

BİR BASINÇLI KAP EKİPMANININ SICAK DÖVME SONRASI SOĞUMA HIZINA BAĞLI MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN SİMÜLASYON İLE İNCELENMESİ

Examination of a Pressure Vessel Component's Cooling Rate Dependent Mechanical Properties After Hot Forging with Simulation

Çağlar HOCALAR
Nurşen SAKLAKOĞLU

ÖZET

Bu çalışmada bir basınçlı kap ekipmanının sıcak dövme sonrası soğuma hızının nihai ürünün mikroyapısı ile mekanik özelliklerine olan etkileri simülasyon yoluyla belirlenmiştir. Bu amaçla SimufactForming yazılımı kullanılmıştır. Dövme işlemi sonrası gerçek imalat koşullarında uygulanan soğuma şartlarında simülasyonlar yapılmış ve parçanın akma ve çekme dayanımı, oluşan fazlar, bu fazların oranları ve dağılımları tespit edilebilmiştir. Böylece yapılacak olan fiziki deneylerde oluşacak malzeme ve zaman kaybının büyük ölçüde önlenebileceği ve maliyetten tasarruf edilebileceği ortaya konmuştur. Sonuçlara bakıldığında soğuma hızı düştükçe akma ve çekme mukavemeti azalmıştır. Yüksek soğuma hızlarında beynit fazı oluşmuştur. Soğuma hızı düştükçe beynitin yerini ferrit ve perlit fazları almıştır ve bu fazlar daha homojen bir dağılım sergilemiştir.

Anahtar Kelimeler: Soğuma oranı, simülasyon, sıcak dövme, mikroalaşımli çelik, faz dağılımı

ABSTRACT

In this study, the effect of the cooling rate after hot forging of a pressure vessel equipment on the microstructure and mechanical properties of the final product was determined by simulation. SimufactForming software was used for this purpose. After the forging process, simulations were made under the cooling conditions applied in the actual manufacturing and the yield and tensile strength of the part, the phases formed, the fractions and the distributions of these phases were determined. Thus, it is revealed that the material and time loss that will occur in physical experiments can be prevented and cost saving can be provided. The results showed that as the cooling rate decreased, the yield and tensile strength were reduced. A bainite phase was formed at high cooling rates. As the cooling rate decreased, the bainite was replaced by ferrite and pearlite phase and the phases showed a more homogeneous distribution.

Key Words: Cooling rate, simulation, hot forging, microalloyed steel, phase distribution

1. GİRİŞ

Sıcak dövme, klasik ve aynı zamanda yaygın olarak kullanılan endüstriyel bir süreçtir. Avrupa'da her yıl sıcak dövme işlemleriyle milyonlarca ton çelik parça üretilmektedir [1]. Ancak günümüz teknolojileri ve bu teknoloji eşliğinde doğan ihtiyaçları karşılamak için çeşitli yollar aranmaktadır. Firmalar bu gereksinimleri karşılamak için kıyasıya bir yarış halindedir. Tabii ki bu yarış içerisinde hem hızlı olmalı hem de maliyetleri düşürmek zorundadırlar [2].

Gelişen teknolojinin ihtiyaçlarını sağlayabilmek için kullanılan dövme parametrelerine ve dövme sonrası soğutma hızına bağlı olarak çeliklerde çeşitli mikro yapılar elde etmek mümkündür [3]. Metal dövme işleminde dövme ürünün kalitesi ve performansı; sıcak dövme işleminden sonraki tane boyutu, östenitleme sıcaklığı ve soğutma hızı gibi çeşitli parametrelere büyük ölçüde bağlıdır. Mekanik işlemlerle yüksek mukavemet, daha iyi bir tokluk, daha iyi korozyon ve yorulma direncinin optimal bir kombinasyonu için uygun bir mikro yapı sağlanmakta ve bu da tamamen üstün teknolojik özellikler, daha yüksek ürün kalitesi, parçaların ve yapısal bileşenlerin daha iyi performansını sağlamaktadır [4-5]. Geleneksel yaklaşımda imalat prosedürüne deneyimlere bakılarak karar verilmekte ya da deneme-yanılma metodu kullanılmaktadır. Çoğu durumda, deneyime ve sezgiye göre seçilen proses parametrelerinin değerleri tatmin edici sonuçlar vermemektedir. Deneme-yanılma metodu ise çok sayıda deneme yapmayı gerektirdiğinden, hem uzun zaman almakta hem de yüksek maliyet gerektirmektedir. Yüksek takım maliyetleri gerektiren üretim süreçlerinde, bu deneme yanılma çabaları, ürün geliştirme aşamasının verimliliğini de önemli ölçüde azaltmaktadır. Bilgisayar teknolojilerinde ve beraberinde benzetim uygulamalarında yaşanan gelişmeler imalat sektörüne büyük kolaylık sağlamaktadır [1-6]. Sonlu hacimler ve sonlu elemanlar metodlarıyla hazırlanacak modellemeler için malzeme verileri önemli girdilerdir. Bu veriler yüksek sıcaklık mukavemeti ve gerilme-gerinim eğrileri (veya akış gerilmesi eğrileri) gibi önemli mekanik özellikler gerektirir ve birçoğu hazırda olmasına rağmen büyük bir kısmı da deneysel verilere dayanmaktadır. Ancak günümüz teknolojisinde bu verilere Bilgisayar Destekli Mühendislik (CAE) yazılımları ile kolayca ulaşılabilmektedir [7]. Malzemelerin maliyetli oluşu, zaman kaybı gibi etmenler de imalat pazarında optimizasyon için simülasyonları büyük bir ihtiyaç haline getirmiş ve bilgisayar destekli modellemelere olan ilgiyi artırmıştır [8]. Benzetim çalışmaları birçok parametrenin tek tek etkilerini ve bunların kombinasyonlarını tahmin etmeyi ve birçok adımdan oluşan süreci bile tasarlamayı mümkün kılmaktadır. Proses parametrelerinin optimizasyonu, ürün kalitesi ve imalat etkinliği artırılabilir ve imalat maliyetleri önemli oranda düşürülebilir [8-9-10]. Pek çok araştırmada sıcak dövme prosesini geliştirmek ve süreci optimize etmek üzere birçok model geliştirilmiştir. Dövülmüş parçalarda mekanik özelliklerin ve mikroyapının analiz edilmesi ve buna bağlı olarak sürecin optimize edilmesi sıcak dövme teknolojilerinde dönüm noktası olmuştur. Alaşımın kompozisyonuna ve dövme koşullarına göre mikroyapının tahmin edilebilmesini sağlayan bu analizler sıcak dövme endüstrisinde önemli gelişmeler sağlamaktadır. Mikroyapının ostenit fazından ferrit/perlit/beynit fazlarına geçişinin doğru analiz edilmesi gerekmektedir. Bunun için sonlu elementler analizine (FEM) dayanan analizler geliştirilmiştir. Bu analizlerin belirli bir soğuma hızındaki son mikroyapıyı tahmin edebilmesi için faz dönüşümlerini dikkate alması gerekmektedir [11-12].

Z.Guo ve ark. [7] proses simülasyonu sırasında gereken birçok malzeme özelliği, katılma özellikleri ve yüksek sıcaklık gerilme-gerinim eğrileri gibi dataların artık kolayca sağlanabildiğini vurgulamaktadır. Malzeme verileri, sonlu-elemanlar ve sonlu-hacimler (FE / FV) analizine dayanan bilgisayar destekli mühendislik (CAE) işlem simülasyon paketleri için hayati girdilerdir. Bu tür veriler; istenen verilerin hepsinin hazır bulunmaması ve özellikle yüksek sıcaklık özelliklerinin ölçülmesinin güçlüğü gibi sebeplerle yazılımın kütüphanesinde bulunan en yakın malzemenin seçilmesiyle elde edilmektedir. Bu problemin üstesinden gelmek ve proses simülasyonu için güvenilir ve maliyetsiz veriler sağlamak için, bu tür özelliklerin kolayca hesaplanabilen ve malzeme datası üretebilen bilgisayar tabanlı modeller gerekmektedir. Jmatpro yazılımı malzeme datası üretebilmek için hızlı ve kolay bir çözüm sunmaktadır. D. Huang ve ark. [13] sıcak dövme sırasında malzemenin tane boyutundaki evrimin öngörülebilmesi için modellemeler yapmıştır. Bu amaçla, yeniden kristalleşme ve tane büyümesi fenomenolojik yaklaşım kullanılarak modellenmiştir ve termomekanik tarihi belirleyen DEFORM yazılımı metal biçimlendirme modülünde uygulanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda tatmin edici sonuçlar alındığı vurgulanmaktadır. Süper alaşımların sıcak dövülmesi sırasındaki mikroyapı evriminin bilgisayar simülasyonu, özellikle havacılık uygulamaları için kritik bileşenlerin imalatı için büyük ilgi çekmektedir [13]. P.F. Bariani ve ark. [14] yüksek dayanımlı paslanmaz çelik türbin kanatlarının

üretimi için sıcak dövme işlemlerinin tasarımı ve optimizasyonu için sonlu elemanlar temelli sayısal simülasyonun ve gerçek malzeme bazlı fiziksel simülasyon teknolojilerinin ortak bir uygulamasını sunmaktadır. Sayısal ve deneysel sonuçlara dayanarak, gerçek dövme işlemi toplam dövme adımlarının sayısını azaltarak yeniden düzenlenmektedir. Optimize edilmiş proses parametreleri ile yürütülen endüstriyel denemeler, geliştirilen prosedürün etkinliğini göstermektedir. Spesifik dövme problemine kalibre edilmiş bir FE modelinin, fiziksel simülasyon deneyleri ile hazırlanan örnekler üzerinde sistematik bir mikroyapı analiziyle birleştirilmesinin, sıcaklıkları ve faz dönüşümünü öngörmeye etkili ve başarılı bir araç olduğu kanıtlanmıştır. Bu öngörüler ile deneysel çalışmaların sayısı en aza indirilmiştir [14].

Bu çalışmada; literatürde gerek dövme prosesinin etkileri gerekse soğuma hızı analizlerine yönelik hiç çalışma bulunmayan P285NH düşük karbonlu ve mikroalaşımli çeliğinin soğuma hızına bağlı olarak oluşacak fazlar ile akma ve çekme mukavemetleri simülasyon yoluyla incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada, ticari adı P285NH olan düşük karbonlu mikroalaşımli çelikten bir “basıncılı kap” ekipmanının üretilmesi için proses adımlarından biri olan soğuma hızı simülasyon çalışmaları yapılmıştır. P285NH malzemenin kimyasal kompozisyonu Tablo 1’de verilmiştir. Bu parçanın sıcak dövme aşamaları simülasyon çalışmaları ile daha önceki çalışmalarda optimize edilmiştir [15]. SimufactForming yazılımının sıcak dövme modülü ile elde edilen sonuçlar yine bu yazılıma ait ısı işlemler modülüne aktarılmıştır. Yazılım kütüphanesinde bulunmayan P285NH malzemesine ait sıcaklığa ve fazlara bağlı gerinim-akış eğrileri JMatPro yazılımı ile hesaplanıp SimufactForming kütüphanesine aktarılmıştır.

Soğutma işlemi firma tarafından geleneksel yöntem olarak adlandırılan kasada toplu olarak soğutma ve konveyör üzerinde fan yardımıyla soğutma olarak iki şekilde yapılmaktadır. Fan hızı ve üflenen havanın sıcaklığı gibi faktörler ile soğuma hızı kontrol edilmektedir. Firmada mevcut imalat sürecinde parçalar üzerinden sıcaklıklar ölçülerek soğuma hızları belirlenmiştir. SimufactForming ısı işlem modülü ile bu soğuma hızlarında malzemede meydana gelecek mikroyapılar, akma ve çekme mukavemetleri, kalıntı gerilmeler tahmin edilmiştir. Müşteri spesifikasyonları gereği, üretilecek olan basıncılı kap komponentinin akma mukavemeti min. 245 N/mm² ve çekme mukavemetinin 390-510 N/mm² aralığında olması gerekmektedir. Yapılan benzetim çalışmalarıyla istenen spesifikasyonlara ulaşılabilecek soğuma hızları belirlenmiştir.

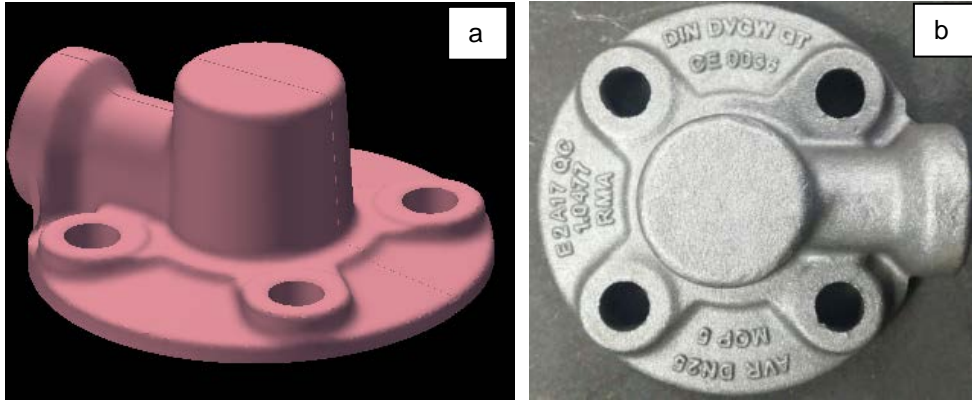
Tablo 1. P285NH malzemenin kimyasal kompozisyonu

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Al	Cu	Sn	Nb
0,10	0,20	1,08	0,009	0,002	0,13	0,01	0,07	0,01	0,025	0,04	0,003	0,0164

Simülasyon çalışmalarında esas alınan dövme parametreleri Tablo 2’de verilmiştir. Bu çalışmada simülasyon uygulamaları SimufactForming 12.0 ile yapılmış ve parçanın bir düzlemde simetrik olduğu belirlenmiş ve çözümlerin hızlandırılması için bu düzlemde simetri eksenini kullanılarak çalışmalar yürütülmüştür.

Tablo 2. Dövme parametreleri

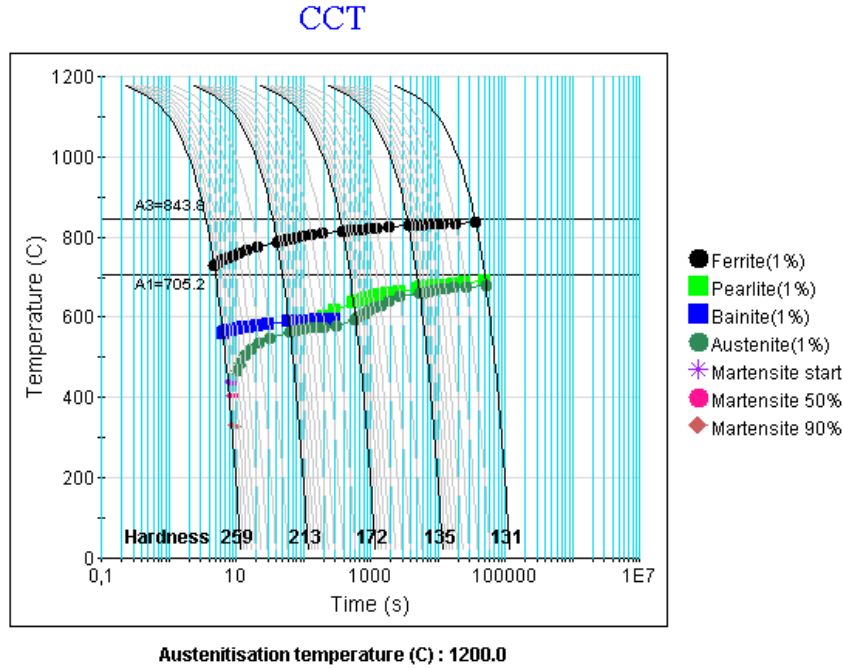
Üretim adımı	Pres devri	Kalıp Sıcaklığı, 0C	Dövme Sıcaklığı, 0C	Numune boyu, mm (çap=55 mm)	Sürtünme Katsayısı
Ön şekillendirme	60 rpm	200	1150	113	0,8
Son şekillendirme	60 rpm	200	-	-	0,3
Çapak alma	60 rpm	200	-	-	-
Delik açma	60 rpm	200	-	-	-



Şekil 1. nihai ürün (a) simülasyon, (b) gerçek

3. BENZETİM SONUÇLARI

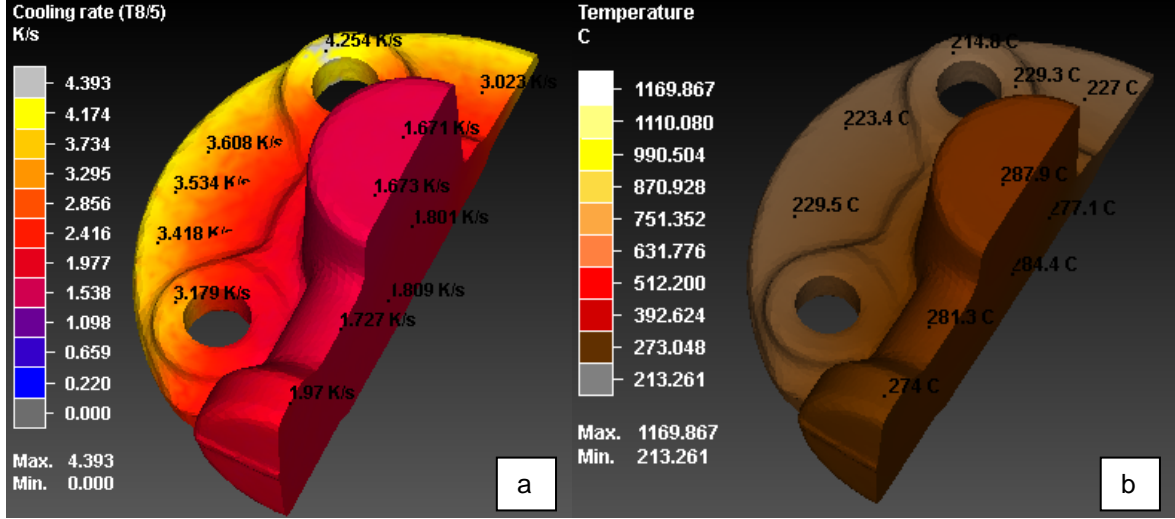
Soğutma işlemleri yapılmadan önce JMatPro yazılımı ile CCT (sürekli soğuma dönüşümü) diyagramı oluşturulmuş ve olası soğuma hızlarına karşılık gelen fazlar doğrultusunda olası mekanik özellikler tahmin edilmiştir (Şekil 2). Tüm soğuma işlemlerinde sıcaklık, malzeme için faz dönüşüm sıcaklığının altına düşene kadar devam ettirilmiştir. Şekiller kesit görüntüleri olup malzemenin simetri ekseninden alınmıştır.



Şekil 2. P285NH CCT diyagramı

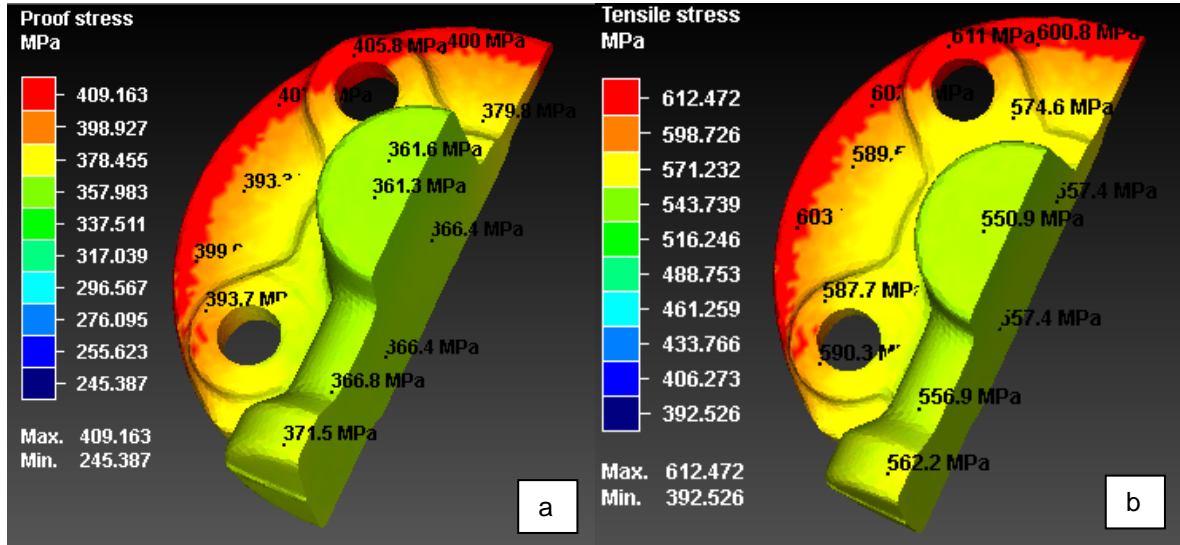
3.1. Konveyörde Soğuma Analizi

Şekil 3-a ve 3-b'de görüldüğü gibi dövme sonrası konveyörde soğutma esnasında homojen bir soğuma gerçekleşmemektedir. Hızlı soğuma sırasında malzemenin çekirdeğinden dışına doğru soğuma hızının arttığı görülmüştür. Bunun nedeni malzemenin yüzeyinde hem taşınım ile hem de iletim ile ısı akışı gerçekleşmesi, malzemenin çekirdeğine doğru sadece iletim ile ısı transferinin olmasıdır.



Şekil 3. (a) soğuma hızı, (b) anlık sıcaklık dağılımı

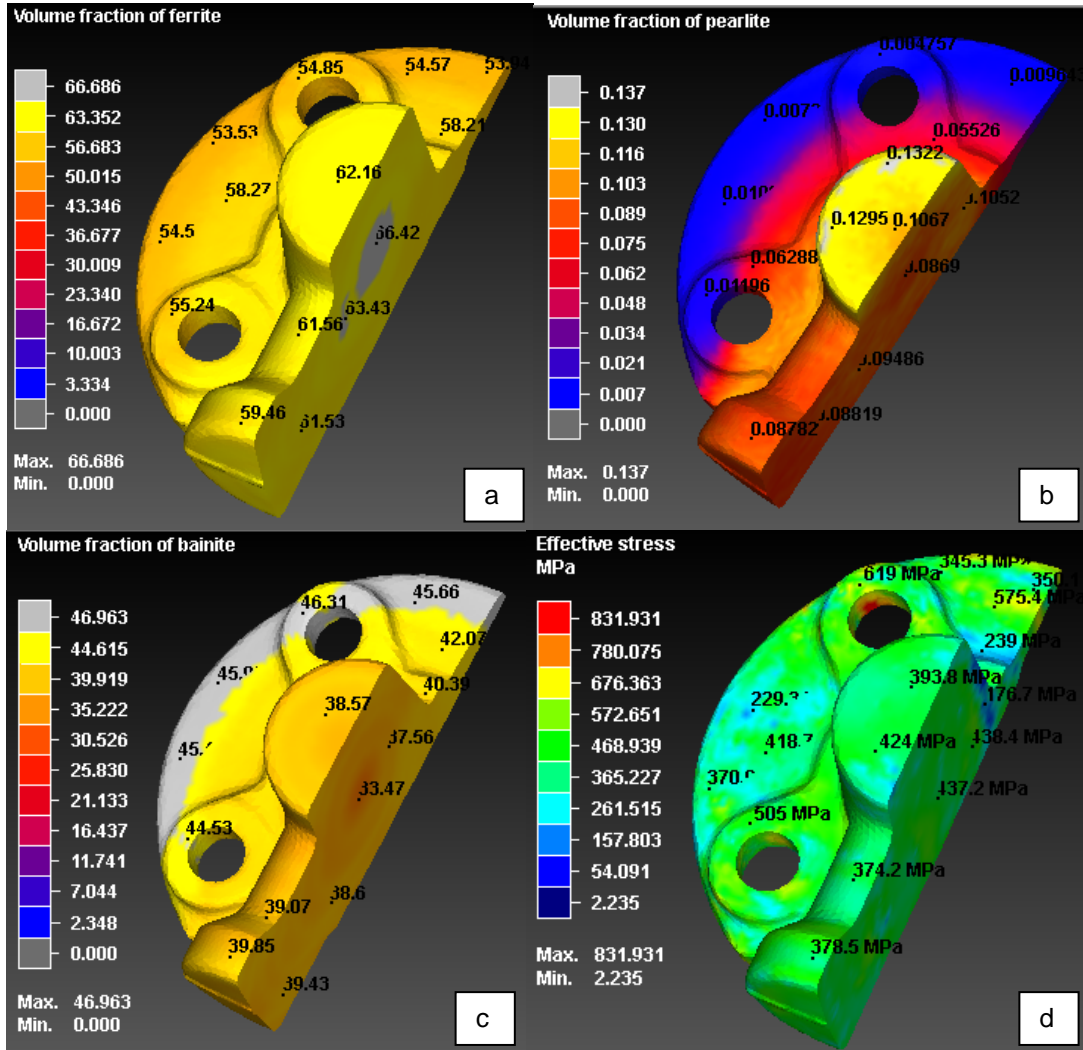
Soğuma hızına bağlı olarak CCT diyagramlarında görüldüğü gibi malzemenin içinde ve dışında farklı faz dağılımları görülmüştür. Bu faz dağılımına bağlı olarak malzemenin farklı yerlerinde farklı mukavemet değerleri gözlemlenmiştir (Şekil 4). Malzemenin kalın kesitli orta bölgesinde akma mukavemeti yaklaşık 366 MPa iken kenar bölgelerde 400 MPa'ın üzerine ulaşmıştır. Paralel şekilde orta kısımdaki çekme mukavemeti 557 MPa seviyelerinde iken, kenarda 600 MPa'dan daha yüksek değerlere ulaşmıştır.



Şekil 4. (a) akma mukavemeti, (b) çekme mukavemeti

Akma ve çekme dayanımına bakıldığında, dayanımın iç kısımlarda düştüğü ancak hızlı soğuyan dış bölgelere gidildiğinde arttığı gözlemlenmiştir. Parçadan akma dayanımının minimum 245 N/mm² ve çekme dayanımının 390-510 N/mm² aralığında olması beklenmektedir. Simülasyon çalışmaları akma dayanımı malzemenin beklenen kriteri sağlasa da çekme dayanımı beklenenden çok yüksek çıktığını ortaya koymuştur. Şekil 5'te konveyörde soğutma ile parçada oluşabilecek fazlar ve efektif gerilmeler görülmektedir. Görüldüğü gibi, parçada beyrit ve ferrit fazı hakimdir. Ferrit oranı parçanın iç kısmında yaklaşık %66'ya ulaşırken, parça kenarlarında yaklaşık % 54 civarındadır. Beyrit oranı ise parçanın iç kısmında yaklaşık %33 ve parça kenarlarında yaklaşık % 45 civarındadır. Beyrit oranının yüksek olması akma ve çekme dayanımının yüksek olmasının sebebinin açıklanmaktadır. Termal gerilmelere ve

mekanik gerilmelere bağlı olarak malzemenin akışının ve soğuma hızının yüksek olduğu kesimlerinde kalıntı gerilmelerin yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Ancak malzeme akışının ve soğuma hızının düşük olduğu iç kesimlerinde kalıntı gerilmeler oldukça düşüktür.

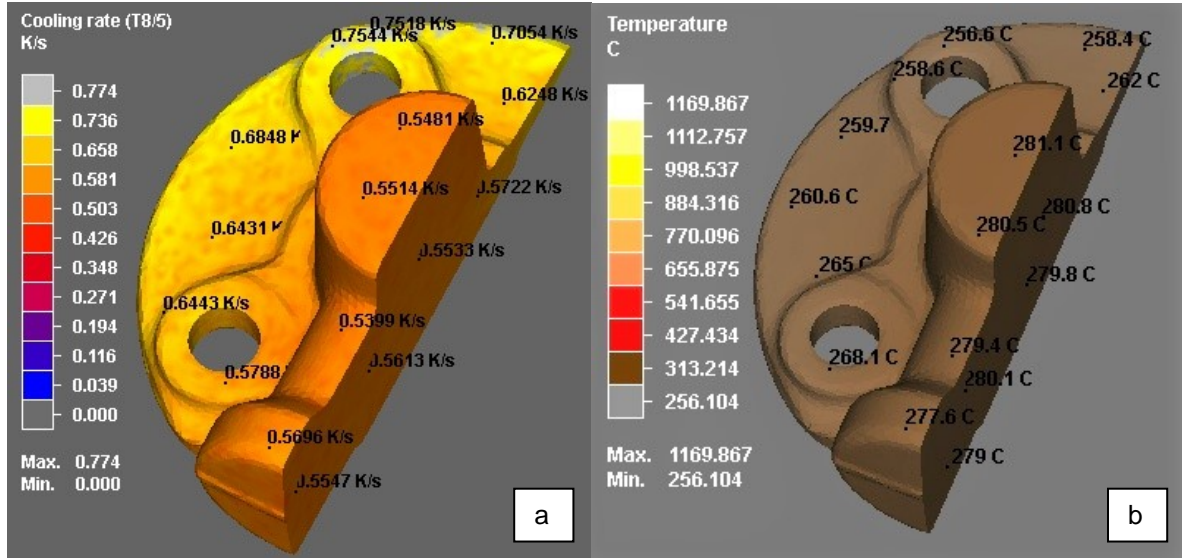


Şekil 5. (a) perlit oranı, (b) ferrit oranı, (c) beynit oranı, (d) kalıntı gerilmeler

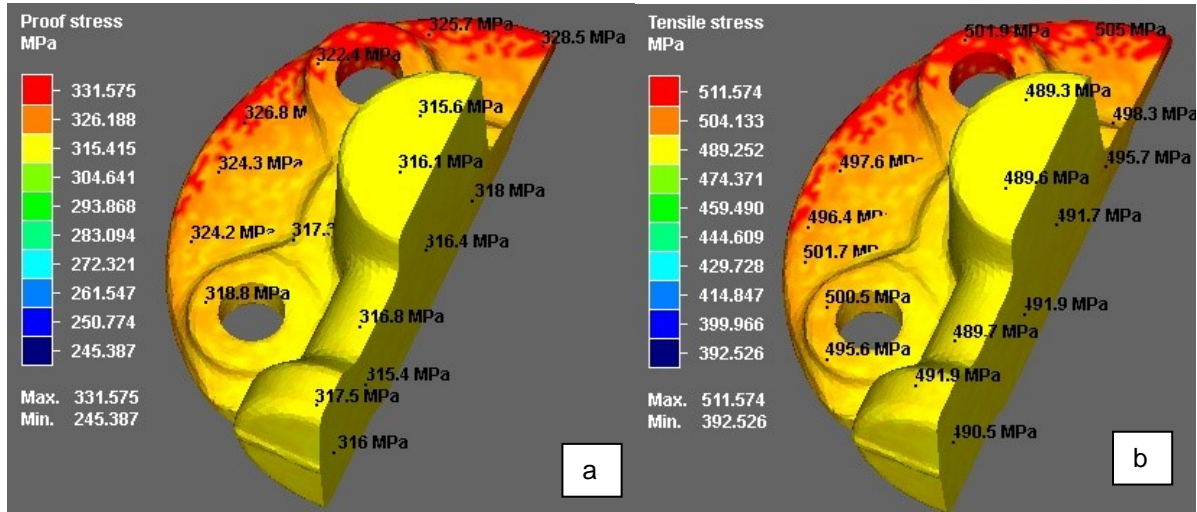
3.2. Kasada Soğuma Analizi

Bu soğuma hızında daha önce geleneksel yöntem olarak adlandırdığımız kasada soğuma ele alınmıştır. Şekil 6'da kasada soğuma analizi görülmektedir. Kasada soğutma durumunda sıcaklığın daha homojen dağıldığı ve buna bağlı olarak anlık bir sıcaklığa bakıldığında parçanın çekirdeği ile dışı arasında çok fazla fark olmadığı gözlemlenmiştir. Bu da fazların daha homojen olmasını sağlayacaktır. Şekil 7-a ve 7-b'de simülasyon çalışmasıyla elde edilen soğumaya bağlı mukavemet değerleri görülmektedir. Soğuma hızındaki homojenlik mukavemet değerlerine de yansımış, malzemede daha homojen mekanik özellikler elde edilmiştir. Akma mukavemeti iç kısmında yaklaşık 318 MPa iken kenar kısımlarında yaklaşık 325MPa'dır. Çekme mukavemeti iç kısımlarda yaklaşık 490 MPa iken kenar kısımlarda yaklaşık 500MPa'dır. Bu sonuçlara göre, akma mukavemeti istenilen değeri sağlamış ancak çekme mukavemeti parçadan istenilen üst sınıra yakın olduğu görülmüştür. Bu da simülasyonların yakınsaklığı ve deneme numuneleri üzerinden alınan verilerin doğruluğu göz önünde bulundurulduğunda güvenli değildir.

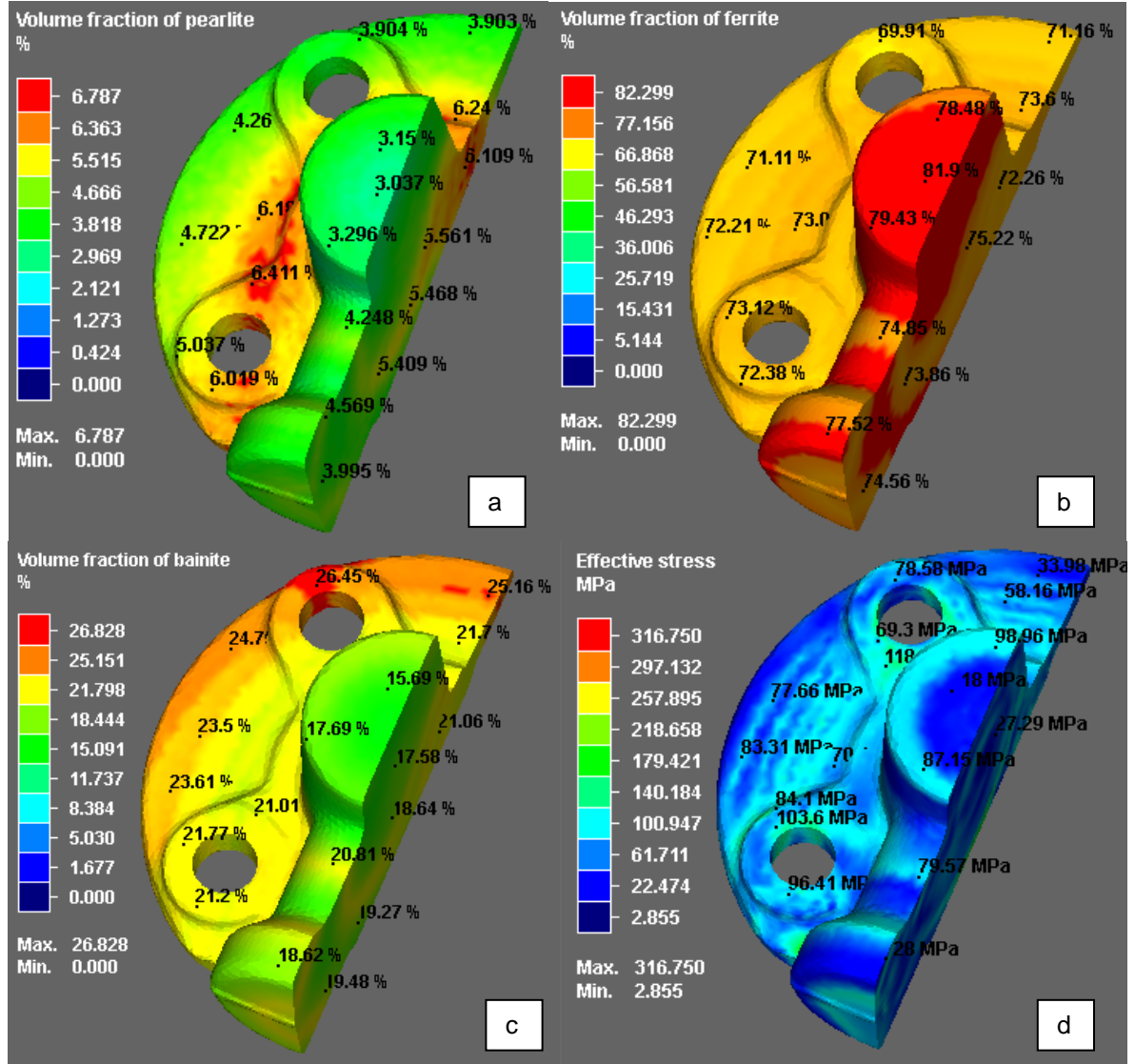
Şekil 8'de görüldüğü gibi malzemede beyrit fazı yavaş soğuyan iç kısımlarda yaklaşık %18 iken hızlı soğuyan kenar kısımlarda %24 civarındadır. Konveyörde soğumaya göre beyrit fazı yarı yarıya düşmüştür. Perlit fazında bir miktar artış gerçekleşmiş parça üzerinde dağılımı %3 ile %5 arasında değişim göstermektedir. Beyrit fazının yerini daha çok ferrit fazına bıraktığı görülmüş; ferrit fazı iç kısımlarda %80 iken kenar kısımlarda %71 civarındadır. Yavaş soğumaya bağlı olarak kalıntı gerilmeler büyük ölçüde düşmüştür.



Şekil 6. (a) Soğuma hızı, (b) anlık sıcaklık dağılımı



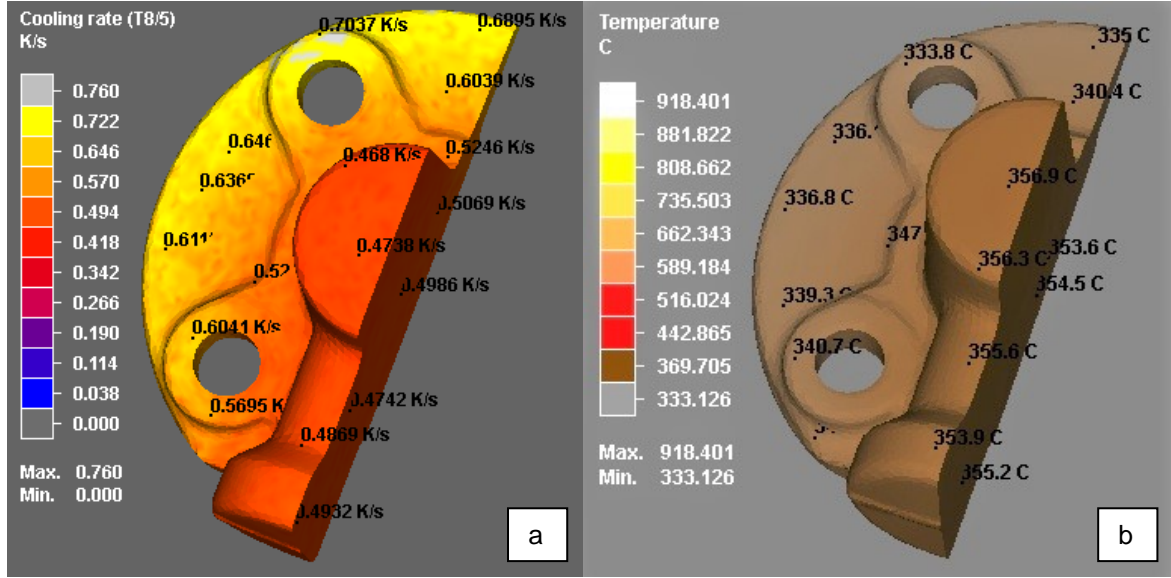
Şekil 7. (a) Akma mukavemeti, (b) çekme mukavemeti



Şekil 8. (a) Perlit oranı, (b) ferrit oranı, (c) beynit oranı, (d) kalıntı gerilmeler

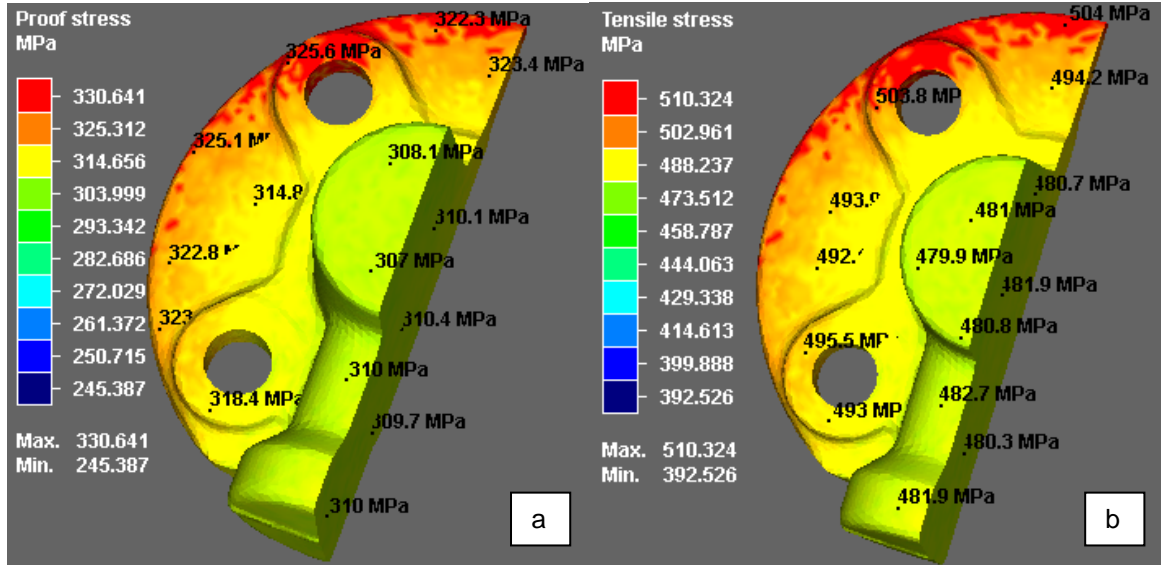
3.3. Kasada Soğuma ve Normalizasyon Analizi

Kasada ve konveyörde soğuma ile parçadan beklenen mekanik değerler elde edilemediği için malzemede hem daha homojen tane boyutu sağlayan hem de daha homojen bir faz dağılımı sağlayan normalizasyon adımına başvurulmuştur. Kasada soğutulduktan sonra normalize edilen malzeme tekrar kasada soğutulmuştur.



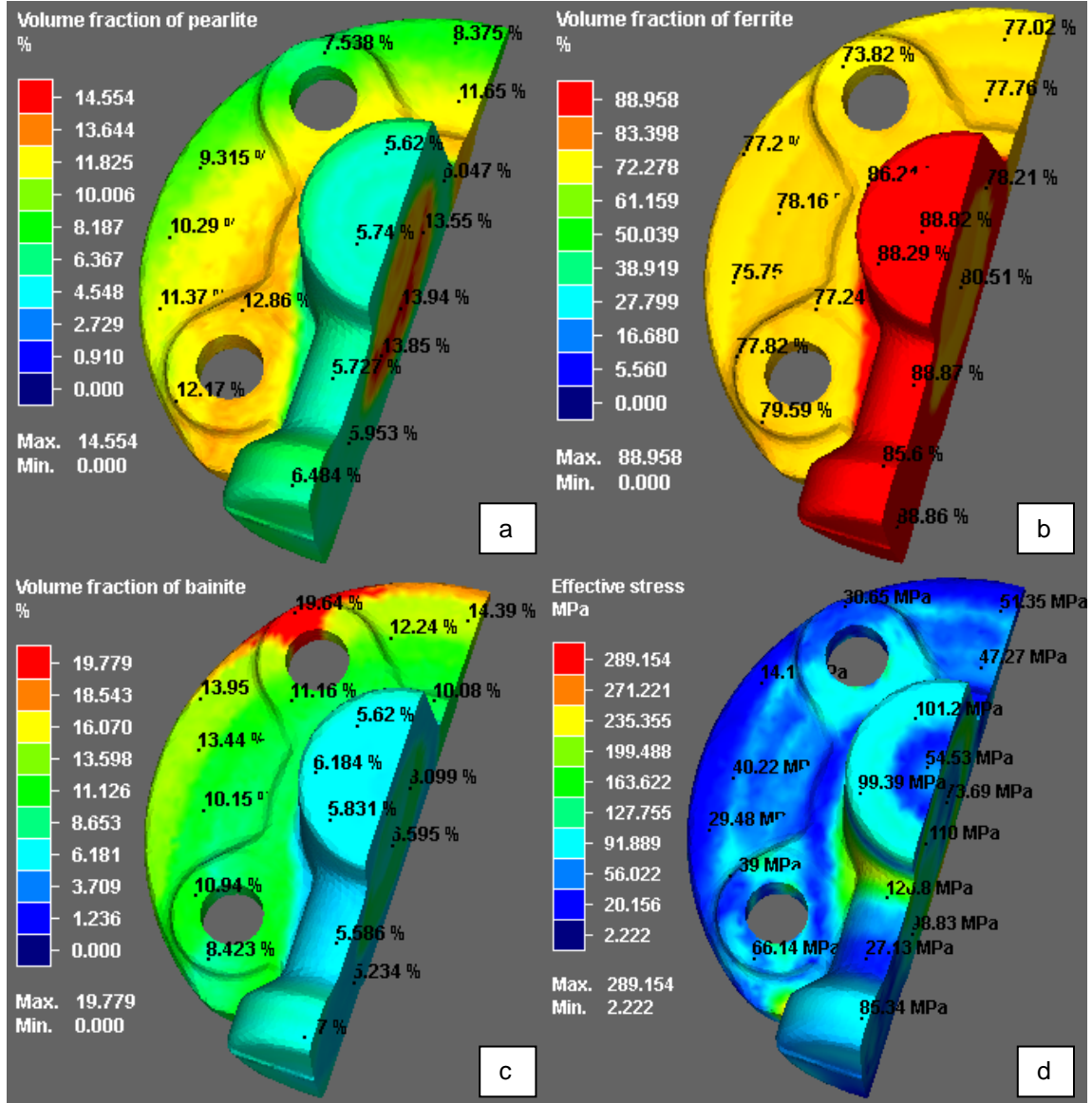
Şekil 9. Soğuma hızı, anlık sıcaklık dağılımı

Şekil 9'dan görüleceği üzere, normalizasyon sonrası malzeme kasada soğutulmuş ve dövme sonrası kasada soğumaya göre daha yavaş ve homojen bir soğuma gerçekleşmiştir. Bunun sonucunda mukavemet değerleri daha homojen gerçekleşmiştir. Simülasyon sonucuna göre, akma mukavemeti iç kısımlarda yaklaşık 310MPa iken kenar kısımlarda 325 MPa kadar ulaşmıştır. Çekme mukavemeti iç kısımlarda yaklaşık 480MPa iken kenarlarda 500 MPa civarındadır (Şekil 10-a ve 10-b); mukavemet değerleri parçadan beklenen seviyede ve güvenli bölgededir.



Şekil 10. Akma mukavemeti, çekme mukavemeti

Şekil 11'de faz dağılımına bakıldığında baskın bir ferrit fazı görülmüştür, beyrit fazı oluşumu büyük ölçüde azalmış perlit fazında da dövme sonrası kasada soğumaya göre küçük bir artış gözlemlenmiştir. Faz dağılımının homojen gerçekleşmesi, beyrit fazı oranındaki düşüş, akma ve çekme mukavemetinin istenilen sınırlarda olması doğru üretim yönteminin bu olduğunu göstermektedir. Bu homojen içyapı ve yavaş soğuma sunucunda kalıntı gerilmeler de en aza indirilmiştir.



Şekil 11. (a) Perlit oranı, (b) ferrit oranı, (c) beynit oranı, (d) kalıntı gerilmeler

SONUÇ

Simülasyon sonuçlarına bakıldığında soğuma hızının düşmesiyle mukavemetin düştüğü ancak parça üzerinde daha homojen soğuma hızlarının olduğu gözlemlenmiştir. Ancak soğuma hızının düşmesi parçadan beklenen spesifikasyonları sağlamada yetersiz kalmış, daha homojen bir içyapı için normalizasyon işlemine başvurulmak zorunda kalmıştır. Ferrit ve perlitin mikroyapı içindeki boyut ve yüzde dağılımı, nihai mekanik özellikler üzerinde önemli bir rol oynamıştır.

Soğuma hızı arttıkça daha az ferrit oluşmakta ve perlit miktarı artmakta hatta soğuma hızına bağlı olarak perlit yerine beynit fazı oluşmaktadır. Bu da malzemenin mukavemetinin artmasına ve parçadan beklenen mekanik özelliklerin sınırların üstüne çıkarak tokluğunun düşmesine sebep olmaktadır. Normalizasyon beynit fazının oluşmasını azaltmış ve ferrit miktarını artırarak mukavemet değerlerini istenen sınırlara getirmiştir.

Soğuma hızının düşmesi ile parça üzerinde kalıntı gerilmelerde ciddi bir düşüş gözlemlenmiştir. Yüksek soğuma hızında termal gerilmeler, kalıntı gerilmeler üzerindeki en büyük etkiye sahipken; soğuma hızının düşmesi ile malzeme akışının etkisi ön plana çıkmıştır. Normalizasyon adımıyla sonra malzemede hasar oluşumunun en çok beklendiği yer olan bağlantı noktaları ve çevresinde kalıntı gerilmelerin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu da nihai ürün üzerinde olumlu etki yaratmaktadır.

Sonuç olarak, SimufactForming ısı işlem modülü ile P285NH düşük karbonlu ve mikro alaşımlı çeliği için dövme sonrası soğuma hızları analiz edilebilmiş, malzemede soğuma hızına bağlı olarak sıcaklık değişimi, soğuma hızı, oluşacak fazlar, efektif gerilmeler ile literatürde çok fazla yer almayan soğuma sonrası akma ve çekme mukavemeti başarılı bir şekilde analiz edilebilmiştir. Bu analiz sonucuna göre dövme prosesi optimize edilmiştir. Bu sayede fiziksel denemeler için oluşacak malzeme ve zaman kaybı ile birlikte maliyet kaybının önüne geçilmiştir. Aynı zamanda bu bildiri ile sanayide bu tarz simülasyonların kullanımı ile elde edilecek kazançlar ortaya koyulmuştur.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Manisa Celal Bayar Üniversitesi 2017-205 No.lu BAP projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, bu çalışma kapsamında sağladığı destekler nedeniyle EGEMET EGE METAL DÖVME SAN.TİC.LTD.ŞTİ'ne çok teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] Panjan, P., Urankar, I., Navinšek, B., Terčelj, M., Turk, R., Čekada, M., & Leskovšek, V. (2002). Improvement of hot forging tools with duplex treatment. *Surface and Coatings Technology*, 151, 505-509.
- [2] Şan, S. Mikroalaşımlı Çeliklerin İşlenebilirliğinin Takım Ömrü ve Yüzey Pürüzlülüğü Açısından Değerlendirilmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Anabilim Dalı, Ankara, 2007 (Yüksek Lisans Tezi).
- [3] Ceschini, L., Marconi, A., Martini, C., Morri, A., & Di Schino, A. (2013). Tensile and impact behaviour of a microalloyed medium carbon steel: effect of the cooling condition and corresponding microstructure. *Materials & Design*, 45, 171-178.
- [4] Equbal, M. I., Alam, P., Ohdar, R., Anand, K. A., & Alam, M. S. (2016). Effect of Cooling Rate on the Microstructure and Mechanical Properties of Medium Carbon Steel. *International Journal of Metallurgical Engineering*, 5(2), 21-24.
- [5] GÜndÜz, S., & Çapar, A. (2006). Influence of forging and cooling rate on microstructure and properties of medium carbon microalloy forging steel. *Journal of Materials Science*, 41(2), 561-564.
- [6] Saunders, N., Guo, Z., Miodownik, A., & Schillé, J. P. (2004, November). Modelling the material properties and behaviour of multicomponent alloys. In *International Congress on FEM Technology with ANSYS CFX and ICEM CFD Conference*.
- [7] Guo, Z., Saunders, N., Schillé, J. P., & Miodownik, A. P. (2009). Material properties for process simulation. *Materials Science and Engineering: A*, 499(1-2), 7-13.
- [8] Schafstall, H., & Barth, C. (2010). An Innovate Approach to Automated Simulation of Full 3D Ring Rolling Process and Other Incremental Forming Processes. *steel research international*, 81(9), 202-205.
- [9] Barton, G., Barth, C., Wohlmuth, M., Schafstall, H., & Tannert, M. (2011). Praxis-orientated modeling of tool & machine elasticity in metal forming processes. *Proc. 10th ICTP, 2011*, 1270-1275.
- [10] Gronostajski, Z., Kaszuba, M., Polak, S., Zwierzchowski, M., Niechajowicz, A., & Hawryluk, M. (2016). The failure mechanisms of hot forging dies. *Materials Science and Engineering: A*, 657, 147-160.



- [11] Liu, J., Yanagida, A., Sugiyama, S., & Yanagimoto, J. (2001). The analysis of phase transformation for the prediction of microstructure change after hot forming. *ISIJ international*, 41(12), 1510-1516.
- [12] Ozturk, M., Kocaoglan, S., & Sonmez, F. O. (2016). Concurrent design and process optimization of forging. *Computers & Structures*, 167, 24-36.
- [13] Huang, D., Wu, W. T., Lambert, D., & Semiatin, S. L. (2001, November). Computer simulation of microstructure evolution during hot forging of Waspaloy and nickel alloy 718. In Proceedings of Symposium: Microstructure Modeling and Prediction During Thermomechanical Processing, Indianapolis, November (pp. 4-8).
- [14] Bariani, P. F., Bruschi, S., & Dal Negro, T. (2004). Integrating physical and numerical simulation techniques to design the hot forging process of stainless steel turbine blades. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(9), 945-951
- [15] Hocalar, Ç., Kilerci, İ., Çulha, O., Saklakoğlu, N., Demirok, Ss., Simulation based optimization of a hot forging process- an example of pressure vessel component, 1. International University Industry cooperation, R&D and Innovation Congress, Manisa-2017

ÖZGEÇMİŞ

Çağlar HOCALAR

1991 yılı Manisa doğumludur. 2015 yılında Uşak Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Bölümünü bitirmiştir. Aynı yıl Manisa Celal Bayar Üniversitesi Makine Mühendisliği, Konstrüksiyon ve İmalat alanında yüksek lisansa başlamıştır ve halen devam etmektedir. 2016 Yılından beri Manisa Büyükşehir Belediyesi'nde çalışmaktadır.

Nurşen SAKLAKOĞLU

1993 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Metalurji Mühendisliği Bölümünden lisans derecesini, 1995 yılında İstanbul Üniversitesi Metalurji Mühendisliği Bölümünden yüksek lisans derecesini ve 2000 yılında Celal Bayar Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden Doktora derecesini almıştır. Celal Bayar Üniversitesinde 1994 yılında araştırma görevlisi olarak göreve başlamıştır. 2008 yılında doçent ve 2014 yılında profesör ünvanını almıştır. Malzeme bilimi alanında çalışmaktadır.