

Simülasyon Destekli Örnek Bir Tasarım ile Döküm Hatalarının Engellenmesi ve Maliyetlerin Düşürülmesi

An Example Simulation-Assisted Design Preventing Casting Errors and Reducing Costs

Erhan ÖZKAN
Dikkan AR-GE Merkezi, İzmir

Doi: 10.51764/smutgd.1208009

ÖZET

Geliş Tarihi :23.11.2022

Kabul Tarihi :27.05.2023

Bu makalede enerji sektöründe yaygın olarak kullanılan bir komponente ait kum kalıba döküm prosesinde yolluk tasarımına bağlı olarak hatasız bir ürün elde edilmesine yönelik döküm simülasyon işlemleri ve bu işlemlerin gerçek döküm uygulamasına ait çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Döküm ürünü geometrisinin ihtiyaçlarına uygun olan tahliye ve yolluk sistemlerinin tasarımı yapılmıştır. Solidworks ile tasarım simülasyonları gerçekleştirilmesini takiben Anycasting simülasyon programı kullanılarak katılaşma, dolum-zaman-sıcaklık analizleri ile mikro ve makro çekintilerin simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları ele alınarak yolluk-tahliye mekanizmaları yenilenmiştir. Farklı yapıda tasarlanan tahliye-yolluk sistemleri için gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları araştırılarak mukayese yapılmış ve prototip imalat sonuçları değerlendirilmiştir. Simülasyon sonuçları döküm prosesinde yolluk tasarımının ürün kalitesine doğrudan etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Yolluk tasarımlarının yenilenmesi neticesinde makro-mikro çekinti ile birlikte dolum süresi ve akış hızları değerlerinde de azalma görülmüştür. Simülasyon çalışmaları neticesinde döküm esnasında oluşması muhtemel hatalı parçaların üretimi ve kusurlu kalıp tasarımının önüne geçilmesi mümkün olacak ve parça başına düşen üretim maliyetleri azalacaktır.

Anahtar Kelimeler: Döküm, Kalıp, Yolluk, Simülasyon Destekli Tasarım.

ABSTRACT

In this article, casting simulation processes for obtaining an error-free product depending on the runner design in the sand mold casting process of a component that is widely used in the energy sector and the real casting application of these processes are carried out. The runner and discharge system were designed in accordance with the casting product geometry. Following the design simulations with Solidworks, solidification analysis, filling analysis, temperature distribution and macro-micro shrinkage simulations were performed with the Anycasting simulation program. The runner and discharge mechanism have been updated depending on the simulation results. The simulation results for two different runner and discharge systems were by comparing to each other, and these results were compared with real casting materials. The simulation results reveal that the runner design in the casting process has a direct effect on the product quality. It was observed that macro-micro shrinkage, filling time-flow rate values decreased concerning on the runner design. With the simulation results, it will be possible to prevent the production of defective parts and wrong mold design that may occur during the casting process, and to reduce the production costs per part.

Keywords: Casting, Mould, Runner, Simulation Assisted Design.

1. GİRİŞ

Döküm, sıvı metalin bir kalıp içerisinde katılarak parça imalatına olanak sağlayan bir üretim şeklidir (Doehler, 1974). Bilinen en eski döküm yöntemi olan kum kalıba döküm düşük üretim maliyetleri sebebiyle yaygın olarak tercih edilmektedir (Vinarçık, 2003). Kum kalıba döküm yöntemi, sıvı metal yolluğu ve kalıplamalarda gerçekleştirilecek revizyonlar ile yüksek adetli üretimlerin gerçekleştirilmesine olanak sağlanmaktadır (Yüksel ve Güloğlu, 2009). Bu sebeple farklı geometrilere sahip malzemelerin geleneksel kum kalıba döküm yöntemiyle üretimlerde maliyet düşürme çalışmaları ile kalite iyileştirme faaliyetlerinde Ar-Ge çalışmalarının yapılması bir zorunluluk haline gelmiştir (Koru, 2009). Kum kalıba döküm sürecinde kalıp ve yolluk tasarımının yanında pek çok parametre final ürünün kalite ve maliyetini doğrudan etkilemektedir (İpek ve Koru, 2009).

İmalat proseslerinde bilgisayar destekli simülasyon programlarından yaygın olarak faydalanılmaktadır (Imwinkelried, ve Homberger, 2001). Döküm simülasyon programlarının sağladığı avantajlar ile daha düşük maliyetli, kolay tasarım ile deneme-yanılma yoluyla gerçekleştirilen çalışmaların önüne geçilmiş ve yüksek verim elde edilmiştir (Çolak ve Kayıkçı, 2010). Programın ana hedefi, döküm işlemi sırasındaki ergimiş metalin akış esnasındaki katılma metalurjisinin simülasyonunu sağlamaktır (Arda ve Kayıkçı, 2006). Simülasyon programları ile sistem içerisindeki akış, katılma hızı, gerilim dağılımı, gözenek, gaz boşluğu gibi başlıklarda analizler gerçekleştirilebilmektedir (Savaş vd., 2005). Bu şekilde prototip üretime geçmeden önce parametreler tespit edilerek ilk deneme dökümünde istenilen sonuçların elde edilmesi mümkün olacaktır (Marques, 2006).

Uluslararası pazarda döküm sisteminin modelini ortaya koyan çok sayıda yazılım ile simülasyonlar geliştiren global firmalar bulunmaktadır (Boydak, 2007). Döküm sektöründeki rekabetçi ortam sebebiyle dökümle üretim yapan firmalar müşteri taleplerini yerine getirebilmek amacıyla simülasyon programları için yatırım yapmaktadırlar. Bu yatırım kalemlerinin yüksek maliyetleri ileride sağladığı faydaya kıyasla çok kısa sürede kendisini amorti etmektedir (Gözen, 2007). Bu yatırımı gerçekleştiren firmalar ürettikleri nitelikli ürünler ve azalan fire oranlarıyla elde edilen düşük maliyetleri ile kısa sürede kar edecek duruma geleceklerdir (Uludağ, 2007). Dökümhanelerde üretimin her aşamasında görev alan çalışanlar ve destek departmanları ürünleri kısa sürede müşteriye talep edilen şekilde ulaştırmakla yükümlüdür. Bu sebeple gerçekleştirilecek simülasyon çalışmaları kritik öneme sahiptir (Seo vd., 2007). Döküm simülasyonunda kullanılacak programlardan verim alınabilmesi için üretim parametrelerinin çok iyi tespit edilmiş olması gerekmektedir (Yan vd., 2007). Bu şartlara göre simülasyon yazılımlarının üretime entegrasyonu önem arz etmektedir. Kullanılan döküm simülasyon programının dökümhane şartlarına göre entegre edilmesi gerekir. Bu durumu daha da netleştirmek adına aşağıdaki maddelerin uygulanması önem arz etmektedir;

- Dökülecek malzemenin kimyasal kompozisyonu ile simülasyon programında yer alan kütüphanedeki malzeme bilgileri birebir aynı veya çok yakın olmalıdır,
- Kalıplama kumu karakterizasyonu programda seçilmelidir,
- Kumun fiziksel ve metalurjik özellikleri tespit edilmelidir,
- Döküm parçasındaki filtre, gömlek gibi bileşenler tanımlanmalıdır,
- Döküm parametre verileri simülasyon programına eksiksiz bir şekilde girilmelidir.

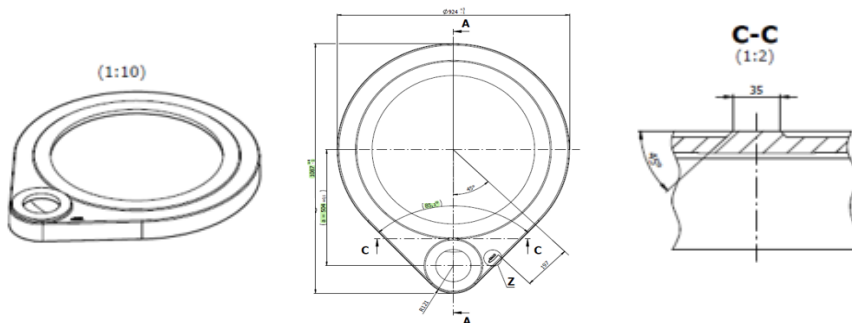
Simülasyon programları ile kalıplamaların yüksek olan maliyetleri düşürülmek suretiyle etkin ve hızlı üretimlerin gerçekleştirilmesi olanaklar dahilinde mümkün olabilmektedir ayrıca sıvı metalin sistem içerisindeki metalurjik davranışlarını gözlemlemek de kolaylıkla sağlanabilmektedir (Flender ve Hartmann, 2008).

Bilgisayar destekli tasarımların yanında teknolojik donanım uygulamalarının da artan bir şekilde geleneksel döküm yöntemlerini geliştirmeye yönelik kullanıldığı gözlenmektedir (Ayar vd., 2020). Özel donanımların kullanılması, altyapıda değişikliklere ve büyük miktarlarda ilave kumun sahada depolanmasına neden olabilir (Egal, 2021). Diğer taraftan depolanmış kumlarla üretilen ürünlerin zamana bağlı olarak kırılma yüzeylerinde hataların gözlenmesi de muhtemeldir (Hodder ve Chalataurnyk, 2019). Bu konu üzerinde özellikle uzun süre beklememiş ve yapısı bozulmamış kumla yapılan dökümlere kıyasla daha az klivaj düzlemleri, dendritik kırılma ve partikül aglomerasyonu gözlemlenmiştir (Ktari ve Mansori, 2022). Bu durumu engellemek adına üç boyutlu yazıcılarda üretilen maça tasarımları ile çözümler aranmış ancak sistemin yüksek yatırım maliyeti, karmaşık alt yapı parametreleri ve düşük üretim hızları bu sistemlerin ticarileşmesi ve yaygınlaşması konusuna engel teşkil etmiştir (Liu ve Wencai, 2019; Raikumar vd., 2021; Saxena vd., 2021). Tüm bu sonuçların irdelenmesi ile yüksek alt yapı, ilk yatırım, kurulum maliyetleri ile yavaş üretim hızı dezavantajlarını engellemek adına simülasyon programlarının yaygınlaşması ile sürdürülebilir bir gelişme kaçınılmaz hale gelmiştir (Shabani vd., 2020; Sivarupan vd., 2021; Zhenag vd., 2020).

Bu çalışmada, kum kalıba döküm yöntemi ile enerji sektöründe kullanılan bir komponentin üretilmesi için yolluk sistemi hakkında simülasyon faaliyetleri gerçekleştirilmiştir Döküm parçası birebir ölçeklerde modellenerek, ideal tahliye ve yolluk prosesinin üretim şartlarındaki karakteri Anycasting simülasyon programında gözlenmiştir. Simülasyon sonuçları detaylı bir şekilde ele alınmış, hatanın bulunduğu yerler tespit edilmiş ve yolluk tasarımları tekrar ele alınarak geliştirilmiştir. Doğrulamalar ile yeniden gerçekleştirilen simülasyonlar neticesinde hataların ortadan kalktığı tespit edilmiştir. Simülasyon sonucunda elde edilen veriler prototip imalatında gözlenerek simülasyon ve gerçek üretim sonuçları mukayese edilmiştir.

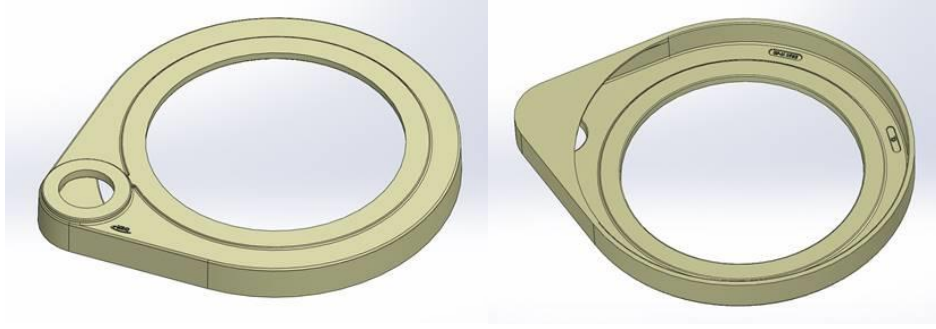
2. MATERYAL VE METOT

Dökümü gerçekleştirilecek olan parçanın tasarımları CAD (bilgisayar destekli dizayn) yardımı ile tamamlanmıştır. Bu aşama tasarım simülasyonu için veri oluşturmak adına temel oluşturmaktadır. CAD tasarımı gerçekleştirilen ürüne ait teknik resimler Şekil 1’de gösterilmiştir.



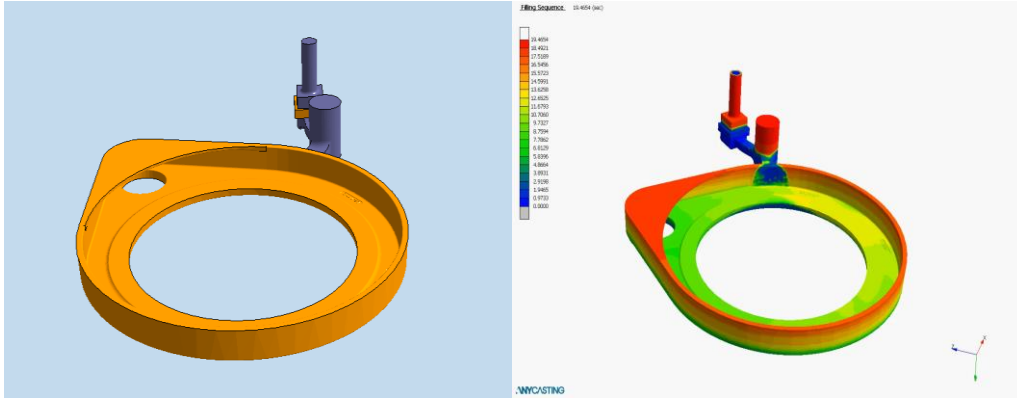
Şekil 1. Dökümü Gerçekleştirilecek Ürüne Ait CAD Çizimi

Ürün tasarımları Solidworks programında yapılmıştır. Şekil 2’de dökümü gerçekleştirilecek olan parçanın tasarım simülasyonu yer almaktadır.



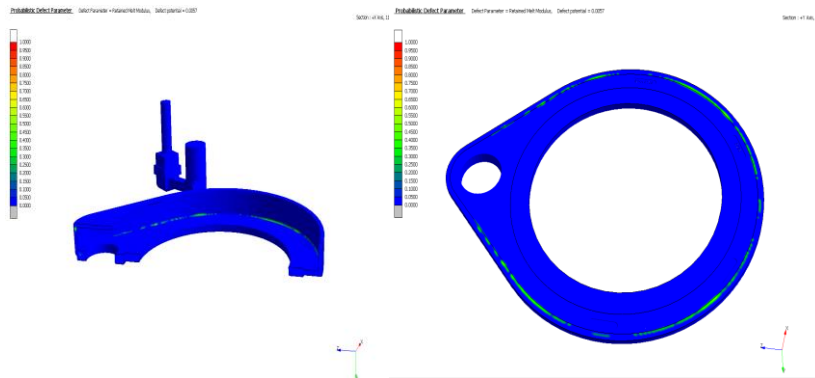
Şekil 2. Dökümü Gerçekleştirilecek Olan Parçanın Tasarım Simülasyonu

Anycasting döküm simülasyon programında tek yolluklu besleme ile tasarım gerçekleştirilmiştir. Simülasyonda malzeme GJS 500-7, net 80 kg brüt 118 kg, döküm sıcaklığı 1380 °C olarak veriler alınmıştır. Simülasyon verilerine göre döküm işlemi 19 saniyede gerçekleşmiştir. Şekil 3’te döküm simülasyonu sıcaklık ve dolun zaman analizi gösterilmiştir.



Şekil 3. Döküm Simülasyonu Dolun Zaman-Sıcaklık Analizi

Döküm simülasyonu ile mikro ve makro çekinti analizi yapılmıştır. Şekil 4’te mikro ve makro çekinti analizi yer almaktadır.

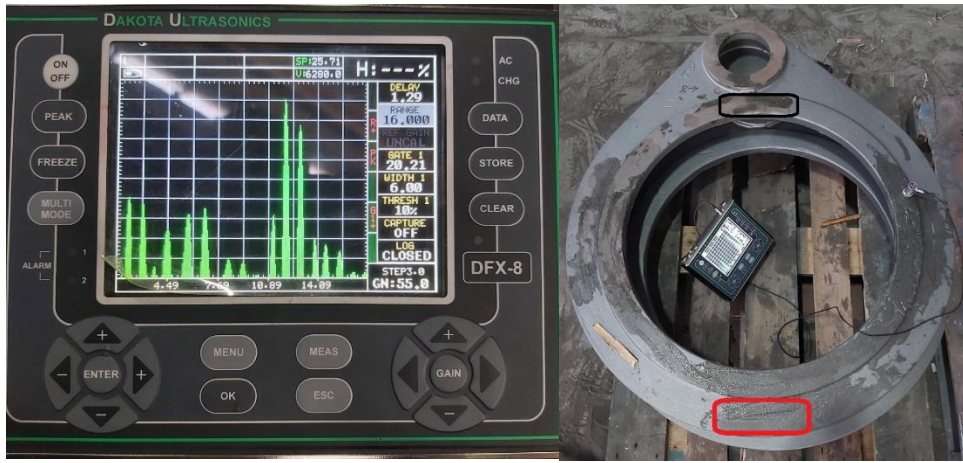


Şekil 4. Döküm Mikro ve Makro Çekinti Analizi



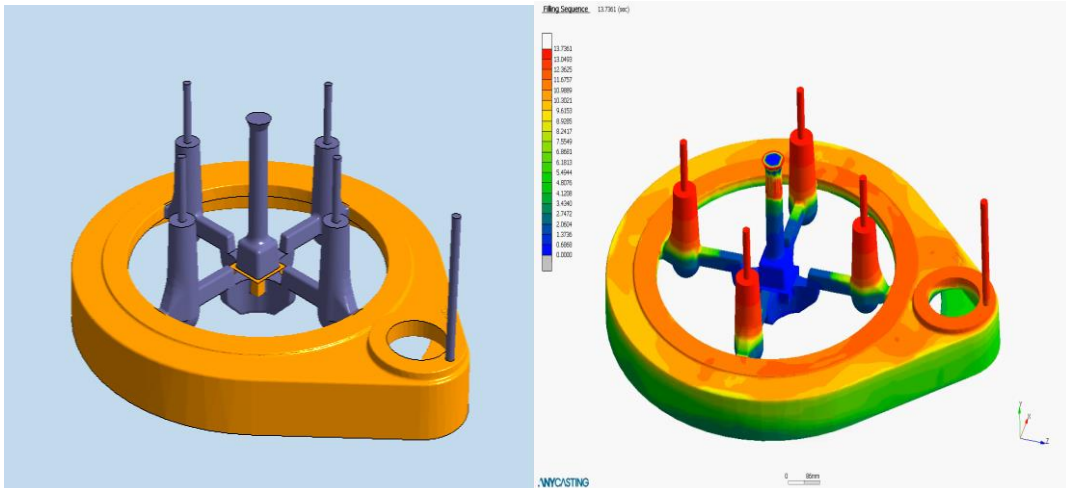
Şekil 5. Simülasyonda Çekinti Tespit Edilen Ürünlerin Gerçek Döküm Hataları

Dökümü gerçekleştirilen malzemeye ait tahribatsız muayene testleri Dakota Ultrasonics ZX-3 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Simülasyonda mikro ve makro çekintilerin gözlemlendiği bölgelerde hatalar tespit edilmiştir. Şekil 6'da döküm malzemelere uygulanan tahribatsız muayene düzeneği ve analiz sonucu yer almaktadır.



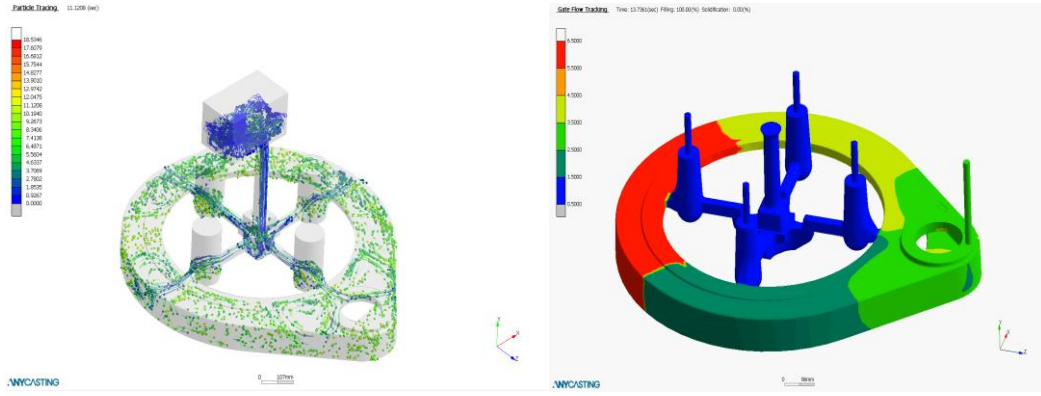
Şekil 6. Döküm Hatalarına Ait NDT Analizi

Bu hatanın engellenmesi adına ilave yollukların olduğu yeni tasarım analizleri simülasyonda gerçekleştirilmiştir. Döküm malzemesi, parça net ağırlığı ve döküm sıcaklığı aynı kalacak şekilde analizler gerçekleştirilmiştir. Yeni tasarımda brüt ağırlık 140 kg, döküm süresi ise 13 saniye olarak tespit edilmiştir. Şekil 7'de yeni tasarıma ait döküm simülasyonu dolmuş-zaman grafiği yer almaktadır.

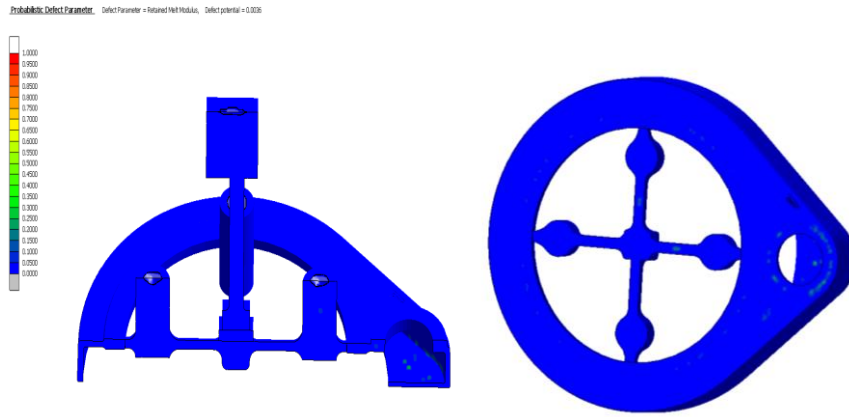


Şekil 7. Döküm Simülasyonu Dolmuş-Zaman Analizi

İyileştirilen tasarıma ait dolum hareketi parçacık izleme yöntemi ile türbülans oluşumu ve yolluk tasarım kontrolü gerçekleştirilmiştir. Şekil 8’de dolum akışı ve türbülans simülasyonu yer almaktadır.

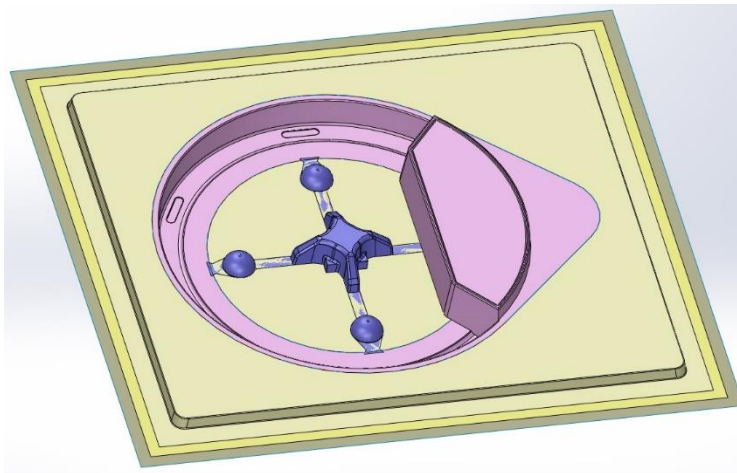


Şekil 8. Parçacık İzleme Analizi Simülasyonu

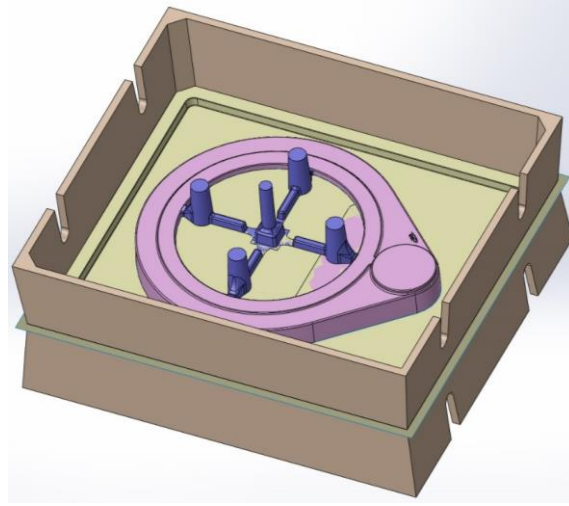


Şekil 9. Döküm Mikro ve Makro Çekinti Analizi

İyileştirilmiş tasarımın alt ve üst yolluklarına ait tasarım simülasyonu Solidworks ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 10’da döküm alt derece, Şekil 11’de döküm üst derece tasarımları gösterilmiştir.



Şekil 10. Alt Derece Tasarımı



Şekil 11. Üst Derece Tasarımı



Şekil 12. İyileştirilmiş Tasarım Modeli ve Bu Ürüne Ait Gerçekleştirilen Döküm

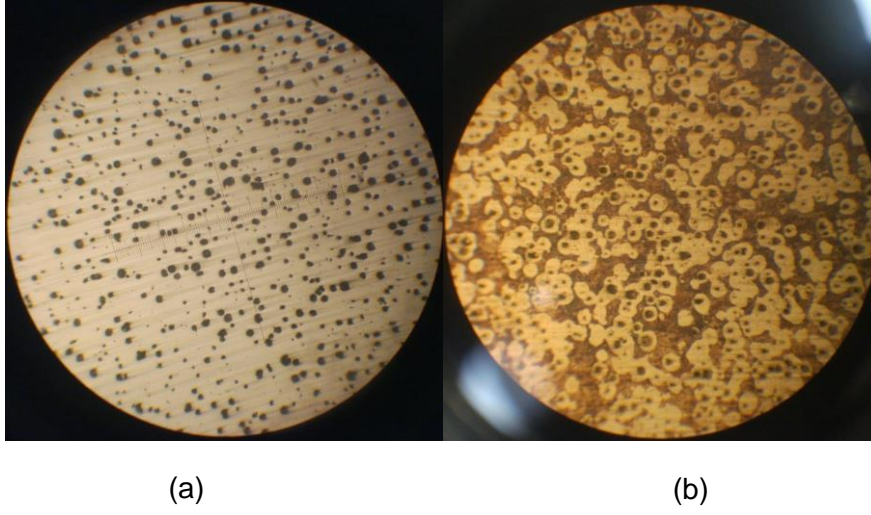
Döküm malzemesi EN-GJS 500-7 (GGG 50) olarak tasarlanmıştır. GGG 50 malzemesinin yüksek mekanik değerlere ulaşmasındaki ana sebep tam ferritik mikroyapı elde edilmesidir. Ostenit fazı içerisinde çözünen karbon ferritik mikro yapı içerisinde dağılmış olarak bulunan küresel grafit formundadır. Şekil 12’de iyileştirilmiş ürünün tasarım modeli ve bu ürüne ait döküm yer almaktadır. Döküm malzemesine ait kimyasal analiz Metavision 1008 marka spektrometre ile gerçekleştirilmiştir. Tablo 1’de GGG 50 malzemesine ait kimyasal analiz değerleri yer almaktadır.

Tablo 1. Gövde Malzemesi Olarak Seçilen GGG 50 Kimyasal Analizi

Element	Fe	C	Si	Mn	Mg	P	S
%	93,2	3,75	2,15	0,295	0,073	0,021	0,010

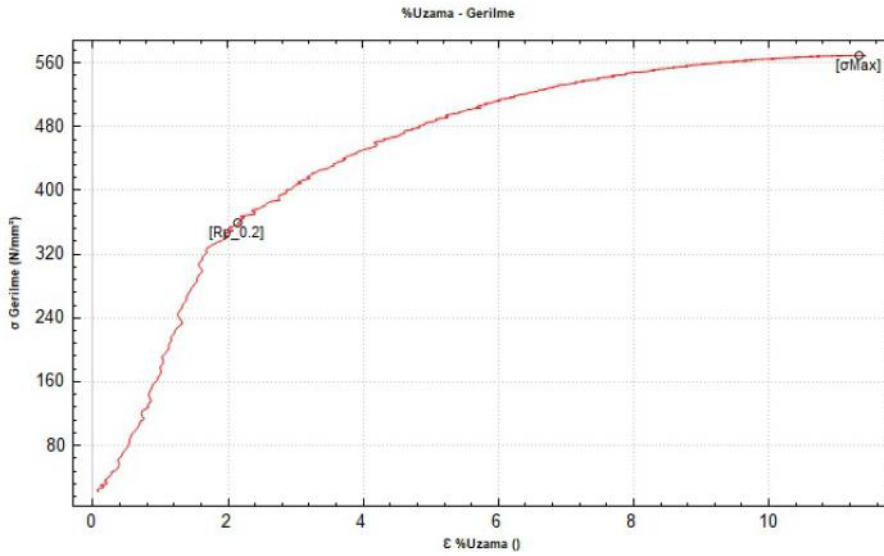
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

İyileştirilmiş malzemeye ait gerçekleştirilen metalografik analizler neticesinde parlatılmış ve %5 Nital çözeltisi ile dağlanmış mikro yapıları gerçekleştirilmiştir. Şekil 13’te 1380 °C’de dökümü gerçekleştirilmiş GGG50 malzemenin parlatılmış ve dağlanmış mikro yapı görüntüleri yer almaktadır. Literatüre göre yüksek ferrit miktarına sahip olması ve küreselliğin homojen bir şekilde dağılması beklenmektedir. Mikroyapı görüntülerine göre %45 ferrite sahip homojen dağılımlı grafitte sahip mikro yapı görüntüsü elde edilmiştir.



Şekil 13. İyileştirilmiş döküm malzemesine ait (a) parlatılmış (b)dağlanmış mikro yapı resimleri

Ürünlerin mekanik mukavemet özelliklerinin tespit edilebilmesi için çekme-kopma test cihazı kullanılmıştır. Çekme testlerinin sonuçları Şekil 14'te yer almaktadır.



Şekil 14. Çekme Testi Grafiği

Çekme testi sonucunda elde edilen grafikten çıkartılan sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir. Literatür araştırmaları ve standart taramaları neticesinde ürüne ait akma mukavemeti 300 N/mm², çekme mukavemetinin ise 500 N/mm² mertebelerinde olması uygun bulunmaktadır. Çalışma sonucunda 340 N/mm² akma mukavemeti, 560 N/mm² çekme mukavemeti elde edilerek ideal koşullar sağlanmış bulunmaktadır.

Tablo 2. Prototip İmalat Malzemesine Ait Mekanik Değerler

Fm	87.600 kN
Rm	569.17 N/mm²
L0	70.000mm
L1	78.000mm
Uzama%(Elongation)	%11.4
Rp02	359.31N/mm²
E-modul	1106.720

Döküm parçalarında karşılaşılan hataları engellemek adına yolluk tasarımı ile iyileştirilen üründe herhangi bir hata tespit edilmemiş olup %46 oranında sürede iyileşme tespit edilmiştir. Bu sayede üretim hızı artırılmış ve kalitesizlik maliyeti düşürülmüştür. Diğer tarafta brüt ağırlık %18 mertebesinde yükselmiştir. Bu artıştaki malzeme tekrar geri dönüşüm için hammadde olarak kullanılacak şekilde planlama yapılmıştır. İyileştirilmiş tasarım neticesinde yolluk ayırmak amacıyla gerçekleştirilen işçilikler %8 oranında artış göstermiş olmasına rağmen yapılan iyileştirme işletme açısından kabul edilebilir seviyede maliyet düşürme, kalite iyileştirme projesi olarak ele alınacak nitelikte kazanç sağlamaktadır. Tablo 3'te simülasyon destekli yolluk tasarımında neticesinde elde edilen verilerin karşılaştırması yer almaktadır.

Tablo 3. Simülasyon Destekli Yolluk Tasarım Veri Karşılaştırma Tablosu

Özellikler	Önce	Sonra
Malzeme	GJS 500-7	GJS 500-7
Parça Net Kg	80	80
Parça Brüt Kg:	118	140
Dolum Süresi sn:	19	13
Döküm Sıcaklığı °C:	1380	1380

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada enerji sektöründe kullanılan bir iş parçasının iki farklı yolluk sistemi ile bilgisayar destekli tasarımı, simülasyon işlemleri, prototip imalatı ve final ürünün karakterizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar destekli tasarım işlemlerinin ardından her iki tasarım için simülasyon programı ile dolum zamanı-sıcaklık, makro-mikro çekinti ve parçacık izleme analizleri ile akış hızlarına ait tespitler yapılmıştır. 2. yolluk sistemi tasarımı 1. yolluk sistemi tasarımı ile mukayese edildiğinde gerçekleştirilen çalışmaların tamamı tüm analizler için daha uygun sonuçlar vermiştir. Özellikle 2. yolluk sistemi tasarımında dolum süresi kısalmış, makro-mikro çekintilerin ortadan kalktığı gözlenmiştir. Ayrıca akış hızları mukayese edildiğinde 2. yolluk tasarımının daha olumlu sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Bu çalışmaya göre özellikle simülasyon destekli tasarımlar ile Ar-Ge prototip imalat ve tasarım doğrulama ile kalitesizlik kaynaklı fire maliyetlerinin azaltıldığı tespit edilmiş, yolluk tasarımı ile üretilen parçaların metalurjik özelliklerine doğrudan etki ettiği gözlemlenmiştir. Elde edilen bir diğer önemli sonuç ise, simülasyon ortamında bilgisayar destekli tasarımla elde edilen sonuçların prototip imalat sonuçları ile birebir örtüşüyor olmasıdır. Sonuç olarak tasarım aşamasında elde edilen simülasyon ve bilgisayar destekli tasarım faaliyetleri mühendislik uygulamalarında kritik bir öneme sahiptir.

KAYNAKLAR

- Arda, İ., Kayıkcı, R. Döküm simülasyonu nedir? Ne değildir? Metal Dünyası, 2006; 154; 144-148.
- Ayar, MS., Ayar VS., George. PM. "Simulation and experimental validation for defect reduction in geometry varied aluminium plates casted using sand casting. Materials Today: Proceedings; 2020; 27; 1422-1430.
- Boydak, Ö. An Experimental and a numerical investigation of a high pressure die casting aluminium alloy. Boğaziçi Üniversitesi Graduate Program In Mechanical Engineering, Degree Of Master, sayfa no: 121, İstanbul, Türkiye, 2007.

- Çolak, M., Kayıkcı, R. Döküm simülasyon programları üzerine bir değerlendirme, *Metal Dünyası*, 2005; 189, 2-4.
- Doehler, HH. Basınçlı döküm mesleki ve teknik öğretim kitapları. Ankara: Etüd ve Programlama Dairesi Yayınları; No:80, Erkek Teknik Yüksek Öğretmen Okulu Matbaası, 1974.
- Eqal, AK. Experimental and simulation study of solidification of commercial pure aluminium by sand casting. *Materials Today: Proceedings*, 2021; 45; 5122-5127.
- Flender, E., Hartmann, G. Modeling and simulation in high pressure die casting, *Metalworld*, 2008; 10-17.
- Hodder, JK., Chalataurnyk RJ. Bridging additive manufacturing and sand casting: Utilizing foundry sand. *Additive Manufacturing*, 2019; 649-660.
- Gözen A. Basınçlı döküm kalıplarında yolluk sistemlerinin tasarımı ve simülasyonunun incelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Müh. Anabilim Dalı, sayfa no:107, İstanbul, 2007.
- Imwinkelried, T., Homberger, H. Mould fill simulation to improve the quality of a component. *Magnesium Industry*, 2001; 39-43.
- İpek, O., Koru, M. Yüksek basınçlı döküm prosesinde kalıp sıcaklığına bağlı olarak döküm-kalıp ara yüzeyinde oluşan termal temas direncinin belirlenmesi, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 2010; 31(1); 45-57.
- Imwinkelried, T., Homberger, H. Mould fill simulation to improve the quality of a component, *Magnesium Industry*, 2001; 39-43.
- Ktari, A., and Mohamed EM. Digital twin of functional gating system in 3D printed molds for sand casting using a neural network, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2022; 1-13.
- Liu, W., et al., High temperature mechanical behavior of low-pressure sand-cast Mg–Gd–Y–Zr magnesium alloy, *Journal of Magnesium and Alloys*, 2019; 7(4); 597-604.
- Marques, MJ. CAE Techniques for casting optimization, *Instituto de Engenharia Mecanica e Gestao Industrial*, 2006, 1-4.
- Rajkumar, I., et al. Experimental and simulation analysis on multi-gate variants in sand casting process." *Journal of Manufacturing Processes*, 2021; 62; 119-131.
- Savaş, Ö., Kayıkcı, R., Cüceloğlu, E. Alüminyum-Silisyum alaşımlarının dökümünde mikro porozite probleminin incelenmesi, *Metal Dünyası*, 2005; 144; 119-123.
- Saxena, Prateek, et al. Sustainability metrics for rapid manufacturing of the sand casting moulds: A multi-criteria decision-making algorithm-based approach, *Journal of Cleaner Production*, 2021; 311; 127506.
- Seo, P.K., Kim, D.U., Kang, C.G. The effect of the gate shape on the micro structural characteristic of the grain size of Al–Si alloy in the semi-solid die casting process, *Materials Science and Engineering*, 2007; 445-446; 20-30.
- Shabani, MO. et al. Evaluation of fracture mechanisms in Al-Si metal matrix nanocomposites produced by three methods of gravity sand casting, squeeze casting and compo casting in semi-solid state, *Silicon*, 2020; 12; 2977-2987.
- Sivarupan, T. et al. A review on the progress and challenges of binder jet 3D printing of sand moulds for advanced casting. *Additive Manufacturing* 2021; 40; 101889.
- Uludağ., A. Basınçlı döküm yönteminde kalıp sistem tasarımı ve simülasyon analizi. Yıldız teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Müh. Anabilim Dalı, sayfa no:91, İstanbul, 2007.
- Vinarçık, JE. High Integrity Die Casting Processes. New York. John Wiley&Sons. 2003.
- Yan, H., Zhuang, W., Hu, Y., Zhang, Q., Jin, H. Numerical simulation of AZ91D alloy automobile plug in pressure die casting process, *Journal of Materials Processing Technology*, 2007; 187(5); 349-353.
- Yüksel, S., Göloğlu C. Metal enjeksiyon kalıplamada yolluk tasarımı sistematigi. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, 2009, Karabük Üniversitesi, Karabük.
- Zheng, Jun, et al. Effectiveness analysis of resources consumption, environmental impact and production efficiency in traditional manufacturing using new technologies: Case from sand casting, *Energy Conversion and Management*, 2020; 209; 112671.