analysis are used in real applications. After molding, it is very difficult to analyze the internal structure of the green parts. At this stage of the method, a digital radiography (non-destructive) device will be used to determine the internal structure analysis of the green part before it goes through the binder removal and sintering step. Defects in the parts produced with PIM can sometimes be so high that the conditions that have been returned until the rheology work can come into play. A procedure for the production of orthopedic locking plate used in medical applications will be determined.

Key words: Metal Injection Molding, Digital Radiography, Orthopedic Locking Plate

I. GİRİŞ

Toz metalürjisi ile üretim sürecinde ham parçaları (green part) incelemek için etkili bir yöntemin olmadığı, olan yöntemlerin ise yetersiz kaldığı bilinmektedir. Özellikle toz enjeksiyon kalıplama (TEK)

1*Sorumlu yazar iletişimi: levent.urtekin@ahievran.edu.tr

Makina Mühendisliği, Mühendislik.-Mimarlık Fakültesi, Ahi Evran Üniversitesi, Kırşehir, Türkiye.

2 İletişim: yusta@gazi.edu.tr.

Makina Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.

yöntemiyle ham parçaların üretilmesi sırasındaki gözenek ve mikro-çatlak tayini gibi kusurların belirlenmesindeki güçlükler nedeniyle sinterleme sonrasında tahribatlı muayene (çekme, eğme, SEM) yöntemleriyle belirlenmeye çalışılmaktadır. Bu da Sinterleme sonrası hataların giderilmesi mümkün olmadığından dolayı birden çok parametrenin eş zamanlı uygulandığı TEK yönteminde ciddi zaman, enerji ve malzeme kaybına neden olmaktadır. Bu sebepten dolayı sinterleme öncesinde TEK ile şekillenmiş ham parçaların yüksek seviyede kalite, malzeme, zaman ve enerji tasarrufu sağlayan bir kontrol sürecine ihtiyaç duyulmaktadır.

Toz metalurjisi birçok sanayi sektörünün ana üretim sürecini oluşturmaktadır. Otomotiv için şanzıman ve dişli kutusu çelik parçaları, metal, ahşap veya taş işleme, mıknatıslar ve yumuşak manyetik malzemeler, ince seramik, refrakter metaller, rulmanlar, çimentolu karbürler ve yüksek hız çelikleri gibi geniş bir yelpazede, bu üretim prosedürü giderek daha etkin hale gelmektedir. TEK ile üretilen kusurlu ham parçaların tekrar kullanımı ya da geri dönüşümü, besleme stokunun termoplastik bağlayıcıdan oluşması sebebiyle preslenmiş parçalara göre çok daha kolay olacaktır.

TEK ile elde edilmiş ham parçaların geleneksel içyapı incelemesi (taramalı elektron ve optik mikroskop) için numune hazırlanması kesme ve parlatma gibi işlemler gerektirir. Bu süreçte numunede birçok hata oluşmaktadır. Ayrıca ham numunelerin mukavemetinin düşük olmasından dolayı iç yapı analizi oldukça zor gerçekleşmektedir. Bu yüzden geleneksel yöntemler ham parça incelemesi için uygun değildir [1]. Yüksek çözünürlükten dolayı günümüzde X-Ray tomografi bir çok malzeme bilimi alanında tahribatsız muayene olarak kullanılmaktadır [2-6]. TEK ile çalışan araştırmacıların bazıları ham parça içindeki toz büyüklüğü ve dağılımı üzerine araştırmalar yapmıştır [7-8]. Ayrıca ham parçaların X-Ray tomografi ile incelenmesi sonucu en uygun enjeksiyon parametrelerinin belirlenmesinde pratik ve hızlı bir yöntem olarak kullanılmıştır [9].

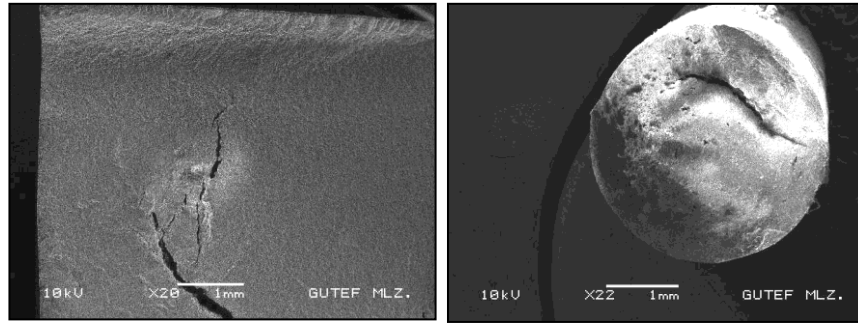
Avrupa Toz Metal KOBİ'leri, özellikle daha zorlu mekanik özelliklere ve daha büyük üretim ölçeklerine sahip (örneğin havacılık ve tıbbi endüstriler) büyüyen sektör uygulamaları için hafif, yüksek kaliteli, düşük maliyetli parçalar üretmekte zorlanmaktadır. Toz metalurjisinin temel dezavantajı, toz şekillendirilmesinin ardından mikroyapıda gözeneklilik ve çatlaklar olabileceğidir. Bu dezavantaj imalat yönteminin kullanımını sınırlayan güvenilmez özelliklere (düşük mekanik özellik) neden olabilir. Sinterleme esnasında malzeme gözenekliliği değişmez ve bu nedenle gereğinden fazla sinterlemeyi önlemek için 'ham parça' gözenekliliğinin ve mikro çatlakların belirlenmesi, böylece malzeme, enerji ve zamandan tasarruf edilmesi çalışmanın çıkış noktasını oluşturmaktadır.

Ortopedik kilitleme plakalarının TEK yöntemi ile üretimine sebep olan etken titanyum alaşımının işlenmesindeki zorluklardır. Titanyum alaşımlarının işlenmesinde gerekli olan kesme kuvveti, çeliklerinin ihtiyaç duyduğu kesme kuvvetinden daha yüksektir. Eşit sertliklere sahip olmasına rağmen bu alaşımların sahip olduğu metalurjik özellikler titanyum alaşımlarını işlemede güçlük çıkarmaktadır. İşleme şartları özellikle özel bir alaşım kompozisyonu ve işleme sırası için seçilirse işlenebilirliğin gerçekçi üretim oranları kabul edilebilir maliyet düzeyinde elde edilebilir. Özellikle taşlama sırasında, yüzey bütünlüğündeki düzensizlikleri engellemek için gerekli çalışmalar yapılması titanyum alaşımları için gerekmektedir. Aksi takdirde yorulma gibi mekanik davranışlarda dramatik kayıplar oluşabilmektedir. Bugüne kadar yüksek hızda işleme gibi tekniklerle titanyum işlemede gözle görülebilir gelişmeler olmamıştır. Yeni takım malzemelerinin geliştirilmesinin gerekliliği ortaya çıkmıştır [10-12]. Titanyum, çeliğe göre nispeten daha düşük elastikiyet modülüne sahiptir ve dolayısıyla esnekliği çeliğe göre daha azdır. Ağır talaş kaldırma işlemleri için daha güçlü takımlara ihtiyaç duymaktadır. Takımdaki basınç nedeniyle, takımda sürtünme, tırlama ve tolerans gibi problemler yaşanmaktadır. Yukarıda belirtilen durumlar titanyum alaşımlarını işlenebilirliği güç malzemeler sınıfına sokmaktadır. Ti-6Al-4V ortopedik kilitleme plakalarının işlenmesindeki zorluklar, bunun yanında hem kalçada hem de bilekte yoğun olarak kullanılması bu parçanın seri üretimini gerektirmektedir. Titanyum alaşımları, 316L paslanmaz çelik ve Co-Cr-Mo alaşımları ile karşılaştırıldığında yüksek korozyon direncine sahiptir. Ti6-Al-4V alaşımı ve saf titanyumu yüzeyde oluşan pasif oksit tabaka korumaktadır. Bu stabil ve yapışık pasif oksit film, implantı çukurlaşma korozyonu ve taneler arası korozyona karşı korumakta ve biyo-uyumluluk kazandırmaktadır. Aynı zamanda Ti alaşımlarının mekanik özellikleri kemiğin mekanik özelliklerine yakın olduğu için yaygın kullanım alanı bulmuştur [13-15]. Genel olarak metalik biyo-malzemelerin sertliği kemiğe göre daha fazladır. Biyomedikal uygulamalarda kullanılan metalik biyo-malzemelerden Ti-6Al-4V, paslanmaz çelikten ve Co-Cr tipi alaşımlardan daha yumuşaktır. Ancak, Ti-6Al-4V kemikten daha serttir. Bundan dolayı, Amerika Birleşik Devletlerinde düşük sertliğe sahip titanyum alaşımlarının araştırılması ve geliştirilmesi üzerine çalışılmaktadır [16]. Ti-6Al-4V kemik implantlarına alternatif olarak 316L paslanmaz çelik kullanılsa da korozyon direnci ve biyo-uyumluluk konusunda üstünlüklerinden dolayı Ti-6Al-4V ortopedik kilitleme plakaları kullanılmaktadır.

Bu çalışmada dijital radyografi teknolojisine dayanan yeni bir denetim aracı geliştirilecektir. Bu teknoloji ile yüzey ve içyapı kusurlarını tespit etmek mümkün olacaktır. Üretimi hedeflenen ortopedik kilitleme plakasının enjeksiyon kalıplanması ve ham parçanın koruyucu bir atmosferli fırında sinterlenmesi ile üretilen plakada; yeni bir kalıp tasarımı ve üretimi, artı maliyetler (ilk takım maliyetlerinin% 50'sine kadar) ve gecikmeler (birkaç hafta veya ay) deneme yanılma yöntemiyle yapılmaktadır. Ayrıca, malzemenin incelenmesi için hızlı ve sistematik sistem araçları ve prosedürlerinin bulunmaması nedeniyle sürecin optimizasyonu çok zaman almaktadır. Toz Enjeksiyon kalıplanmada maliyetlerin yanı sıra parçalarda öngörülemez kusur oluşumu meydana gelmektedir. Yüzey çatlakları genellikle tahribatlı muayene yöntemleri ile saptanabilirken iç kusurların tespit edilmesi oldukça zordur. Günümüzde ham parçaların incelemek ve iç kusurları tespit etmek için güvenilir bir yöntem bulunmamaktadır. Girdap akımı ve manyetik köprü testi, manyetik parçacık denetimi, gaz geçirgenlik testi ve gama ışını yoğunluğu tayini gibi test denetim sistemleri ham parçalarda sağlıklı sonuç vermemektedir. Öte yandan, diğer rekabet teknolojileri (çoğunlukla döküm) tarafından üretilen parçalar yerine toz metalürjisi parçalarının yaygın olarak kullanılmaya başlaması Dijital Radyografi (DR)'ye olan ihtiyacı artırmıştır [17]. Kusurları tespit etmek için güvenilir bir denetim aracının bulunması parçaların üretimi ve kontrolü ile ilgili indirgeme maliyetleri göz önüne alındığında toz enjeksiyon yöntemi için önemli tasarruflara neden olacaktır.

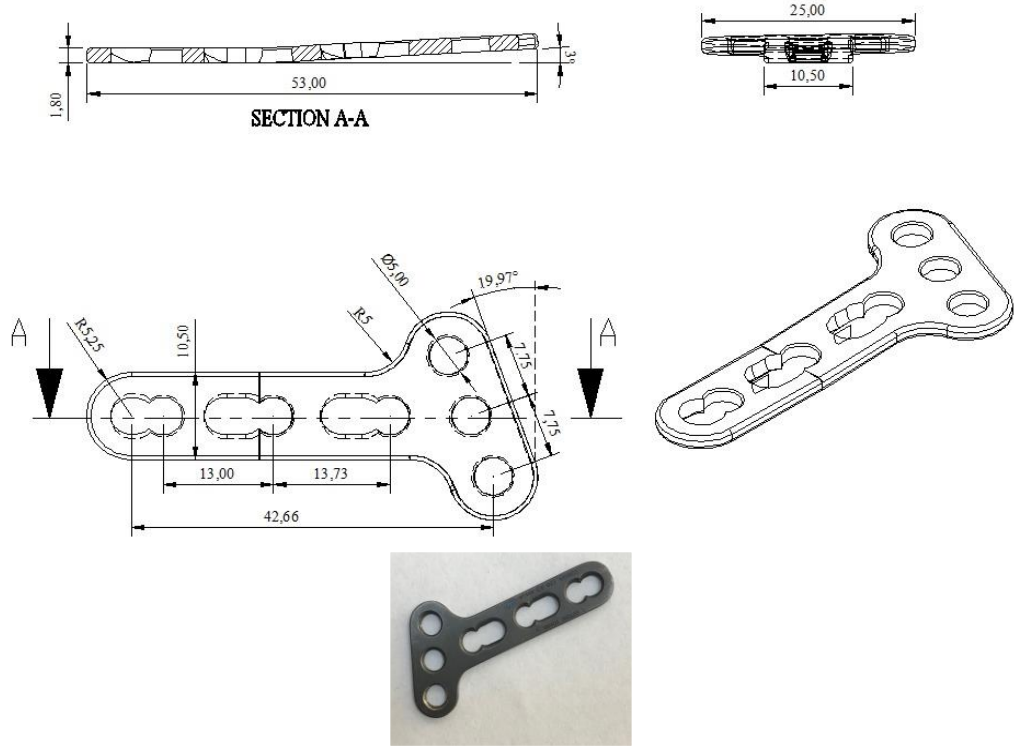
II. YÖNTEM

Modern toz metal endüstrisinde, demir ve demir dışı ham parçaların gözenekliliğini belirleyebilen hızlı, yaygın kullanımı olan bir enstrümana ihtiyaç vardır. Endüstride, sinterlenmiş ya da ham parçanın kusurlarını tespit edebilen hızlı, tahribatsız muayene mekanizması bulunmamaktadır. TEK ile üretilen "ham parçaların" gözenekliliğini izlemek ve mikroskobik çatlakları belirlemek için DR cihazı kullanılarak ileri bir imalat yöntemi olan metal enjeksiyon kalıplama yöntemine bir yaklaşım getirilmiş olacaktır. Kusurların boyut ve yerini belirten bileşen için yoğunluk haritası bir veri tabanında saklanmakta ve TEK için kalıp ve kalıp tasarımlarını optimize etmek için iyileştirmeyi ve kolaylaştırmayı sağlayacaktır. "Ham Parça" kusurlarının sinterlemeden önce tespit edilmesi, güvenilir ve erişilebilir bir denetim aracının bulunmasını sağlayacaktır. Bu özgün katkı toz metal firmalarının rekabet gücünü önemli ölçüde artıracaktır. Parçaların üretimi ve kontrolü ile ilgili maliyetleri azaltma ve toz enjeksiyon parçalarının daha üstün özelliklerde imalatını sağlayacaktır [17]. Şekil 1'de literatür çalışmasında [18] enerji ve zaman kaybına neden olan ve sinterleme sonrası başarısız olan numune görüntüleri verilmiştir.



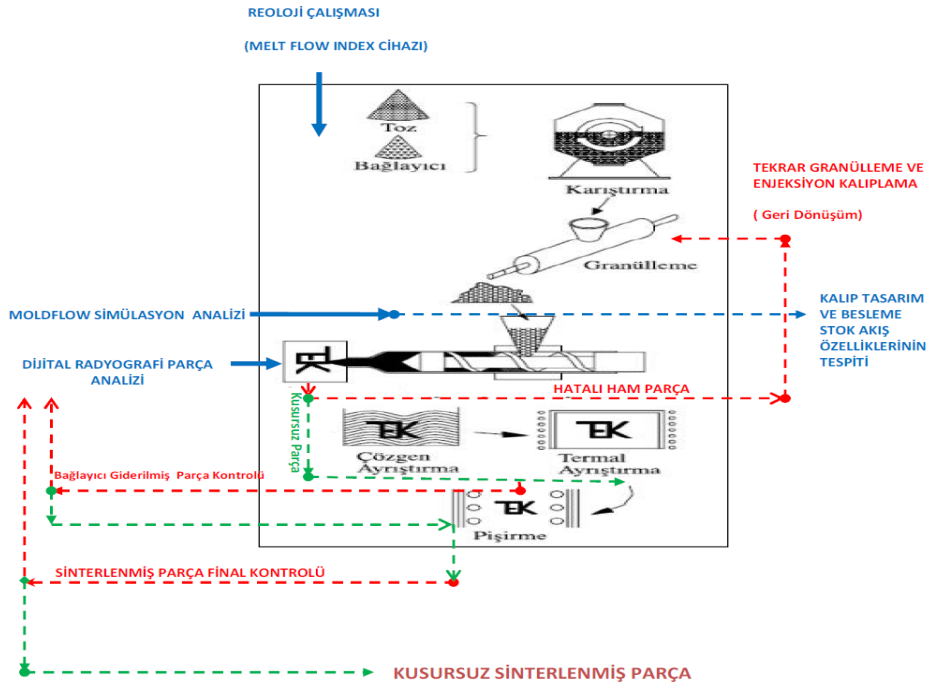
Şekil 1. Sinterleme sonrası iç kusur tespit edilen parça görüntüleri [18]

Klasik yöntemde Şekil 1'de gösterilen örneklerin ham haldeki içyapı analizleri yapılamamaktadır. Sinterleme sonrası ise meydana gelen kusurları gidermek mümkün değildir. Önerilen yöntem ile radyografi yardımıyla zamanında inceleme yapılarak ham halde hataların belirlenmesi ve geri dönüşümünün sağlanması hedeflenmektedir. Yöntemin uygulanması ile TEK parçalarının güvenilirliğini arttıracaktır. Böylece alternatif yöntemlerle üretilen parçalarda rekabet gücünü sağlayacaktır. Yöntem; kontrol edilen ve üstün mekanik özelliklere sahip makine parçaları için yeni pazarların açılmasına katkıda bulunacaktır. Yöntemin anlaşılır olmasını sağlama açısından tasarlanmış bir ortopedik kilitleme plakası Şekil 2'de gösterilmiştir.



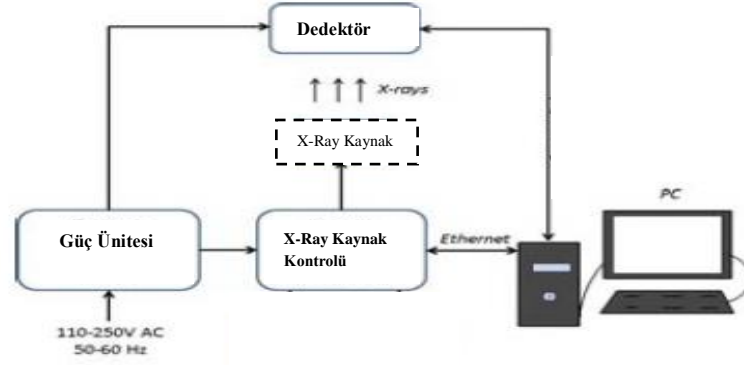
Şekil 2. Ti-6Al-4V ortopedik kilitleme plakası

Şekil 3’de klasik TEK yöntemine ilave edilen süreçler şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 3’de hatasız parça üretimi için enjeksiyon kalıplama sırasında akış analizi ve DR olmak üzere ara ve son kontrol mekanizması ilave edilmiştir. Akış analizi ile kalıp tasarımı, kalıplama parametreleri ve besleme stok özellikleri belirlenirken, dijital radyografi ile özellikle ham parça kontrolü yapılarak sinterleme öncesi adım atılmış olacaktır.



Şekil 3. DR kontrolü ile geliştirilmiş toz enjeksiyon kalıplama imalat süreci

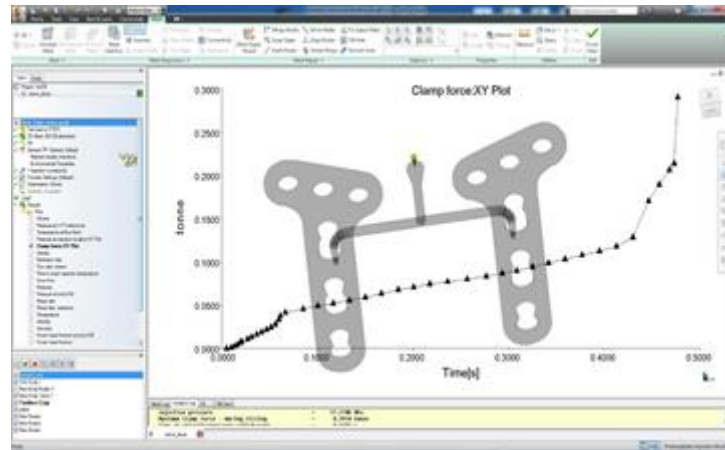
Toz Metalurjisi birçok sanayi sektörünün ana üretim sürecini oluşturmaktadır. DR cihazı titanyum enjeksiyon kalıplanacak ortopedik kilitleme plakasının ham parça için (green part); gözenek tayini ve mikro çatlak tayinin belirlenmesinde kullanılacaktır. Şekil 4'te dijital radyografi cihazı çalışma prensibi gösterilmiştir. Ti-6Al-4V ortopedik kilitleme plakası kalıplandıktan sonra ham numuneler başta olmak üzere DR cihazı ile tahribatsız muayene edilecektir. Kusursuz numuneler bağlayıcı giderme işlemine ve sinterleme işlemine tabi tutulurken hatalı parçalar tekrar granülleme ile (geri dönüşüm) farklı enjeksiyon parametrelerinde (basınç, sıcaklık, akış hızı) kalıplama yapılacaktır.



Şekil 4. Dijital radyografi cihazı çalışma prensibi [17]

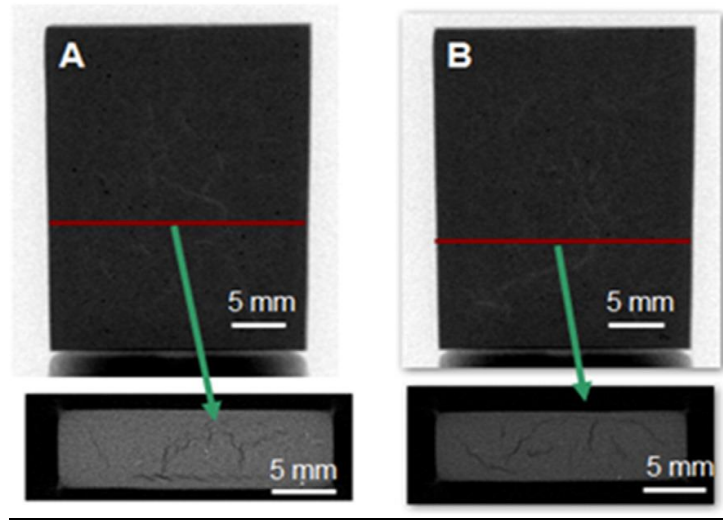
III. AKIŞ VE DİJİTAL RADYOGRAFİ ANALİZİ

TEK çalışmalarında hatalar sadece bağlayıcı giderme ile değil, homojen olmayan karışım ya da kalıp dolumu ile de oluşmaktadır. Dolayısıyla akış analiz simülasyonunun üretime geçmeden önce yapılacak olması birçok hatanın (kalıp tasarım ve imalatı, ortopedik kilitleme plakası özellikleri) önlenmesine neden olacaktır. Bunu sağlamak için besleme stoklarının reolojik özelliklerinin kullanılacak analiz programına doğru ve sağlıklı aktarılmasıyla mümkün olacaktır [19]. Deneysel verilerle elde edilmiş reolojik veriler analiz programının daha sağlıklı çalışmasını sağlayacaktır. Autodesk Moldflow Simulation programı ile en uygun besleme stoğu (TGA, DTA ve PVT analizleri akış simülasyonunda etkili olacaktır) belirlenecektir. Dolayısıyla besleme stokundaki toz/bağlayıcı oranı termal ve fiziksel özellikleri değiştireceği için akış simülasyonu yapılacak ve yorumlanacaktır. Program sayesinde hatalı kalıp üretimi ve kalıplanan parçadaki gözenek, çatlak oluşumu, eğilme ve çarpılma hataları ortadan kaldırılacaktır. Optimum enjeksiyon kalıplama parametreleri belirlenmiş olacaktır. Şekil 5'de ortopedik bir kilitleme plakası için akış simülasyon2 örneği verilmiştir.



Şekil 5. Ortopedik bir kilitleme plakası için akış simülasyon analizi [20]

Şekil 6'da X-ışını tomografik ile incelemesi yapılmış ham numuneler üzerinde hatalar gösterilmiştir. Örnek olarak 100 MPa'lık bir enjeksiyon basıncı, 50 cm³/s'lik bir hız ve 165 °C'lik bir sıcaklık kullanılarak elde edilen numuneler için X-ışını tomografik taraması yapılmak üzere denemeler yapılmıştır.



Şekil 6. X-ray tomografi ile yapılan ham parça analizleri [21]

Dijital radyografi yardımı ile enjeksiyon parametrelerinin değişimi ile (basınç, hız ve sıcaklık) ham parçada meydana gelen farklılıklar literatürde kullanılan X-ışını cihazına göre daha sistematik olarak elde edilecektir. Dijital radyografi olmadan yapılacak enjeksiyon kalıplama işlerinde basınç, hız ve sıcaklık değişkenleri deneme yanılma yöntemi ile gerçekleştirilecek ve sinterleme sonrası uygun parametreler belirlenmiş olacaktır. Düşük sıcaklıklar da büyük gözenek ve çatlak ortaya çıktığı, hızın düşmesiyle gözenek miktarının arttığı, yüksek basınçlarda ise jetting' den (püskürme) dolayı kalıp dolumu sırasında hatalar meydana gelmektedir. Tüm bu kusurların çalışmada önerilen yöntem ile giderilmesi hedeflenmektedir. Hem akış analizleri hem de tahribatsız muayene ile sinterleme öncesi kusursuz numuneler üretmek için önemli bir adım atılmış olacaktır.

IV. SONUÇ

Çalışma kapsamında toz enjeksiyon ile kalıplanabilecek tüm makine parçaları için Dijital Radyografi yardımıyla bir kontrol sürecinden geçirilmiş olacaktır. Toz Enjeksiyon ile kalıplanmış 'ham Titanyum alaşımlarının (ortopedik kilitleme plakası)', Tahribatsız Muayene yöntemiyle gözenekliliğini izlemek ve mikroskobik çatlakları belirlemek suretiyle sinterlenmiş parçaların mekanik özellikleri açısından daha güvenli olmasını sağlayacaktır. Yöntemin bir diğer avantajı her türlü TEK parçasına uygulanabilmesidir. Endüstriyel uygulamalarda sistem doğrudan üretim hattına entegre edileceğinden hatalı parçaları gerçek zamanlı olarak tespit etmek mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Hangai Y., Takahashi K., Yamaguchi R., Utsunomiya T., Kitahara S., Kuwazuru O., N.Yoshikawa , "Nondestructive observation of pore structure deformation behavior of functionally graded aluminum foam by X-ray computed tomography", *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 556, pp. 678-684, 2012.
- [2] Landis E.N. Keane, D.T., "X-ray microtomography", *Mater. Charact.*, vol. 61, pp. 1305-1316, 2010.
- [3] Tsarouchas D. , Markaki A.E. , "Extraction of fibre network architecture by X-ray tomography and prediction of elastic properties using an affine analytical model", *Acta Mater.*, vol. 59, pp: 6989-7002, 2011.

- [4] Isaac A. , Sket F. , Reimers W. , Camin B. , Sauthoff G., Pyzalla A.R. , “In situ 3D quantification of the evolution of creep cavity size, shape, and spatial orientation using synchrotron X-ray tomography”, *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 478, pp. 108-118, 2008.
- [5] Kastner J., Harrer B., Degischer H.P., “High resolution cone beam X-ray computed tomography of 3D-microstructures of cast Al-alloys”, *Mater. Charact.*, vol. 62, pp. 99-107, 2011.
- [6] Olmos L., Bouvard D., Salvo L., Bellet D., Michiel M.D., ”Characterization of the swelling during sintering of uniaxially pressed copper powders by in situ X-ray microtomography”, *J. Mater. Sci.*, vol. 49, pp. 4225-4235, 2014.
- [7] Weber O., Rack A., Redenbach C., Schulz M., Wirjadi O., “Micropowder injection molding: investigation of powder-binder separation using synchrotron-based microtomography and 3D image analysis”, *J. Mater. Sci.*, vol. 46, pp. 3568-3573, 2011
- [8] Heldele R., Rath S., Merz L., Butzbach R., Hagelstein M., Haußlt J., “X-ray tomography of powder injection moulded micro parts using synchrotron radiation”, *Nucl. Instrum. Methods B*, vol. 246, pp. 211-216, 2006.
- [9] Fang W., He X.B., Zhang R.J., Yang S.D., Qu X.H., “The effects of filling patterns on the powder–binder separation in powder injection molding”, *Powder Technol.*, vol. 256, pp. 367-376, 2014.
- [10] Zoya, Z.A., Krishnamurthy, R., "The Performance Of Cbn Tools In The Machining Of Titanium Alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 100, pp. 80-86, 2000.
- [11] Rahman, M., Wang, Z.G., Wong, Y.S., "A Review On High-Speed Machining Of Titanium Alloys", *JSME International Journal Series C*, vol. 49 (1), pp. 11-19, 2006.
- [12] Motorcu, A. R., "Nikel Esaslı Süper Alaşımların Ve Titanyum Alaşımlarının İslenebilirliği", *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 25(1-2), pp. 302-330, 2009.
- [13] Yaszemski MJ, Trantolo DJ, Lewndrowski KU, Hasircı V, Altobelli DE, Wise DL., "Biomaterials In Orthopedics", Marcel Dekker, New York, 2004.
- [14] Hsu RWW, Yang CC, Huang CA, Chen YS., "Electrochemical Corrosion Properties Of Ti-6al-4v Implant Alloy İn Biological Environment" *Materials Science and Engineering: A*, vol. 380(1–2), pp. 100–109, 2004.
- [15] Reclaru L, Lurf R, Eschler PY, Meyer JM., "Corrosion Behavior Of A Welded Stainless-Steel Orthopedic Implant", *Biomaterials* vol. 22, pp. 269-279, 2001.
- [16] Niinomi, M., Hattori, T., Niwa, S. "Material Characteristics and Biocompatibility of Low Rigidity Titanium Alloys for Biomedical Applications", Marcel Dekker, Biomaterials in Orthopedics, 2004.
- [17] Dira-Green, X-Ray Control Technology: İnternet adresi: <https://www.brunel.ac.uk/research/Institutes/Institute-of-Materials-and-Manufacturing/Structural-Integrity/Brunel-Innovation-Centre/Staff-CVs/Projects/DIRA-GREEN/> , 2018.
- [18] Urtekin L., “Toz Enjeksiyon Kalıplanmış Steatit Seramiklerin Özelliklerine Kalıplama Ve Sinterleme Parametrelerinin Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.
- [19] Katea K.H., Ennetib R.K., Onbattuellic V.P. "Feedstock Properties And Injection Molding Simulations Of Bimodal Mixtures Of Nano Scale And Micro Scale Aluminum Nitride", *Ceramics International*, vol. 39(6), pp. 6887-6897, 2013.
- [20] Urtekin L., “Titanyum Esaslı Kitleme Plakalarının Toz Enjeksiyon Kalıplama Süreci”, Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi., vol. 31, pp. 1-8, 2016.
- [21] Yang S., "Optimization and evaluation of metal injection molding by using X-ray tomography", *Materials Charecterization*, vol. 104, pp. 107-115, 2015.