

OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN SICAK ŞEKİLLENDİRME TEKNİĞİNİN İNCELENMESİ

Recep Muhammet Görgülüarslan*

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi,
Makina Mühendisliği Bölümü,
Ankara
rmgorgularslan@gmail.com

Mehmet Ali Güler

Doç. Dr.,
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi,
Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara
mguler@etu.edu.tr

ÖZET

Otomotiv sanayindeki yeni gereksinimler, otomobillerin yüksek dayanımlı fakat daha hafif parçalar ile üretilmesini gerektirmektedir. Son zamanlarda yaygınlaşmaya başlayan ve yüksek mukavemetli çelikler kullanılan ve östenitleşme sıcaklığının üzerinde bir sıcaklıkta gerçekleştirilen sıcak şekillendirme işlemi, son derece dayanıklı, daha hafif ve doğru geometriye sahip parçaların üretilmesi sayesinde çok kullanışlı hale gelmiştir. Sıcak şekillendirme işlemi öncesi, parçanın şekillendirme analizinin yapılması, parçanın üretilirliğinin ve işlem sonuçlarının önceden görülebilmesi açısından sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaktadır. Bu çalışmada, sıcak şekillendirme işlemindeki sac metalin ısıtılması işleminden metalin şekillendirilmesine, soğutulmasına ve sonraki işlemlere kadar tüm süreç açıklanmış ve sonlu elemanlar yöntemi ile yüksek mukavemetli çeliklerin sıcak şekillendirme süreci incelenmiştir. Ardından, yüksek mukavemetli çelik malzemeli U tünel profil parçanın sıcak ve soğuk şekillendirme simülasyonları gerçekleştirilerek sonuçlar incelenmiştir. Bu çalışma, sıcak şekillendirme işleminin otomotiv sektöründe yüksek dayanımlı yapısal parçaların üretimi için uygun olduğunu ve kullanımının yaygınlaştırılması gerektiğinin anlaşılmasını hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: Sıcak metal şekillendirme, sonlu elemanlar yöntemi, yüksek mukavemetli çelikler

REVIEW OF HOT FORMING TECHNIQUE USED IN AUTOMOTIVE INDUSTRY

ABSTRACT

New requirements in automotive industry demand lighter components with higher strength. In the last years, sheet metal forming processes at elevated temperatures have gained much importance due to the possibility of producing components with enhanced strength and geometrical accuracy and reduced mass. Finite element method is used in order to determine the formability of the component and perform the correct design of the tools before hot forming process. In this study, hot forming process and finite element analysis of hot forming simulations of high strength steels are reviewed with all steps from heating to cooling. Then, finite element model of a U channel profile with high strength steel material is performed and hot forming and cold forming processes are simulated and the results are compared. Thus, it is aimed that hot forming process has many advantages in order to produce structural components with high strength in automotive industry and usage of this process should be increased.

Keywords: Hot metal forming, finite element method, high strength steels

* İletişim Yazarı

Geliş tarihi : 17.04.2014
Kabul tarihi : 05.12.2014

Görgülüarslan, R. M. Güler, M. A. 2015. "Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Sıcak Şekillendirme Tekniğinin İncelenmesi," Mühendis ve Makina, cilt 56, sayı 660, s. 41-51.

1. GİRİŞ

Son zamanlarda, araçların çevreye olan zararlı etkisinin azaltılması, güvenliğinin artırılması ve bileşenlerinin daha güvenilir, daha ucuz ve daha kolay üretilmesi ve birleştirilmesi otomotiv endüstrisinin ana hedefleridir. Otomobillerin daha konforlu, daha fazla donanımlı olması ihtiyacı ve çarpışmalara karşı daha güvenli olması gereksinimi, ağırlıklarının artmasına neden olmaktadır. Fakat ağırlıktaki bu artış, yakıt tüketiminin artmasını doğurmakta ve dolayısıyla çevre kirliliğini artırmaktadır. Bu yüzden, yeni üretim teknikleri, yeni malzemeler ve yeni kavramlar geliştirilmektedir. Bunların gerçeğe dönüşmesinin altında ise en alt basamak olan üretim sürecinde kullanılan kalıplardaki yenilikler bulunmaktadır. Bundan dolayı, araç ağırlığının azaltılması ve çarpmalara karşı araç güvenliğinin artırılması gereksinimi, otomobil üreticilerini, sac metal şekillendirme teknolojilerinde yeni çözümler aramaya sevk etmektedir. Özellikle günümüzde, parçaların yüksek dayanımlı ve hafif olarak üretilmesi için, yüksek mukavemetli çelikler ile sıcak şekillendirme yönteminin kullanılması, yeni bir çözüm olarak önem kazanmıştır.

Sıcak şekil verme işleminde öncelikle sac metal, östenitleşme sıcaklığının üzerinde bir sıcaklığa kadar ısıtılır. Sonrasında, kalıp içerisinde şekil verme işlemi gerçekleştirilir ve aynı anda, martenzit yapı elde etmek amacıyla sac hızla soğutulur. Soğuk metal şekillendirme işleminden farklı olarak, sıcak şekillendirme işlemi için yüksek sıcaklıklardaki malzeme davranışı hakkında bilgiye ihtiyaç vardır. Özellikle termo-mekanik malzeme modelinin uygulandığı sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan süreç modelinin doğru elde edilmesi gerekmektedir [1-4].

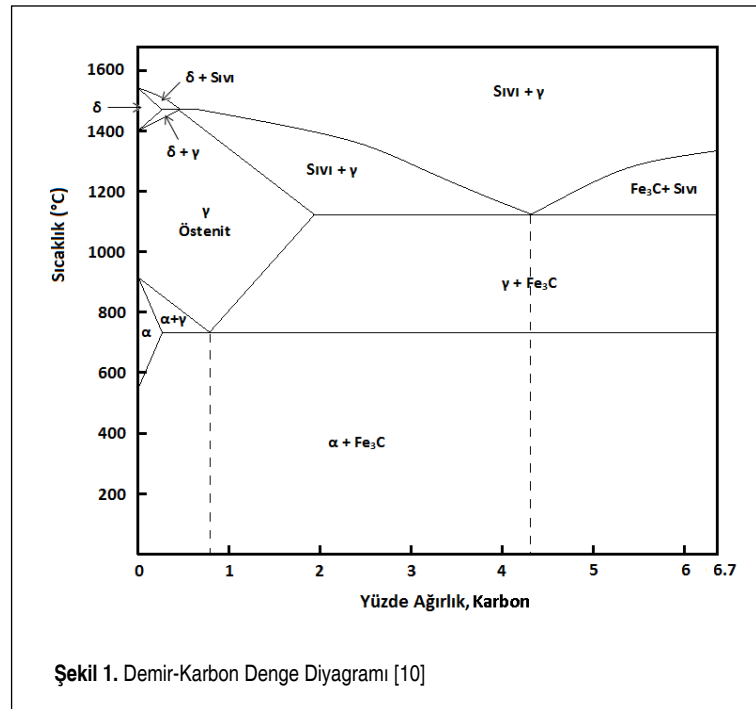
Bu çalışmanın amacı, sıcak şekillendirme işlemi ile ilgili bilgi kazandırmak ve sıcak şekillendirme işleminin sonlu elemanlar modelinin nasıl oluşturulduğu hakkında bilgi vermektir. İlk olarak, sıcak şekillendirmede kullanılan malzemelerin incelenmesi gerçekleştirilmiş, sonrasında sıcak şekillendirme işlemi basamakları detaylı olarak anlatılmıştır. Daha sonra ise yüksek dayanım çelik malzemeli U tünel profil parçanın soğuk ve sıcak şekillendirme simülasyonları oluşturularak sonuçlar karşılaştırılmış ve sıcak şekillendirme yönteminin soğuk şekillendirme yöntemine göre avantajları incelenmiştir.

2. YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİKLER

Otomobillerin yapısal parçaları, daha az ağırlık ve daha fazla dayanım sağlanması için yüksek mukavemetli çeliklerle üretilmektedir. Fakat bu çelikler, soğuk şekillendirme işlemlerinde kullanıldığında,

parçanın şekillendirilmesi sonrasında kalıntı gerilmelerin oluşması sonucu malzeme yapısında çarpıklıklar meydana gelmektedir. Ayrıca, malzemenin geri yaylanma miktarı çok fazla olmakta ve şekillendirilebilirlik miktarı azalmaktadır. Dolayısıyla karmaşık şekilli parçaların bu malzemelerle üretilmesi imkânsız hale gelmekte ya da çok yüksek maliyetler doğurmaktadır. Fakat malzemenin sıcaklığı artırılarak bu dezavantajları aşmak mümkün olabilmektedir. Artan sıcaklık sayesinde, yüksek mukavemetli çelikler daha kolay şekil alabilmekte ve geri yaylanma miktarları azalabilmektedir. Özellikle sıcak şekillendirme yöntemi ile parça östenitleşme sıcaklığının üzerinde bir sıcaklığa ısıtılarak malzemenin şekillendirilebilirliği artırılabilir ve bu sayede daha hassas geometri, yani daha karmaşık parçalar elde edilebilmektedir. Ayrıca, parçanın martenzitik iç yapıya sahip olması için oda sıcaklığına kadar hızlı soğutma işlemi gerçekleştirilmekte ve bu sayede çok dayanıklı bir parça elde edilebilmektedir. Bunlara ek olarak, sıcak şekillendirme yöntemi sayesinde parçaların geri yaylanma miktarının önemli ölçüde azaltılabilmesi, bu yöntemi avantajlı ve çekici hale getirmektedir [4-7].

Boron çeliği (22MnB5) gibi otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan yüksek mukavemetli çeliklerin sıcak şekillendirme işleminde kullanılması, daha iyi malzeme özelliklerine sahip ve daha ince parçaların üretilmesini olanaklı kılmaktadır. Bu çeliklerin sertleşme davranışı sıcaklığa bağlıdır. Sıcak şekillendirme yöntemi sayesinde parçanın çekme gerilmesi değeri 1500 MPa değerine kadar çıkabilmektedir. Bunu gerçekleştirebilmek için, boron çeliğinin en azından östenit sıcaklığına kadar ısıtılması ve daha sonra şekillendirme işlemi gerçekleştirilirken hızla soğutulması gerekir. Bu işlem-

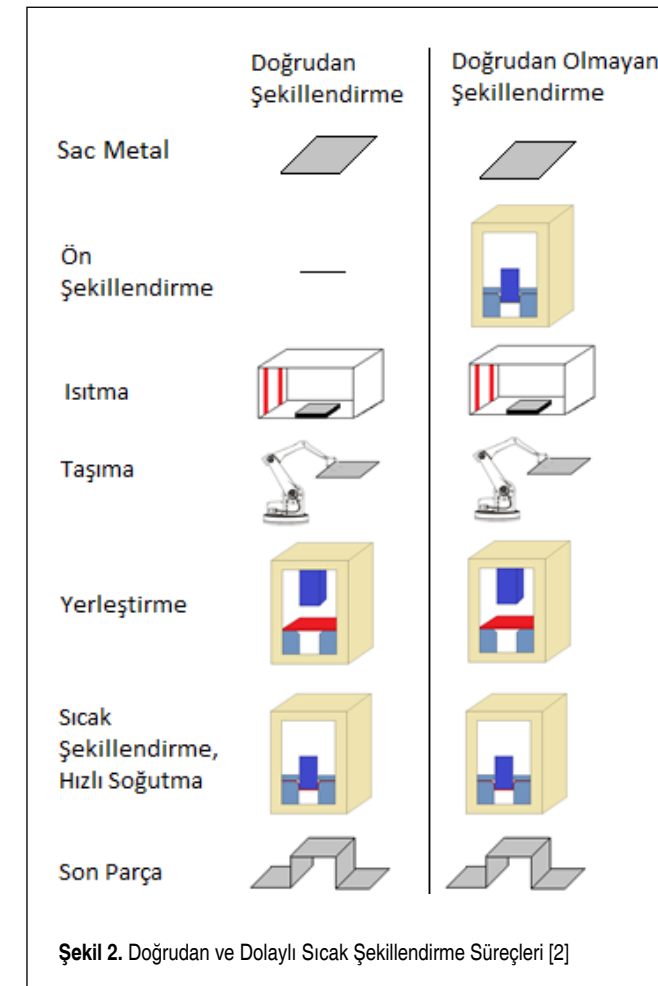


Şekil 1. Demir-Karbon Denge Diyagramı [10]

de, östenit fazından farklı fazlara dönüşüm söz konusudur. Bu fazlar, sıcaklık ve gerilme-gerinim geçmişine bağlı olarak ferrit, pörlit, beynit ve martenzit olabilir. Malzeme içerisinde farklı fazların oluşumu hem ısıl hem de mekanik özellikleri etkilemektedir. Bu yüzden, çeliklerin faz dönüşümleri sırasındaki ısıl ve mekanik özelliklerinin iyi anlaşılması gerekmektedir [7-9]. Çelikler için faz dönüşüm diyagramı Şekil 1'de verilmiştir.

3. SICAK ŞEKİLLENDİRME SÜRECİ

Sıcak şekillendirme işleminde şekil verme ve soğutma işlemleri tek bir işlemde gerçekleşmektedir. Genel olarak sıcak şekillendirme süreci; sac metalin ısıtılması, taşınması, yerleştirilmesi, şekillendirilmesi ve hızlı soğutma işleminin gerçekleştirilmesi aşamalarından oluşmaktadır. Sıcak şekillendirme tekniğini doğrudan sıcak şekillendirme yöntemi ve dolaylı sıcak şekillendirme yöntemi olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür. Doğrudan sıcak şekillendirme yönteminde yukarıda belirtilen aşamalar gerçekleştirilirken, dolaylı sıcak şekillendirme yönteminde ısıtma işleminden önce sac metal, normal bir kalıp takımı ile son alacağı şeklin %90-95'ine kadar şe-



Şekil 2. Doğrudan ve Dolaylı Sıcak Şekillendirme Süreçleri [2]

killendirilir. Daha sonra doğrudan şekillendirme aşamaları uygulanır. Bu ilk şekillendirmenin yapılmasının sebebi ise çok karmaşık parçalar için şekillendirilebilirliği artırabilmektir [7-12]. Doğrudan ve dolaylı sıcak şekillendirme işlemleri Şekil 2'de gösterilmiştir.

3.1 Isıtma

Sıcak şekillendirme işleminin ilk aşaması sac metalin ısıtılmasıdır. Bu aşamada sac metal, östenitleşme sıcaklığının üstünde bir sıcaklığa kadar fırın içerisinde ısıtılır. Burada malzemenin tamamen östenit yapıya geçmesi istenmektedir. Bunun sebebi, malzemenin hızlı soğutma aşamasında tamamen martenzitik yapıya geçmesini sağlamaktır. Eğer malzeme daha düşük sıcaklıklara ısıtılırsa, içyapıda östenit yanında ferrit yapı da oluşacak ve hızlı soğutma gerçekleştirildiğinde martenzit yapı oluşmayacaktır. Bu yüzden soğutma sonrası istenilen dayanım değerlerine ulaşamaz [13].

Sac metalin ısıtılması için birçok farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan üç tanesi; fırında ısıtma, indükleme ile ısıtma ve iletim ile ısıtma yöntemleridir. Sac metal, yaygın olarak fırında ısıtılmaktadır. Fakat kullanılan fırınlarda yer sıkıntısı olabilmektedir. Bu yüzden büyük parçalar için yüksek yatırım maliyetleri oluşabilmektedir. Ayrıca, parça radyasyon ve konveksiyon ile ısıtıldığından fırında ısıtılması uzun sürebilmektedir. Bu dezavantajları önlemek için indükleme ile ısıtma ve iletim ile ısıtma yöntemleri kullanılmaktadır. İletim ile ısıtma yönteminde sac metal iki elektrot arasında ısıtılır. Daha hızlı bir ısıtma sağlanmasına rağmen bu yöntemde ısı transferi sac metalin her yerinde aynı olmayabilir. Ayrıca, karmaşık geometriye sahip parçaların homojen olarak ısıtılmaması da bir dezavantajdır. İndükleme ile ısıtma yönteminde ise indüktör ile sac metal arasında bulunan alan ısıtmayı etkilemektedir [14, 15].

Sıcak şekillendirmede yaygın olarak kullanılan 22MnB5 boron çeliği fırın içerisinde yaklaşık 850 °C değerine çıkarılmakta ve bu sıcaklık için fırında bekleme süresi yaklaşık 5 dakikadır [16].

3.2 Taşıma

Sac metal ısıtıldıktan sonra, ısıtırdan kalıplara taşınır. Bu taşınma sırasında, çevreyle olan ısı alışverişinden dolayı sac metal soğuyacaktır. Bu esnada ısı transferi sac metal ile çevre arasında gerçekleştiğinden, taşınım ve radyasyon ile ısı transferi meydana gelmektedir.

22MnB5 boron çeliği için sac metalin sıcaklığı yaklaşık 1000 °C olduğundan, radyasyonla ısı iletimi konveksiyonla ısı iletiminden daha fazla olacaktır.

Taşınma esnasında ısı kaybı meydana geldiğinden, ısıtırdan kalıplara taşıma işlemi mümkün olduğunca çabuk yapılma-

lıdır. Böylece ısı kaybı en aza indirgenebilir ve sac metal östenitleşme sıcaklığın üzerinde tutulabilir.

3.3 Yerleştirme

Sac metal kalıba yerleştirildiğinde, kalıp ile sac metalin alt yüzeyi arasındaki temastan dolayı iletim ile ısı transferi meydana gelecektir. Burada, kalıp, sac metalden daha düşük bir sıcaklıkta olduğundan, ısı transferi sac metalden kalıba doğru gerçekleşecek ve dolayısıyla sac metal alt kısımdan iletim yolu ile soğuyacaktır. Bunun yanında, sac metalin üst yüzeyi ile hava arasında ise yine taşınım ve radyasyonla ısı transferi meydana gelmektedir. Bu ısı transferinin etkisini en aza indirmek ve sac metali östenitleşme sıcaklığının üzerinde tutabilmek için yerleştirme işlemi mümkün olduğunca çabuk yapılmalıdır.

3.4 Şekil Verme

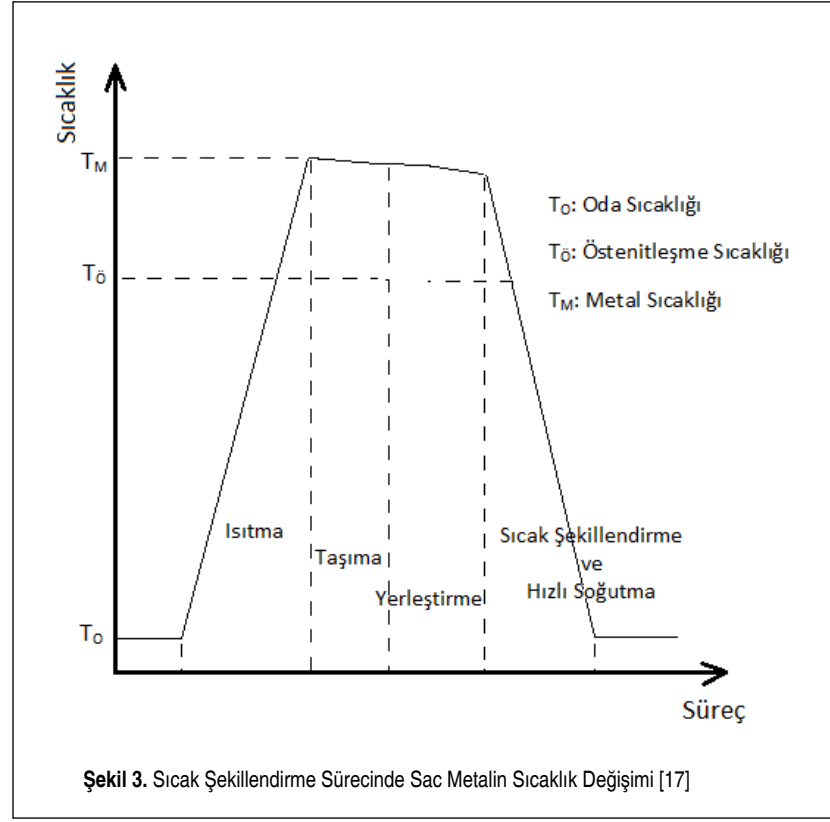
Şekil verme işleminde sac metal, kalıp içerisinde yüksek basınç altında tutulur. Bu esnada sac metal, kalıp ve sac metal tutucuyla temas halinde olduğundan, sac metal her iki yüzeyinden de iletim ile ısı transferi dolayısıyla soğuyacaktır. Bu durum, hızlı soğutma işleminin şekil verme esnasında başladığını göstermektedir. Burada önemli olan, soğumanın etkisi ile iç yapının martenzit yapıya dönüşmeden önce sac metale istenilen şekli verebilmektir. Genellikle, sac tutucu ve kalıp arasında, sac metalin hızla soğumasını engellemek için bir uzaklık bulunur [14].

3.5 Hızlı Soğutma

Sac metale östenitleşme sıcaklığının üzerinde şekil verme işlemi tamamlandığında, martenzitik yapının tamamen oluşması için, sac metal, kalıplar tarafından tutulurken hızlı soğutma işlemi gerçekleştirilir. Kalıp takımı; kalıp, zımba, karşı zımba ve sac tutucu olmak üzere dört bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler, işlem sırasında ısınmaması için su soğutma sistemi ile soğutulmaktadır. Martenzit yapı oluştuğunda, malzeme hacminde meydana gelen artış gerilme dağılımını etkileyeceğinden, malzemenin akma gerilmesi artmaktadır. Böylece malzeme, çok dayanıklı bir yapıya kavuşmaktadır.

Otomotiv endüstrisinde en yaygın kullanılan yüksek mukavemetli çelik olan 22MnB5 boron çeliği için hızlı soğutma süresi 20-30 sn kadardır [15].

Şekil 3'te bu sıcak şekillendirme aşamaları esnasındaki malzemenin sıcaklık değişimi görsel olarak ifade edilmiştir.



Şekil 3. Sıcak Şekillendirme Sürecinde Sac Metalin Sıcaklık Değişimi [17]

4. SONLU ELEMANLAR SİMULASYONU

Metal şekillendirme kalıpları, daha önceleri, genelde deneyimle kazanılmış bilgi ve deneme yanılma yöntemi kullanılarak tasarlanıyordu. Fakat günümüzde, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sac şekillendirme sürecinin simülasyonları yapılmakta ve bu sayede üretilebilirlik önceden kontrol edilebilmekte ve en uygun kalıp tasarımı elde edilebilmektedir. Metal şekillendirme süreçlerinin simülasyonlarının yapılabilirdiği, sonuçların tahmin edilebildiği birçok sonlu elemanlar programı mevcuttur. Bu programlar, nümerik hesaplamalarda kullanılan teorilere, kullanıcı ara yüzüne, hesaplama süresine ve sonuçların doğruluğuna göre farklılıklar gösterebilmektedir.

Sonlu elemanlar simülasyonlarının kullanılabilmesinin çok büyük avantajları bulunmaktadır. Bunların en önemlisi, kalıpların daha hızlı bir şekilde geliştirilebilmesi ve deneme yanılma yöntemi için harcanan zamanın çok kısa bir zamana indirilebilmesidir. Son zamanlarda kalıp geliştirme ve üretim için harcanan zaman, simülasyonlar kullanılarak %50 oranında azaltılabilmektedir ve önümüzdeki yıllarda %30 daha azaltılabileceği öngörülmektedir.

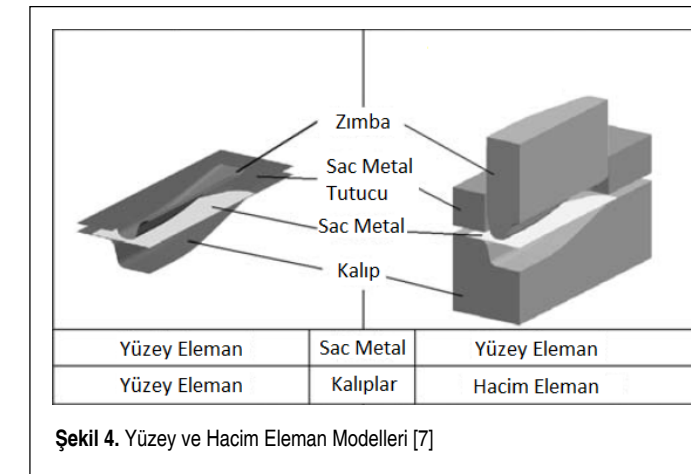
Sıcak şekillendirme işleminin modellenmesi, normal sac metal şekillendirme işlemleri ile karşılaştırıldığında, birçok farklı durumun bir arada tanımlanmasını içermektedir. Yüksek sıcaklıktaki sac metal soğuk kalıplara yerleştirilip şekillen-

dirme ve soğutma işlemi gerçekleştirildiğinden, malzeme deformasyonu değişen sıcaklıkta meydana gelmektedir. Bu yüzden, sıcak sac metalin şekillendirme işlemi sırasındaki hızlı soğuması, ısıl ve mekanik durumların bir arada düşünüldüğü bir simülasyonun geliştirilmesini gerektirmektedir. Bunun için de sac metalin hızlı soğuması ve onunla temas halinde olan kalıp yüzeyinin ısınması durumlarını hesaba katan bir model geliştirilmelidir. Özellikle sac metaldeki sıcaklık dağılımının hesaplanması doğru bir simülasyonun geliştirilmesi için önemlidir. Kalıp ve sac metal arasındaki yüksek sıcaklık farkından dolayı sac metal, temas noktalarında çok hızlı soğumakta ve dolayısıyla homojen olmayan bir sıcaklık dağılımı meydana gelmektedir. Bu yüzden sac metal malzemesinin farklı sıcaklıklar için malzeme davranışı simülasyonunda tanımlanmalıdır. Simülasyonda, sac metal ile kalıp arasındaki ısı transferi, ısı transferi katsayısı kullanarak veya sac ve kalıp yüzeyleri arasındaki sıcaklık dağılımı ile belirlenebilir [18].

Sıcak şekillendirme simülasyonları hazırlanırken, kalıp ile sac metal arasındaki ısı transferinin kalıp üzerindeki etkisi de dikkate alınmalıdır. Bu durumda model, biraz daha karmaşıklaşmaktadır. Fakat daha basit bir yöntem için ısı transferinin kalıp üzerindeki etkisi önemsizmeden de model hazırlanabilir. Eğer kalıplardaki sıcaklık değişimi dikkate alınacaksa, 3 boyutlu, detaylı kalıp modelleri hazırlanmalıdır.

Genellikle sıcak şekillendirme simülasyonları, şekillendirme ve soğutma simülasyonu olmak üzere iki farklı simülasyonla gerçekleştirilmektedir. Çünkü bu iki işlemi tek bir simülasyonda birleştirmek pek etkili olmamaktadır. İlk aşama olan şekillendirme işleminde önemli olan kriter, en fazla izin verilen kalınlık azalması miktarı ve şekillendirme süresince meydana gelen kırışıklıkların şeklidir. Eğer bu kriterler sağlanıp parça geometrisi tutarlı bir şekilde elde edilebilirse, soğutma işlemine geçilebilir.

Soğutma işleminde en önemli kriter ise parçanın martenzit bitiş sıcaklığının altına en kısa sürede soğutulmasıdır. Sürenin



Şekil 4. Yüzey ve Hacim Eleman Modelleri [7]

kısaltılması soğutma sırasındaki bekleme süresini azaltacak, bu sayede işlem daha ekonomik yapılabilecektir. Bunun düşünülmesi ise de kalıpla sac metal arasındaki ısı transferinin daha detaylı modellenmesi ile olabilir. Tüm bu sebeplerden dolayı ve de gerçekteki şekillendirme süreci ile uyumlu olmasından dolayı, simülasyonu, şekillendirme ve soğutma olmak üzere iki kısma ayırmak en mantıklı çözümdür. Ayrıca, bilgisayarın çözüm süresini kısaltması yönünden de iki ayrı simülasyon yöntemi daha avantajlıdır. Kütle ve zaman ölçeklendirmeleri her aşama için ayrı ayrı uygulanabildiğinden süre kısaltılabilir.

Bunun yanında, soğutma simülasyonu, ısıl ve mekanik durumları bir arada düşünerek veya sadece ısıl durum düşünerek yapılabilir. Eğer sac metal ile kalıplar arasındaki temas noktalarındaki ısı transferi, temas basıncına bağlı değil ise soğutma simülasyonu sadece ısıl olarak yapılarak simülasyon süresi kısaltılabilir. Fakat tersi durumda, ısıl ve mekanik etkiler bir arada düşünülmelidir [19].

Sıcak metal şekillendirme işleminin simülasyonları için birçok farklı simülasyon programı kullanılabilir. Bunlardan bazıları LS-DYNA, DYNA3D, MARC, ANSYS, ABAQUS, AutoForm, ve PamStamp gibi programlardır [13,19]. Literatürde bu programları kullanarak gerçekleştirilen birçok çalışma bulunmaktadır. Behrens ve diğerleri [3], LS-DYNA kullanarak 22MnB5 malzeme ile 1 mm kalınlığındaki sac metalin sıcak şekillendirme simülasyonunu gerçekleştirerek faz dönüşümünü hesaba kattıklarında, sonuçların deneysel sonuçlara benzer olduğunu görmüşlerdir. Son ve diğerlerinin çalışmasında [5], LS-DYNA ile 2,8 mm kalınlığındaki sac metalin sıcak sac metal şekillendirme yöntemi kullanılarak simülasyonu gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçlarla tutarlı olduğu görülmüştür. Bergman ve Oldenburg [6], DYNA3D programını kullanarak 2,9 mm kalınlığında bir sac metalin sıcak şekillendirme işlemini gerçekleştirmişler ve ısıl yüzey elemanlar kullanarak çözülen problemlerin doğru sonuçlar verdiğini saptamışlardır. Tekkaya ve diğerleri [7], MARC 2005 ve PAMSTAMP 2G yazılımlarını kullanarak ısı ve mekanik durumlar için ayrı ayrı simülasyonlar geliştirerek sonuçları incelemişlerdir. Isıl model için kalıplarda hacimsel eleman kullanılmış, mekanik model için ise kalıplarda yüzey eleman kullanılmıştır. Ayrıca ısıl ve mekanik durumun bir arada olduğu bir simülasyonu da gerçekleştirip bu üçü arasındaki farkları gözlemlemişlerdir. Sonuçlar, ısıl ve mekanik durumların ayrı ayrı simülasyonları yapıldığında çözümün daha kısa sürede ve doğru bir şekilde elde edilebileceğini göstermektedir. Keraus ve Schönbach [9] ise çalışmasında sıcak şekillendirme yöntemi için AutoForm programını kullanmış ve sac metal şekli, sac metal tutucunun uzaklığı, kalıp hızı ve sac metalin konumu gibi farklı parametrelerin simülasyon üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir.

Lorenz ve Haufe [19], LS-Dyna programı ile, şekillendirme simülasyonunda ısı yüzey eleman kullanılarak ısı ve mekanik etkileri bir arada düşünmüş ve soğutma simülasyonunda ise hacimsel eleman kullanarak kalıplardaki ısı dağılımını daha doğru hesaplamayı hedeflemişlerdir. Olsson [20] ve Shapiro [21-23], LS-DYNA programı ile sıcak şekillendirme yöntemi için kullanılan malzeme modelinin uygun olduğunu ve simülasyonun doğru sonuçlar verdiğini çalışmalarında göstermişlerdir.

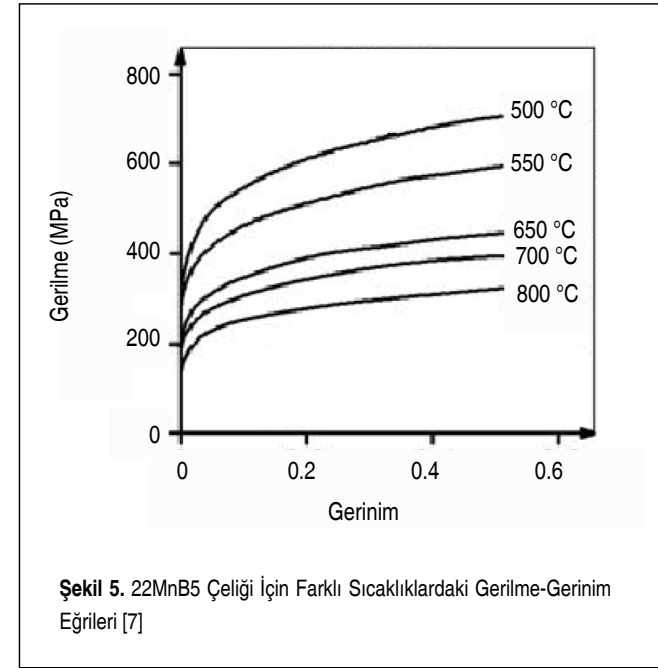
Bu çalışmada ise LS-DYNA yazılımı kullanılarak sıcak şekillendirme yönteminin nasıl oluşturulduğu üzerinde durulacaktır. Bir otomobil parçası olan U tünelin bir bölümünün, 22MnB5 yüksek mukavemetli çelik malzeme ile, LS-DYNA kullanılarak sıcak şekillendirme ve soğuk şekillendirme simülasyonları gerçekleştirilmiştir. LS-Dyna sıcak şekillendirme simülasyonunda, ısı etkileri de göz önünde bulunduran, elastik visko-plastik malzeme modeli olan 106-MAT_ELASTIC_VISCOPLASTIC_THERMAL malzeme modeli kullanılmıştır. Bu malzeme modelinde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. 22MnB5 Malzeme Özellikleri

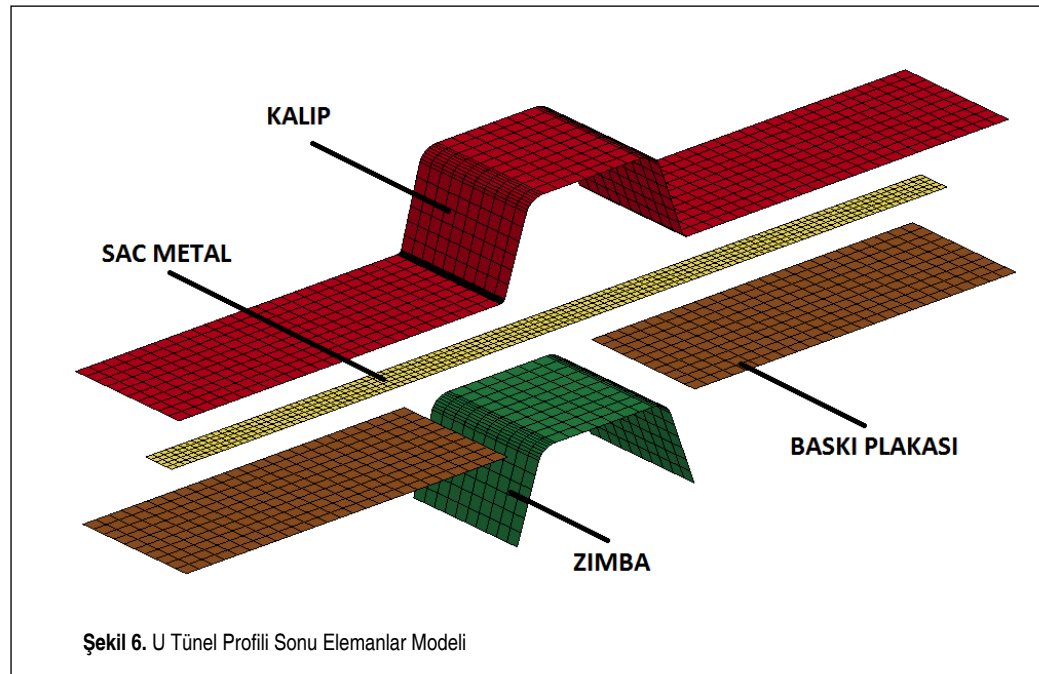
Malzeme özellikleri	Değer
Özgül ağırlık, ρ , (kg/m ³)	7830
Isı kapasitesi, C_p , (J/kgK)	486
Isıl iletkenlik, k , (W/mK)	51.8
Isıl genleşme katsayısı, α , (1/C)	1.3e-5
Elastisite Modülü, E , (GPa)	100
Poisson Oranı, ν	0.3

MAT-106 malzeme modeli kullanılarak sıcak şekillendirme sırasındaki faz dönüşümleri de doğru bir şekilde hesaplanabilmektedir. Bunun için farklı sıcaklıklardaki malzemenin gerilme-gerinim değerleri tanımlanmalıdır. 22MnB5 boron çeliği için bu değerler, Şekil 5'te gösterilmiştir.

Simülasyonu gerçekleştirilen U tünel profilinin sonlu elemanlar modeli Şekil 6'da verilmiştir. Sıcak şekillendirme simülasyonu, şekillendirme simülasyonu ve soğutma simülasyonu olmak üzere iki aşamada yapılmaktadır.



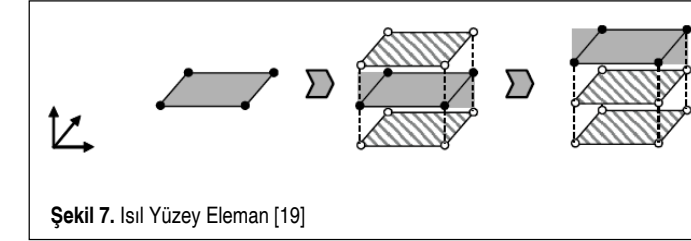
Şekil 5. 22MnB5 Çeliği İçin Farklı Sıcaklıklardaki Gerilme-Gerinim Eğrileri [7]



Şekil 6. U Tünel Profili Sonu Elemanlar Modeli

4.1 Şekillendirme Simülasyonu

Sıcak şekillendirme için oluşturulacak simülasyon modeli, normal soğuk şekillendirme için oluşturulan modele benzerdir. Farklı olarak, kalıp ile sac metal birbirine temas ettiğinde meydana gelen sıcaklık değişiminin dikkate alınması söz konusudur. Kalıp yüzeyindeki sıcaklık değişimini hesaba katmak için ısı yüzey eleman kullanılabilir. Bu eleman türünde, Şekil 7'de gösterildiği gibi, orta yüzey temsili yüzeydir ve bu yüzeyden üst ve alt yüzey hesaplanır. Eğer temas basıncı ve temas boşluğu hesaba katılarak temas ısı transferi katsayısı belirlenirse, ısıl temasın daha doğru tanımlanabileceği söylenebilir.



Daha önce, sıcak şekillendirme işleminin ısıtma, taşınma, yerleştirme, şekillendirme ve hızlı soğutma olmak üzere 5 aşamadan oluştuğu belirtilmiştir. Bunlardan ilk dört aşama, şekillendirme simülasyonu içerisinde gerçekleştirilmektedir.

4.1.1 Isıtma

İlk olarak, oda sıcaklığında bulunan sac metal, östenitleşme sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklığa çıkarılır. 22MnB5 boron çeliği için bu sıcaklık, yaklaşık 850 °C'dir. Bu aşama için iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Birincisi, sac metalin ısıtma işleminin simülasyonda tanımlanması; ikincisi ise daha basit bir yöntem olan sac metalin başlangıçta 850 °C sıcaklıkta olduğunun tanımlanmasıdır. Birinci yöntem kullanılırsa, fırın ile sac metal arasında radyasyon ve konveksiyon ile meydana gelen ısı transferi LS-DYNA'da tanımlanmalıdır. Eğer simülasyon süresini azaltmak ve problemi basitleştirmek istenirse, radyasyonla olan ısı transferi konveksiyonla oluyormuş gibi düşünülerek konveksiyonla ısı transferi katsayısı buna göre artırılabilir. [21] Problemi daha da basit hale getirmek için, ikinci yöntem olan sac metalin ilk sıcaklığı doğrudan 850 °C olarak tanımlanması kullanılabilir. Fakat bu durumda, sıcaklık değişimi sonucu sac metalin kalınlığında meydana gelen değişim hesaba katılmamış olacaktır. [22] U tünel profil parçasının simülasyonu için daha basit ve hızlı çözüm alabilmek amacıyla sac metalin sıcaklığı doğrudan tanımlanmıştır.

4.1.2 Taşıma

İkinci aşamada, ısıtılan sac metal, fırından kalıba taşınmaktadır. Bu esnada sac metal, oda sıcaklığındaki hava ile temasta olduğundan konveksiyon ile ve sıcaklığı çok yüksek olduğundan radyasyonla ısı kaybedecek ve sıcaklığı azalacaktır. Bu durum için gerekli ısı transferi katsayıları hesaplanarak,

LS-DYNA'da sınır koşulları ile ısı transferi tanımlanabileceği gibi, taşıma sonrası sac metalin son sıcaklığı hesaplanıp, bu sıcaklık sac metalin ilk sıcaklığı olarak da girilebilir. Bu ikinci durum, daha basit ve simülasyon zamanı daha az olan bir yöntemdir. Bu yüzden, bu çalışmada ikinci durum kullanılmıştır.

4.1.3 Yerleştirme

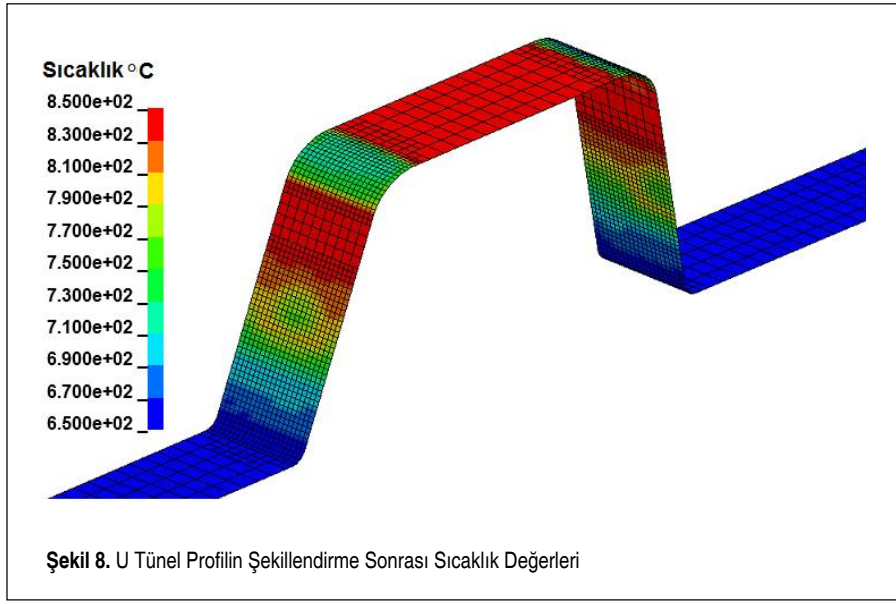
Üçüncü aşamada, sac metal kalıba yerleştirilir ve bu esnada kalıpla olan temastan dolayı sac metalin alt yüzeyinde taşınım ile ısı transferi gerçekleşir. Aynı zamanda, sac metalin üst yüzeyi hava ile temasta olduğundan, bu kısımda da konveksiyon ve radyasyon ile ısı transferi gerçekleşecektir. Bu yüzden, sac metal yine soğuyacaktır. Kalıp ile sac metal arasındaki teması tanımlamak için, LS-DYNA'da sac metal ısıl kabuk eleman olarak tanımlanır ve merkez yüzeyi referans olarak alınır. Bu eleman sayesinde sacın kalınlığı boyunca sıcaklık değişimi daha doğru bir şekilde hesaplanabilmektedir [21]. Radyasyonla ve konveksiyonla olan ısı transferi, taşınım olana nispeten çok az olduğundan ihmal edilebilir. U tünel profil modelinde, taşıma ve yerleştirme sonucu sac metal sıcaklığı 850 °C olarak alınmıştır. Kalıp sıcaklıkları da 30°C olarak alınmıştır.

4.1.4 Şekillendirme

Dördüncü aşamada sac metal, kalıplar arasında şekillendirilir. Bu süreçte, sac metalin her iki yüzeyi de kalıplarla temas halinde olduğundan taşınım ile ısı transferi gerçekleşecektir. Bunun yanında, sürtünmeden kaynaklı bir sıcaklık değişimi de meydana gelecektir. LS-DYNA'da sürtünme katsayısı yüzey sıcaklığının bir fonksiyonu olarak ve ısıl temas katsayısı ise yüzey basıncının fonksiyonu olarak tanımlanabilmektedir. Dolayısıyla sürtünme ile meydana gelen sıcaklık değişimini tanımlamak mümkündür [23]. Bu çalışma için yapılan simülasyonda, sürtünme sonucu meydana gelen sıcaklık değişimi ve ısı transfer katsayısının basınca bağlı değişimi ihmal edilmiş, şekillendirme sırasında kalıplar ile sac metal arasında sabit ısı transferi katsayısı 0,9 olarak tanımlanmıştır. Şekillendirme simülasyonu sonucu sac metalin sıcaklık değerleri Şekil 8'de gösterilmiştir.

4.2 Soğutma Simülasyonu

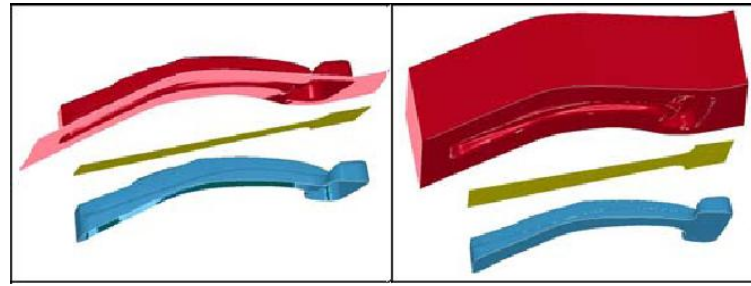
Son aşamada, şekillendirilmiş sac metal, kalıpların arasında hızlı bir şekilde soğutulmakta ve martenzitik yapı oluşturulması hedeflenmektedir. Bu aşama, LS-DYNA'da iki farklı şekilde modellenilebilir. Birincisi, kalıpların hacimsel eleman kullanılarak modellenmesi ve kalıp soğutma sisteminin de modellenmesi şeklindedir. Bu sayede kalıplar üzerindeki ısı transferi hesaba katılabilmekte ve daha gerçekçi bir simülasyon elde edilebilmektedir. İkinci olarak da kalıplar, yüzey eleman kullanılarak modellenilebilir. Bu durumda ısı transferinin gerçekleşmesi için kalıplara sabit bir sıcaklık tanımlanır. Bu yüzden kalıplardaki sıcaklık değişimi hesaba katılmaz.



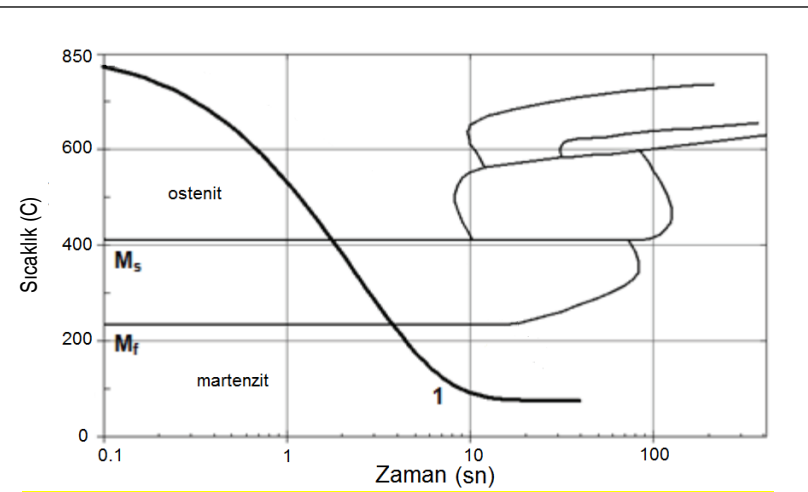
Şekil 11 incelendiğinde, sıcak şekillendirme ile parça üretildiğinde daha homojen bir kalınlık dağılımı olduğu gözlemlenmiştir. Fakat parçanın tamamında soğutma sonucu bir incelmeye meydana gelmiştir. Bu simülasyonda şekillendirme öncesi parça sıcaklığı doğrudan 850° C alındığından, ısıtma sırasında genişlemenin dolayısıyla meydana gelecek kalınlaşma ihmal edilmiş; dolayısıyla soğutma sonucu levha homojen olarak incelmıştır. Diğer bir deyişle, parça ısıtılırken meydana gelen genişleme ihmal edilmez ise homojen bir kalınlık elde edildiğinden sıcak şekillendirme yönteminin daha avantajlı olduğu görülmektedir. Bu durum, Şekil 12’de hızlı, soğutma öncesi levha üzerindeki kalınlık değişimi incelendiğinde daha iyi anlaşılmaktadır.

Shapiro [22] çalışmasında, bu iki durumu, B-Pillar yapısal parçasının sıcak şekillendirmesi için karşılaştırmış ve ikinci durumdaki modelde kalıplar sabit sıcaklıkta olduğundan, sac metalin daha hızlı bir şekilde soğuduğunu gözlemlemiştir. Bu modeller, Şekil 9’da gösterilmiştir. Bunun yanında LS-DYNA’da kullanılan ısı malzeme modeli (MAT-106), östenit-martenzit geçiş aralığının ve gizli ısı özelliğinin tanımlanmasına imkân sağlamakta ve bu sayede kalıpların yüzey model olarak alındığı ikinci durumda, soğuma hızı azalarak, daha gerçekçi olan birinci duruma yakın sonuç elde edildiğini göstermiştir.

Şekil 12’de, özellikle büküm yerlerindeki incelmelerin sıcak şekillendirme ile önemsizmeyecek kadar az olduğu görülmektedir. Simülasyon sonuçlarına göre, sıcak şekillendirme



U tünel profilin soğutma simülasyonunda, Şekil 5’te verilen 22MnB5 malzemenin gerilme-gerinim eğrileri kullanılmıştır. Ayrıca simülasyonda, kalıplar, sadece yüzey eleman olarak modellenmiş; kalıp soğutma kanalları modellenmemiştir. Şekillendirme simülasyonundaki gibi kalıplar ile sac metal arasında sabit ısı transferi katsayısı 4 olarak tanımlanmış, sürtünme sonucu meydana gelen sıcaklık değişimi ihmal edilmiştir. Şekil 10, parçanın soğuma eğrisini, 22MnB5 malzemesinin CCT diyagramı üzerinde göstermektedir. Simülasyon sonuçlarına göre, 20 saniye sonunda sac metalin sıcaklığı 30 °C’ye düşmüştür.

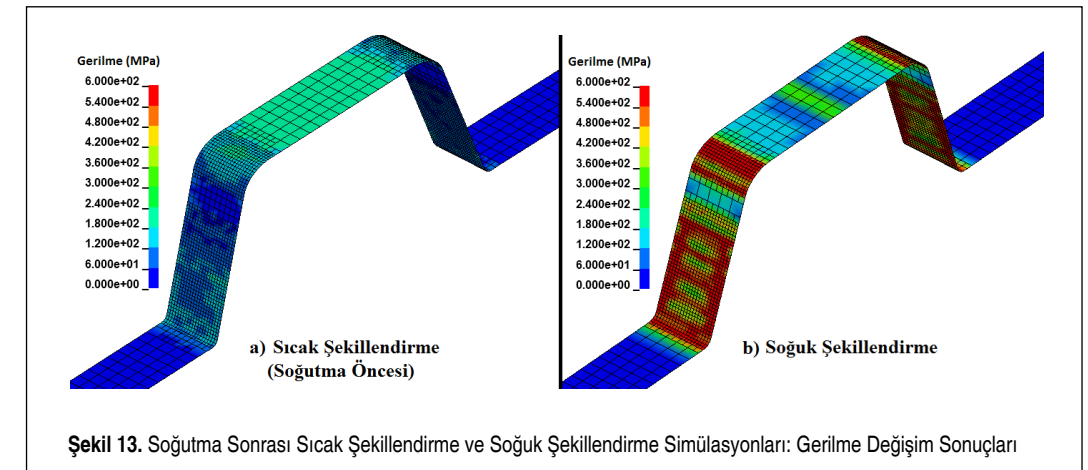
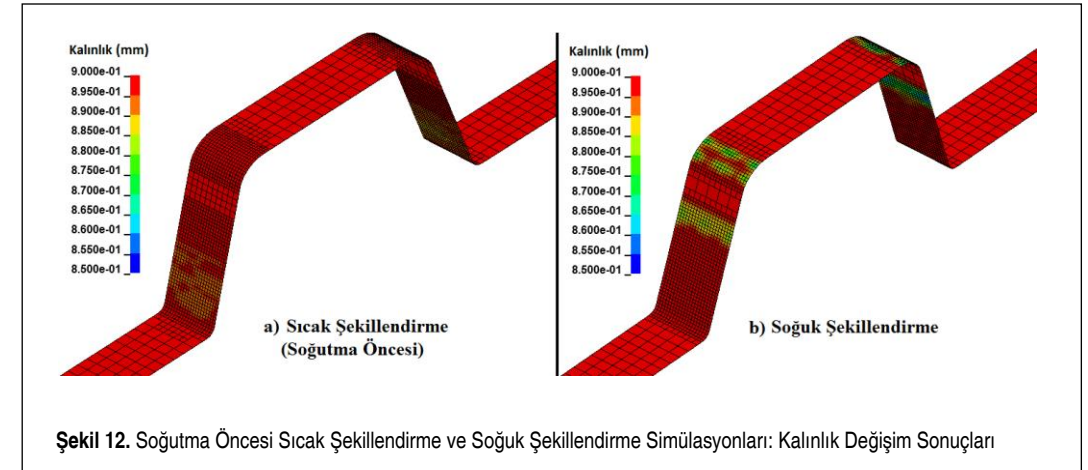
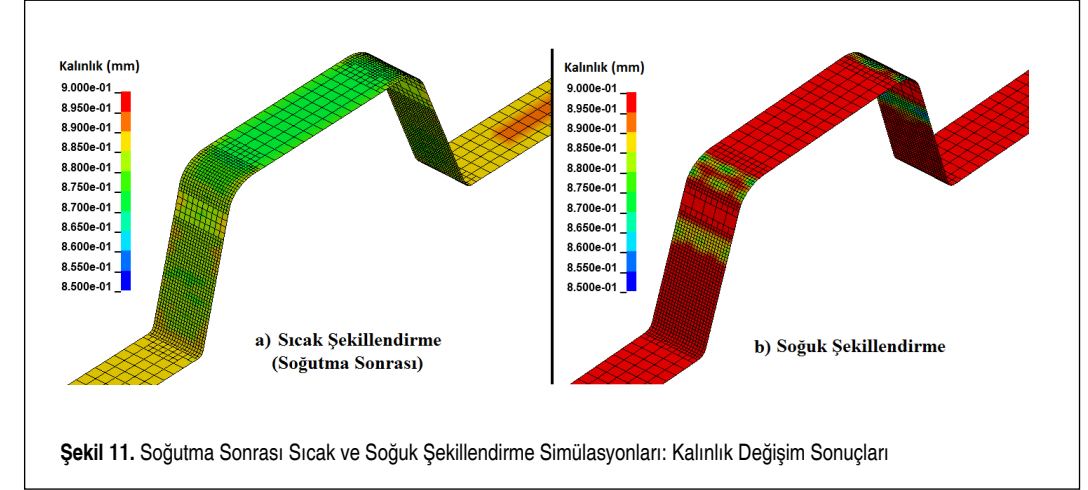


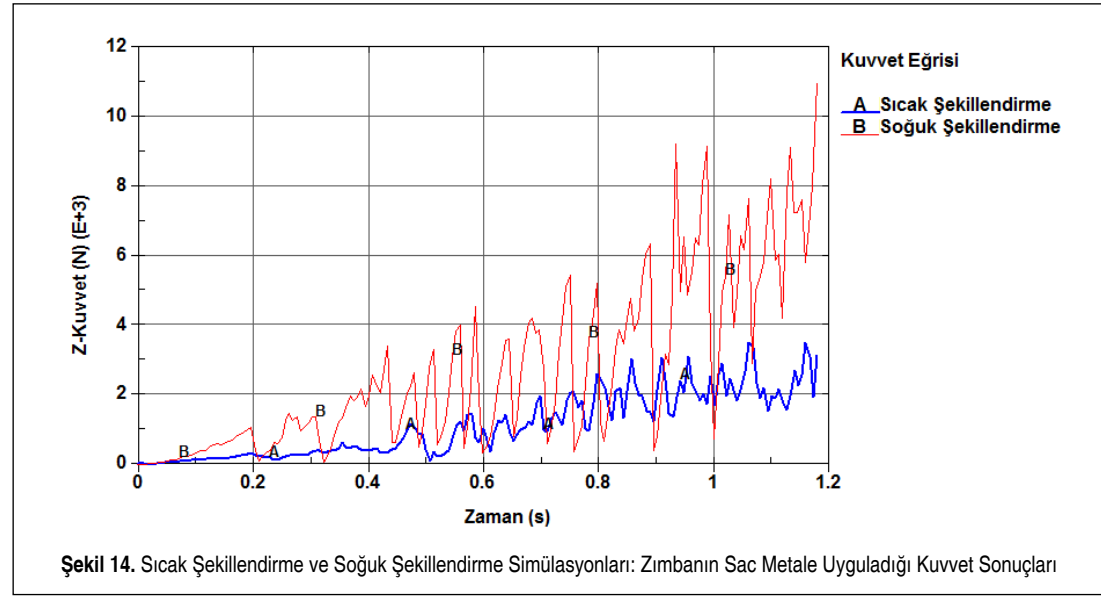
U tünel profilin soğuk ve sıcak şekillendirme simülasyonlarının kalınlık ve gerilme sonuçları aşağıda karşılaştırılmıştır. Öncelikle, Şekil 11’de soğutma sonrası sac metal üzerindeki kalınlık değişimleri verilmiştir.

işlemi için en ince kalınlık 0,87 mm iken, soğuk şekillendirme işleminde 0.85 mm’ye kadar incelmeye olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, kalınlık değişimi açısından sıcak şekillendirme işleminin ne kadar avantajlı olduğunu göstermektedir.

Şekil 13’te şekillendirme sonrası sac metal üzerindeki gerilme değerleri karşılaştırılmıştır. Buradan da görüldüğü gibi,

sıcak şekillendirme sonrası levha üzerindeki gerilme değerleri, soğuk şekillendirme sonrası gerilme değerlerine oranla çok azdır. Özellikle büküm bölgelerinde gerilme değerlerinin az olması, geri yayılma miktarının da az olmasına ve dolayısıyla sıcak şekillendirme sonucu daha doğru geometri elde etmeye olanak verecektir. Bu sonuçlar, sıcak şekillendirme iş-





Şekil 14. Sıcak Şekillendirme ve Soğuk Şekillendirme Simülasyonları: Zımbanın Sac Metale Uyguladığı Kuvvet Sonuçları

leminin geri yaylanma ve doğru geometri elde etmek için, soğuk şekillendirme işlemine göre yüksek mukavemetli çelikler için ne kadar avantajlı olduğunu göstermektedir.

Son olarak, zımbanın sac metali bükme için z ekseninde uygulanan kuvvet değerlerinin zamana göre grafikleri hem soğuk hem de sıcak şekillendirme için Şekil 14'te verilmiştir.

Şekil 14 incelendiğinde, soğuk şekillendirme işlemi sırasında zımba, sac metali şekillendirmek için daha fazla kuvvet harcamaktadır. Bunun sonucunda harcanan enerji de fazla olacaktır. Yani sıcak şekillendirme uygulandığında daha az kuvvet uygulandığı gibi enerji tasarrufu da yapılabilmektedir. Bu durum, sıcak şekillendirme yöntemi için bir avantaj olarak gözükse de sıcak şekillendirme işlemi hattının daha maliyetli olması ve ısıtma işlemi gerçekleştirilirken harcanan enerjinin yüksek olması, soğuk şekillendirme işlemi maliyet ve enerji açısından daha avantajlı kılmaktadır. Fakat, daha önce de belirtildiği gibi, sıcak şekillendirme işleminin asıl avantajı, otomotiv endüstrisinde çok önemli ve gerekli olan, üretilen parçanın daha iyi ve istenilen geometriye ve mekanik özelliklere sahip olmasını sağlamasıdır.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, sıcak şekillendirme süreci tanımlanmış, incelenmiş; kullanılan malzemelerin özellikleri belirtilmiş ve sürecin sonlu elemanlar modeli anlatılmıştır. Böylece sıcak şekillendirmenin önemi üzerinde durulmuştur.

Otomotiv endüstrisinin önemli gereksinimi olan yapısal parçaların yüksek dayanımlı ve hafif bir şekilde üretilmesi sıcak şekillendirme yöntemi ile mümkün olmaktadır. Bunun için yüksek mukavemet çelikleri kullanılmaktadır. Bu çelikler soğuk şekillendirme yöntemi ile de şekillendirilebilir; fakat

bu durumda şekillendirilebilirlik miktarı az olmakta, geri yaylanma miktarı da fazla olmaktadır. Sıcak şekillendirme yöntemi bu dezavantajları gidermek için gerekli bir yöntemdir. Yüksek sıcaklıklarda malzemenin daha kolay şekil alması sağlanır. Ayrıca hızlı soğutma ile malzemenin martenzitik iç yapıya sahip olması amaçlanır ve bu sayede çok daha dayanıklı parçalar elde edilebilir.

Sıcak şekillendirme yöntemini, sonlu elemanlar yazılımları kullanarak modellemek mümkündür ve bu sayede kalıpların daha çabuk geliştirilmesi ve sonuçların önceden görülebilmesi gibi avantajlar sağlanır. Fakat sıcak şekillendirme sürecini modellemek için hem ısıl hem de mekanik durumlar bir arada düşünülmelidir. Çünkü şekillendirme sırasında malzeme, şekil alırken aynı zamanda soğumaktadır. Daha sonra parça, kalıp içerisinde hızla soğutulmaktadır. Bu süreçte sac metal ile ortam ve kalıplar arasındaki ısı transferi iyi modellendiğinde doğru sonuçlar alındığı önceki çalışmalarda görülmüştür. Bunun yanında, sonlu elemanlar modeli için malzemenin farklı sıcaklıklardaki davranışını da tanımlamak gereklidir. Yapılan araştırmalar sonucu kullanılan malzemelerin farklı sıcaklıktaki davranışları da belirlenmiş ve sonlu elemanlar modeline eklendiğinde doğru sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

Örnek olarak yapılan, yüksek mukavemetli çelik kullanıldığı U tünel profilin sıcak ve soğuk şekillendirme simülasyonlarından elde edilen sonuçlar, sıcak şekillendirme ile daha iyi geometriye sahip, daha az geri yaylanma meydana gelen, daha az enerji kullanılarak şekillendirilebilen parçaların üretilebildiğini kanıtlamaktadır.

Tüm bu sonuçlar, yüksek mukavemetli çelikler kullanılarak parçaların üretilmesinde sıcak şekillendirme yönteminin, otomotiv endüstrisinin yapısal parçalar alanındaki gereksinimlerini karşılaması için çok önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

KAYNAKÇA

1. Turetta, A., Fanini, S., Ghiotti, A., Bruschi, S. 2008. "Calibration of Numerical Simulation for Hot Stamping," 7th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes, 1-5 September 2008, Zurich.
2. Behrens, B., Olle, A., Schaffner, C. P. 2008. "Process Simulation of Hot Stamping in Consideration of Transformation-induced Stresses," 7th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes, 1-5 September 2008, Zurich.
3. Lee, M. G., Kim, S. J., Han, H. N. 2009. "Finite Element Investigations for the Role of Transformation Plasticity on Springback in Hot Press Forming Process," Computational Materials Science, vol. 47, issue 2, p. 556-567.
4. Griesbach, B., Oberpriller, B. 2008. "Simulation in Tool and Die Shop," 7th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes, 1-5 September 2008, Zurich.
5. Son, H. S., Kim, H. G., Cho, Y. R. 2008. "Formability Evaluation for Hot Press Formed Part Using Couple Thermo-Mechanical Analysis," 7th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes, 1-5 September 2008, Zurich.
6. Bergman, G., Oldenburg, M. 2004. "A Finite Element Model for Thermomechanical Analysis of Sheet Metal Forming," International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 59, issue 9, p. 1167-1186.
7. Tekkaya, A. E., Karbasian, H., Homberg, W., Kleiner, M. 2007. "Thermo-mechanical Coupled Simulation of Hot Stamping Components for Process Design," Production Engineering, vol. 1, issue 1, p. 85-89.
8. Lee, M. G., Kim, S. J., Han, H. N., Jeong, W. C. 2009. "Application of Hot Press Forming Process to Manufacture an Automotive Part and its Finite Element Analysis Considering Phase Transformation Plasticity," International Journal of Mechanical Sciences, vol. 51, issue 11, p. 888-898.
9. Kerausch, M., Schönbach, T. 2008. "Design of Hotforming Processes based on Sensitivity Analysis of Process Parameters," 7th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes, 1-5 September 2008, Zurich.
10. Callister Jr, W. D. 2001. Fundamentals of Materials Science and Engineering, John Wiley & Sons, New York, USA.
11. Akerström, P., Oldenburg, M. 2008. "Numerical Simulation of a Thermo-Mechanical Sheet Metal Forming Experiment," 7th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes, 1-5 September 2008, Zurich.
12. Altan, T. 2007. "Hot-stamping Boron-alloyed Steels for Automotive Parts," Stamping Journal, vol. 19, issue 2, p. 41-42.
13. Neugebauer, R., Altan, T., Geiger, M., Kleiner, M., Sterzing, A. 2006. "Sheet Metal Forming at Elevated Temperatures," CIRP Annals-Manufacturing Technology, vol. 55, issue 2, p. 793-816.
14. Karbasian, H., Tekkaya, A. E. 2010. "A Review on Hot Stamping," Journal of Materials Processing Technology, vol. 210, issue 15, p. 2103-2118.
15. Mori, K., Maki, S., Tanaka, Y. 2005. "Warm and Hot Stamping of Ultra High Tensile Strength Steel Sheets Using Resistance Heating," CIRP Annals-Manufacturing Technology, vol. 54, issue 1, p. 209-212.
16. Karbasian, H., Klimmek, C., Brosius, A., Tekkaya, A. E. 2008. "Identification of Thermo-Mechanical Interaction During Hot Stamping by Means of Design of Experiments for Numerical Process Design," 7th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes, 1-5 September 2008, Zurich.
17. Bariani, P. F., Bruschi, S., Ghiotti, A., Turetta, A. 2008. "Testing Formability in the Hot Stamping of HSS," CIRP Annals-Manufacturing Technology, vol. 57, issue 1, p. 265-268.
18. Roll, K. 2008. "Simulation of Sheet Metal Forming-Necessary Developments in the Future," 7th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes, 1-5 September 2008, Zurich.
19. Lorenz, D., Haufe, A. 2008. "Recent Advances and New Developments in Hot Forming Simulation with LS-DYNA," 7th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes, 1-5 September 2008, Zurich.
20. Olsson, T. 2009. "An LS-DYNA Material Model for Simulations of Hot Stamping Processes of Ultra High Strength Steels," 7th European LS-DYNA Conference, 14-15 May 2009, Salzburg.
21. Shapiro, A. B. 2007. "Using LS-DYNA for Hot Forming," 6th German LS-DYNA Forum, 11-12 October 2007, Frankenthal.
22. Shapiro, A. B. 2009. "Using LS-DYNA for Hot Stamping," 7th European LS-DYNA Conference, 14-15 May 2009, Salzburg.
23. Shapiro, A. B. 2006. "LS-DYNA Features for Hot Stamping," 9th International LS-DYNA Users Conference, 4-6 June 2006, Detroit.