

TİG Kaynağı ile Gerçekleştirilen Sert Dolgu Sırasında Oluşan Artık Gerilme ve Deformasyonların Modellenmesi

Atilla Savaş

ÖZ

Sert dolgu prosesi her türlü çelikte aşınma direncini arttırmak için kullanılan bir yöntemdir. Kaynak yöntemiyle yapılan sert dolgu prosesinde plakalarda deformasyon ve artık gerilmelerin oluştuğu bilinmektedir. Bunların en aza indirilmesi için çeşitli kaynak paternleri (kaynak dikişleri) sayısal bir çalışmayla incelenmiştir. Kaynak yöntemi olarak TİG kaynağı seçilmiştir. Sert dolgu kaynak dikişleri seyrek olarak plakaların üzerine uygulanmıştır. Seyrek kaynak dikişleri ile paternlerdeki deformasyon ve artık gerime eğilimleri hesaplanabilmektedir. Sayısal model ANSYS sonlu eleman yazılımı kullanılarak oluşturulmuş ve deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Kaynak prosesinin ısı girdisi hesabı çift elipsoid hareketli ısı kaynağı yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Dikdörtgen plakalarda enine kaynak dikişlerinin daha küçük deformasyon ve artık gerilmelere neden olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sert dolgu, TİG kaynağı, Sayısal modelleme

Modeling of Residual Stresses and Deformations During Hardfacing by Gtaw

ABSTRACT

Hardfacing process is a method used to increase the wear resistance for all kinds of steel. It is known that deformation and residual stress occur in the plates during the hardfacing process made by welding method. In order to minimize these, various welding patterns (welding seams) have been analyzed with a numerical study. TIG welding was chosen as the welding method. Hardfacing weld seams were sparsely applied on the plates. Deformation and residual stress tendencies in patterns can be calculated with sparse weld seams. The numerical model was created using ANSYS finite element software and validated with experimental results. The heat input of the welding process was calculated by using the double ellipsoid moving heat source method. It has been determined that transverse weld seams in rectangular plates cause smaller deformations and residual stresses.

Keywords: Hardfacing, TIG welding, Numerical modeling

Geliş/Received : 15.05.2021
Kabul/Accepted : 29.07.2021

* Piri Reis Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, asavas@pirireis.edu.tr
ORCID: 0000-0001-6900-3259



EXTENDED ABSTRACT

The hard facing process is utilized for improving the wear resistance of all kinds of steel. Via hard facing the hardness of the surface can easily be improved. It is not essential to cover all of the surfaces of a plate to increase wear resistance. Some parts of the surface may be chosen and hard-faced. In this case, the important thing is to prevent two metal surfaces not to rub each other on the uncovered parts. The most common application of hardfacing is performed by various types of fusion welding processes. In the literature, one can find examples of hardfacing by Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), Submerged Arc Welding (SAW), Shielded Metal Arc Welding (SMAW), and Gas Metal Arc Welding (GMAW). In this work, the GTAW process was investigated. While the surface of the plates is hard-faced in order to gain wear resistance, the deformations and the residual stresses should not restrain the plate from service. Compressive residual stresses may be appreciated because crack propagation is suppressed under this condition.

Different welding patterns were designed and modeled to investigate their influence on deformations and residual stresses. Previous studies in the literature show that the researchers were interested in pre-heating and post-weld heat treatment in order to reduce deformations and residual stresses. Researchers were also interested in the metallurgical part of the process. Different metal powders including boron, chromium, niobium, cobalt were investigated in the related studies and their effect on the surface hardness was analyzed by various researchers. In this present work, the welding patterns i.e. longitudinal and transverse welding seams were analyzed and their effects on the distortions and stresses were investigated. These seams were performed as either only longitudinal and transverse or both of them. Three different patterns were included in the present work: MOD 1 includes only longitudinal welding seam, MOD 2 has only transverse seam and finally, MOD 3 includes both longitudinal and transverse welding seams. The welding speed was chosen as a moderate one (6 mm/s), for all of the patterns the process ends at the 30th second. This ensures that the heat input for all of the patterns is equal.

The numerical modeling was performed by Finite Element Code ANSYS. The transient structural module was used and two different APDL code snippets were utilized to code the thermo-physical and thermo-mechanical properties of plain carbon steel and the double-ellipsoidal moving heat source. The convective and radiative heat transfer parameters were also given by these code snippets. The mentioned APDL codes were given in the Appendices. Mesh independence was provided by utilizing the cell dimensions used in the previous studies, 1 mm cube element gives the optimum solution. This selection provides sufficient details in stresses and deformation and minimum solution time.

Under the same welding conditions and the same welding heat input, the transverse welding seam caused the minimum highest temperature in the plate (MOD 2). The maximum highest temperature was obtained in the plate where the longitudinal and transverse welding seams both (MOD 3) were performed. The minimum deformation was obtained in the plate which was welded transversely (MOD 2). Both on the transverse path (Path 1, "İz 1", look at Figure 3 (Şekil 3)) and the longitudinal (Path 2, "İz 2", look at Figure 3 (Şekil 3)) which are drawn on the surface of the plate, the maximum residual stress was obtained for the longitudinal welding seam (MOD 1). On the other hand, the transverse welding seam (MOD 2) caused the minimum residual stress.

It has been observed that the highest temperature in the hard facing process is realized in MOD 3, which includes both longitudinal and transverse weld seams. The lowest temperature was seen in MOD 2. MOD 2 includes only transverse weld seams. The lowest deformation was observed in MOD 2. There is convex bending in MOD 1 and MOD 3, and concave bending in MOD 2. It is considered that the convexity in MOD 1 and MOD 3 originates from longitudinal weld seams. The highest residual stress in the transverse path in the rectangular plate is the longitudinal stress in MOD 1, the smallest stress is the longitudinal stress in MOD 2; The transverse stresses are listed as MOD 3, MOD 1, and MOD 2 from large to small. The stresses are listed similarly to the transverse path, except for small regions at the beginning and end of the longitudinal path in the rectangular plate.

The most important finding of this study is that on the rectangular plates transverse hardfacing patterns should be chosen to minimize the distortions and residual stresses. Further studies should include other welding patterns and their effects on deformations and stresses.

1. GİRİŞ

Sert dolgu kaplaması malzemelerin özellikle de çeliklerin aşınma direncini geliştirmek ve sertliklerini arttırmak için kullanılagelmiş bir yöntemdir. TİG kaynağı, tozaltı kaynağı, MAG kaynağı sert dolgu yapmak için en çok kullanılan yöntemlerdir. Bu prosesin daha iyi anlaşılabilmesi için çeşitli deneysel ve numerik çalışmalar literatürde bulunmaktadır. Goldak ve arkadaşları daha önceden kaynak prosesindeki ısı girdisini dairesel olarak hesaplayan yöntemlerden farklı olarak çift elipsoid hareketli ısı kaynağı modelini geliştirmiştir. Bu sayede hem ince hem de kalın plakalardaki ısı girdisini doğru şekilde hesaplamıştır [1]. Pandey ve arkadaşları tozaltı kaynağı yönteminde kaynaklı plakanın çarpılma miktarını kontrol etmek için yöntem geliştirmiştir [2]. Zargar ve arkadaşları tozaltı kaynağı ile birleştirilen “T” kaynağındaki kalıcı deformasyonları sayısal ve deneysel yöntemlerle incelemiştir. Kaynak sırasının önemli bir parametre olduğunu tespit etmiştir. İrizalp ve arkadaşları bir takım çeliği üzerine sert dolguyu TİG kaynağı ile uygulayarak kaplamanın sertliği geliştirerek aşınmaya karşı direnci sağladığını tespit etmiştir [3].

Çelik ve arkadaşları TİG kaynağı ile paslanmaz çelik malzemelerin sert dolgusunu incelemiştir. Değişik metal tozlarının kaplama sertliğine etkisini ortaya koymuştur [4]. Kaptanoğlu ve Eroğlu adi karbonlu çelik malzemeye tozaltı kaynağı ile sert dolgu uygulamıştır. Ferronyobiyum ve ferrobtor tozlarının hangi oranlarda en yüksek aşınma direncini sağladığını tespit etmiştir [5]. Moselli ve arkadaşları adi karbonlu çelik plakaların TİG kaynağıyla stellite 6 alaşımıyla kaplanmasını ve bunun sonucunda aşınmaya karşı direnç kazanılmasını incelemiştir. Yüksek malzeme yığıma oranı, yüksek kaynak ilerleme hızı ve düşük kaynak akımı ile en iyi sonucu elde etmiştir [6]. Pradeep ve arkadaşları malzemelerin aşınma direncini geliştirmek için kullanılan sert dolgu prosesini inceleyen bir derleme makalesi hazırlamıştır. Sert dolgu prosesinin herhangi bir çelik malzeme üzerinde uygulanabilir olduğu ve değişik alaşım malzemelerinin sertlik , aşınma direnci ve çatlama direnci gibi özellikleri geliştirebildiği sonucuna varmıştır [7]. Kaptanoğlu ve arkadaşları tozaltı kaynağıyla yapılan sert dolgu prosesinin optimum parametrelerini tahmin etmek için yöntem geliştirmiştir [8]. Çelik malzeme üzerinde demir ve kobalt bazlı kaplama malzemeleri kullanılarak yapılan sert dolgu prosesi Zhao ve arkadaşları tarafından incelenmiştir [9].

Wu ve arkadaşları adi karbonlu çelik malzeme üzerine Stellite dolgu kaplama prosesinin simülasyonunu yapmıştır. Ön tavlamanın artık gerilmeleri azaltılabileceğini tespit etmiştir [10]. Orta ve yüksek karbonlu çelikleri sert dolgu ile kaplanması prosesinin simülasyonu Yang ve arkadaşları tarafından yapılmıştır [11].

Lazic ve arkadaşları değişik kalınlıklardaki çelik plakalarda uygulanan sert dolgu prosesinin deformasyon ve artık gerilmeye etkinin deneysel olarak incelemiştir [12]. Lazic ve arkadaşları sert dolgu prosesinde çelik plakalar üzerindeki artık gerilmelerin temperleme yöntemiyle azaltılabileceğini deneysel olarak tespit etmişlerdir [13].



Savaş'ın yaptığı çalışmada sert dolgu yapılan çelik plakalarda boyuna kaynak dikişlerinin deformasyona ve gerilmelere etkisi incelenmiştir [14].

Mevcut çalışmada düşük karbonlu çelik plakaların aşınma direncini geliştirmek için yapılan sert dolgu prosesinin modellemesi yapılmıştır. Modelleme yapılırken TIG kaynağından kaynaklanan ısı girdisi esas alınmış, dolgu malzemesi ve onun metalürjik etkisi hesaba katılmamıştır. Yukarıdaki makalelerde de bahsedildiği gibi kaynak sırası ve kaynak paterni deformasyonlar ve artık gerilmeler için önemli parametrelerdendir. Bu nedenle üzerinde çalışılan plakada değişik yönlerdeki kaynak dikişleri incelenmiş ve en düşük gerilme ve deformasyonu sağlayan kaynak paterni tespit edilmeye çalışılmıştır.

2. YÖNTEM

2.1 Kaynak Simülasyonu

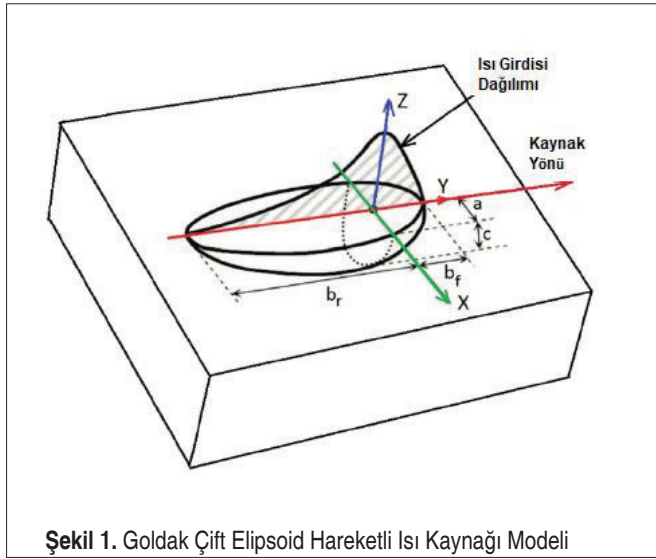
Kaynak simülasyonunun termal kısmı iletim, konveksiyon ve radyasyonu içerir. Modelin yapısal kısmı elastik, plastik ve termal gerinimi hesaba katar. St37'nin sıcaklığa bağlı termo-fiziksel özellikleri, yani iletim katsayısı, özgül ısı ve yoğunluk Chen ve arkadaşlarının çalışmasından alınmıştır [15]. St37'nin sıcaklığa bağlı termo-mekanik özellikleri, yani elastisite modülü, Poisson oranı ve ısıl genleşme katsayısı da aynı referanstan alınmıştır (Tablo 1). Hareketli ısı kaynağı modeli, çift elipsoid bir ısı kaynağı olarak seçilmiştir. Bu model için parametreler, Chen ve arkadaşlarının çalışmasından alınmış ve Tablo 2'de verilmiştir [15]. Hareketli ısı kaynağı modeli Şekil 1'de görülmektedir [16]. Sayısal çalışmada termal kısım ve yapısal kısım karşılıklı olarak

Tablo 1. St37'nin Termofiziksel ve Termomekanik Özellikleri

Sıcaklık (°C)	Yoğunluk (kg/m ³)	Isıl Kapasite (J/kg/°C)	Isıl İletkenlik (W/m/°C)	Young Modülü (10 ⁹ Pa)	Poisson Oranı	Isıl genleşme Katsayısı. (10 ⁻⁷ /°C)
0	7900	444	45.9	205	0.33	120
100	7880	472	44.8	202.5	0.34	122
200	7830	503	43.4	200	0.35	124
300	7790	537	41.4	187.5	0.36	126
400	7750	579	38.9	175	0.37	128
600	7660	692	33.6	148	0.39	132
800	7560	837	28.7	100	0.41	136
1200	7370	860	28.6	17.5	0.45	144
1300	7320	863	29.5	15	0.46	146
1500	7320	-	-	10	0.48	150

Tablo 2. Kaynak Simülasyonu İçin Goldak Parametreleri

a (x yönündeki parametre)	5 mm
b_f (y yönündeki parametre, ön)	5 mm
b_r (y yönündeki parametre, arka)	15 mm
c (z yönündeki parametre)	5 mm
f_f (ön parça)	0.5
f_r (arka parça)	1.5
Kaynak hızı	8.33 mm/s
Kaynak voltajı, U	27 V
Kaynak akımı, I	125 A
Kaynak verimliliği, η	0.9
Isı girdisi, $Q = \eta IU$	3037.5 W



Şekil 1. Goldak Çift Elipsoid Hareketli Isı Kaynağı Modeli

birleştirilmiştir, yani sıcaklık gradyanı, gerinimlerin oluşmasına neden olur ve diğer yandan ergime bölgesinde ve Isı Tesiri Altındaki Bölge'de (ITAB) meydana gelen deformasyon sıcaklık değişikliklerine neden olur.

2.2 Sayısal Model

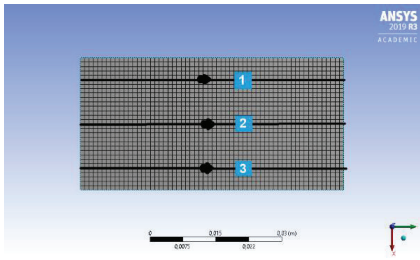
Sert dolgu paternleri Şekil 2a, 2b ve 2c'de gösterilmektedir. Şekil 2a'daki MOD 1 paterninde boyuna kaynak dikişi kullanılmıştır. Şekil 2b'deki MOD 2 paterninde ise sadece enine kaynak dikişi kullanılmıştır. Son patern MOD 3 şekil 2c'de verilmiştir



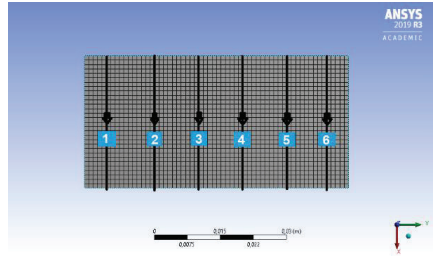
ve hem enine hem de boyuna kaynak dikişleri içermektedir. Toplam kaynak dikişi uzunluğu ısı girdisinin eşit olması maksadıyla 180 mm'de sabit tutulmuştur. Sabit mesnetler Şekil 2d'de gösterilmektedir. Deformasyonları ve artık gerilmeleri azaltmak için birkaç yöntem kullanılabilir. Kullanılan kaynak koşulları 27 V, 125 A ve 8,33 mm / s'dir. Şekil 2a, 2b ve 2c'de, ANSYS FEM modeli için oluşturulan ağ da görülebilir. Artık gerilmelerin çizgisel olarak verildiği iki İz kullanılmıştır. Bu İz'ler Şekil 3'te gösterilmektedir. Modelin en önemli kısmı hareketli ısı kaynağı tarafından sağlanan ısı girdisidir. İki parçalı Goldak çift elipsoid hareketli ısı kaynağı modeli aşağıdaki denklemlerde verilmiştir [1]:

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}(f_f Q)}{ab_f c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a^2} - \frac{3y^2}{b_f^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right) \quad (1)$$

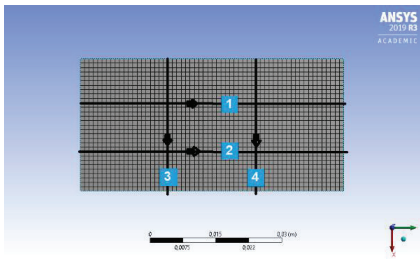
$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}(f_r Q)}{ab_r c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a^2} - \frac{3y^2}{b_r^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right) \quad (2)$$



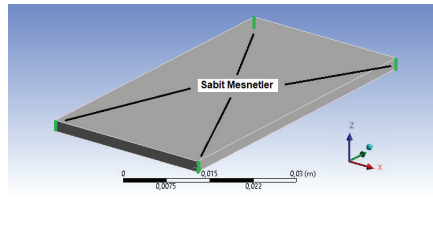
Şekil 2a



Şekil 2b



Şekil 2c



Şekil 2d

Şekil 2 a. MOD 1 Sadece Boyuna Kaynak Dikişi Modeli, b. MOD 2 Sadece Enine Kaynak Dikişi Modeli, c. MOD 3 Hem Enine Hem de Boyuna Kaynak Dikişi Modeli, d. Plakadaki sabit Mesnetler

Burada q_f ısı kaynağının ön kısmı ve q_r arka kısmıdır. Konvektif ısı transferi ve radyasyon emisyonu katsayısı sırasıyla şu şekilde kullanılmıştır: $10 \text{ W/m}^2/\text{K}$, 0.8 . Ortam sıcaklığının 20° C olduğu varsayılmıştır. Plakaların dış köşeleri ANSYS’te sabit mesnet olarak seçilmiştir (Bakınız Şekil 2d). ANSYS “transient structural” modülü kullanılmış ve APDL (Ansys Parametric Design Language) kodu kullanılarak termal analiz yapılmıştır. Sıcaklığa bağlı malzeme özellikleri de APDL kodu olarak verilmiştir (APDL kodları EK’lerde listelenmiştir). Eleman tipi SOLID 226’dır ve elemanlar geometrik olarak altı yüzlüdür. 2 mm kalınlığındaki plakalar hücre boyutları $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ ’dir. Büyük deformasyonlar hesaba katılmıştır.

Termal ve mekanik kısım için geçerli denklemler aşağıda verilmiştir:

Üç boyutlu doğrusal olmayan ısı transfer denklemi şu şekilde yazılabilir:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t}(x, y, z, t) = -\nabla \cdot (-k\nabla T) + Q(x, y, z, t) \quad (3)$$

Burada ρ yoğunluğu temsil eder ve birimi kg / m^3 tür, C ısı kapasitesidir ve birimi $\text{W} / \text{m}^\circ \text{C}^2$ dir. ∇ , uzamsal gradyan operatörüdür. k , termal iletkenlik katsayısıdır ve $\text{W} / \text{m}^\circ \text{C}$ birimine sahiptir. x, y, z kartezyen koordinat eksenleridir ve t zamandır. Q , ısı girdisi anlamına gelir ve Watt birimine sahiptir.

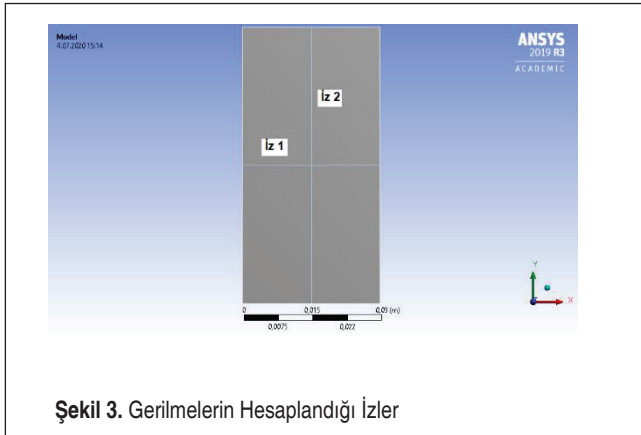
Plastik deformasyon aşağıdaki Von Mises kriteriyle ilişkilidir:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (4)$$

Burada, σ_e eşdeğer gerilmedir ve $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ asal gerilmelerdir.

Toplam gerinim aşağıdaki denklem ile verilebilir:

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_{elastic} + \varepsilon_{plastic} + \varepsilon_{thermal} \quad (5)$$



Şekil 3. Gerilmelerin Hesaplandığı İzler

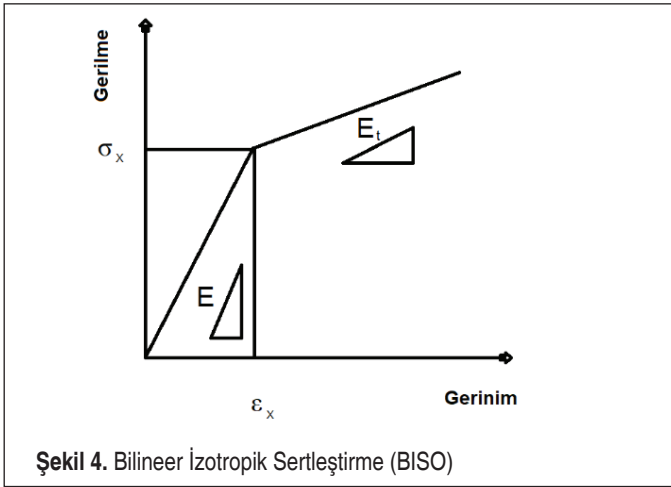


Gerilme ve deformasyon, denge ve kurucu denklemler birleştirilerek elde edilen aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir[14]:

$$[K_1]\{U\}-[K_2]\{T\}=\{R\} \quad (6)$$

Burada K_1 ve K_2 direngenlik matrisleri, U yer değiştirme vektörü, T sıcaklık vektörü ve R her düğümün sıcaklık yükleridir.

Gerinim sertleştirme etkisi Şekil 4'te gösterilmiştir. Burada, E Young modülü ve E_t teğet modülü anlamına gelir. Bu davranışa bilinear izotropik sertleştirme (Bilinear Isotropic Hardening- BISO) denir ve sayısal çözümü basitleştirir.



Şekil 4. Bilinear İzotropik Sertleştirme (BISO)

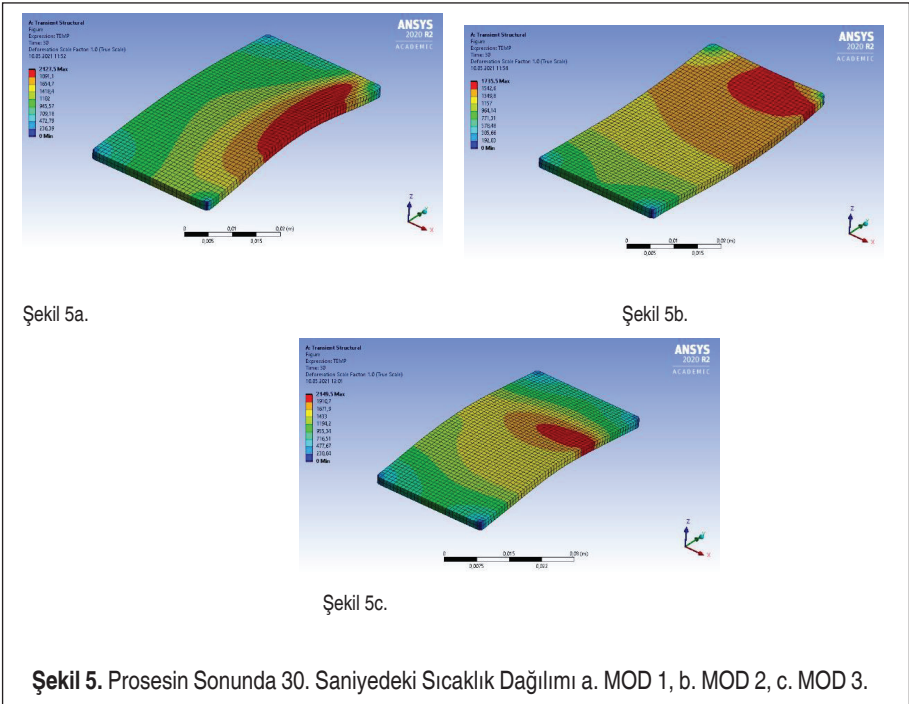
2.3 Doğrulama

Sonlu eleman modelini doğrulamak için ANSYS'de bir plaka modellenmiş ve kaynak prosesi simüle edilmiştir. Plakanın boyutları $300 \times 150 \times 4$ mm'dir ve Chen ve arkadaşlarının çalışmasındaki 1 numaralı deney ile aynıdır [15]. Sıcaklık dağılımı söz konusu makaledeki aynı koşullardaki deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında; deneydeki 1 numaralı ısı çift ve onun karşılığı olan modelin en yüksek sıcaklıklarının sırasıyla 450 ve 444 C olduğu görülmüştür, iki numaralı ısı çift ve modelin en yüksek sıcaklıkları 248 ve 238 C'dir, son olarak üçüncü ısı çift ve model en yüksek sıcaklıklarının her ikisi de 165 C'dir. Bu değerlerden de anlaşılacağı üzere en yüksek hata % 4 olarak ortaya çıkmaktadır. Yapısal kısmın doğrulaması da aynı deneye göre yapılmıştır. Alın kaynaklı plakadaki maksimum deformasyon deneyde 4,5 mm iken 4 mm'lik plaka modelinde 3,5 mm'dir. Bu yüzde 22'lik bir hata yapar. Aynı deneye göre kaynak merkez hattı boyunca uzunlamasına gerilme 328 MPa'dır. Mevcut model, boylamasına gerilmeyi 312 MPa olarak tahmin etmektedir. Hata yüzdesi 4.8'dir. Buradaki değerler

göz önüne alındığında mevcut modelin hem sıcaklık dağılımını, hem deformasyonları, hem de artık gerilmeleri tahmin etmede kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Doğrulama yapıldıktan sonra, $30 \times 60 \times 2$ mm'lik plaka için aynı çift elipsoid ısı kaynağı parametreleri kullanılarak sert kaplama uygulanmıştır. Her üç modelde de toplam kaynak süresi 180 saniye olmaktadır. Denklem 1 ve 2'deki Q değeri 1500 W olarak seçilmiştir ve şu şekilde ayrıştırılabilir: 15 Volt x 111 Amper x 0.9 (kaynak işleminin verimliliği). Kaynak hızı 6 mm / s olarak alınmıştır, dolayısıyla y eksenini boyunca 3 kaynak dikişi MOD 1 için söz konusudur. x eksenini boyunca yapılan 6 kaynak dikişi de MOD2'yi tanımlar. y eksenini boyunca 2 kaynak dikiş ve x eksenini boyunca 2 kaynak dikişi de MOD 3 için geçerlidir. Burada sert dolgu prosesi seyrek dikişler vasıtasıyla plakaların üzerinde gerçekleştirilmiştir. Zamana bağlı sonlu eleman çözümleri çok uzun sürdüğünden böyle bir tasarruf yapılmıştır. Kaldı ki aşınmaya karşı seyrek kaynak dikişlerinin bile faydalı olabileceği değerlendirilmektedir. Burada güdülen bir başka amaç da plakalardaki deformasyon ve gerilme trendlerinin görülmesi ve karşılaştırma yapılabilmesidir. Sert dolgu ile kaplanan plakaların üzerinde bulunabilecek kalıcı deformasyon ve artık gerilmelerin plakaların servis sırasındaki davranışlarına etki edeceği düşünülmüştür. Plakalarda yüksek kalıcı deformasyon istenmez, ayrıca kalıcı

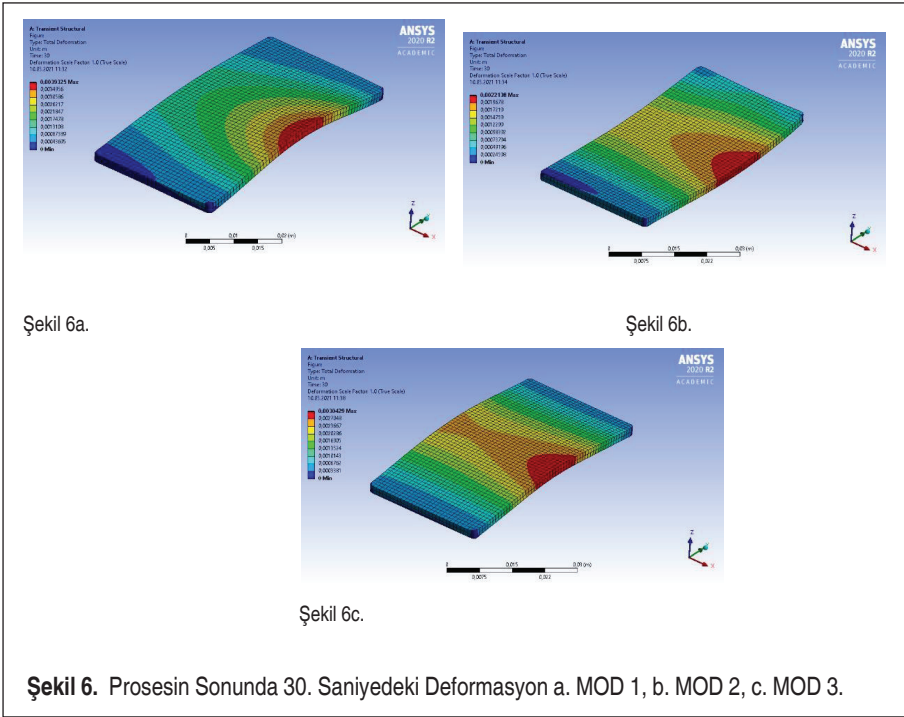




gerilmelerin de basma gerilmesi şeklinde olması emniyetli tarafta kalmamızı sağlar.

Isıl ve yapısal problemin beraber modellenmesi sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekillerde sunulmuştur. Her üç sert dolgu modelinde (Bakınız Şekil 2a, 2b ve 2c), sert dolgu prosesinin son saniyesi olan 30. saniyede meydana gelen sıcaklık dağılımları Şekil 5a, 5b ve 5c’de verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde maksimum sıcaklığın en düşük olduğu modelin MOD 2 olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin boyuna yapılan kaynak prosesinde plakanın daha uzun bir süre ve devamlı olarak ısı iletimine maruz kaldığı değerlendirilmektedir. Sadece enine kaynak yapılan MOD 2 modelinde sıcaklığın bu nedenle 1735 C dereceye kadar yükselebildiği görülmüştür.

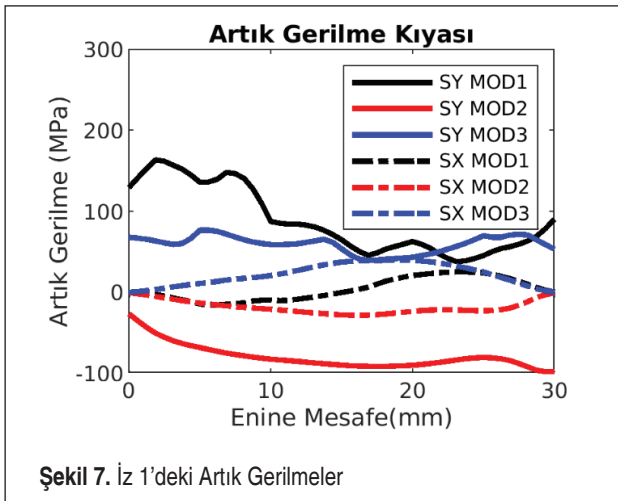
Şekil 6a, 6b ve 6c incelendiğinde kalıcı deformasyonun en fazla olduğu model MOD 1’dir. Bunu sebebinin meydana gelen yüksek sıcaklığa bağlı olduğu söylenebilir. MOD 2’de ise en düşük deformasyon elde edilmiştir. Bunun sebebi de aynı şekilde sıcaklığa bağlı olarak açıklanabilir. Sıcaklığın az veya çok olmasına bağlı olarak ısı genleşme katsayısının etkisiyle ısı gerinim yapısal analiz kısmında etkin olabilmektedir. Sıcaklığın değişmesiyle beraber sadece ısı genleşme katsayısının etkisi söz konusu değildir. Aynı zamanda ısı iletim katsayısı, ısı kapasite ve yoğunluk da sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Yapısal modelde ise Young modülü ve Poisson oranı da sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Bu sayede ısı model ile yapısal model birbiriyle doğrudan ve çift taraflı olarak etkileşim içindedir. Çift taraflı etkileşimden kasıt; sı-



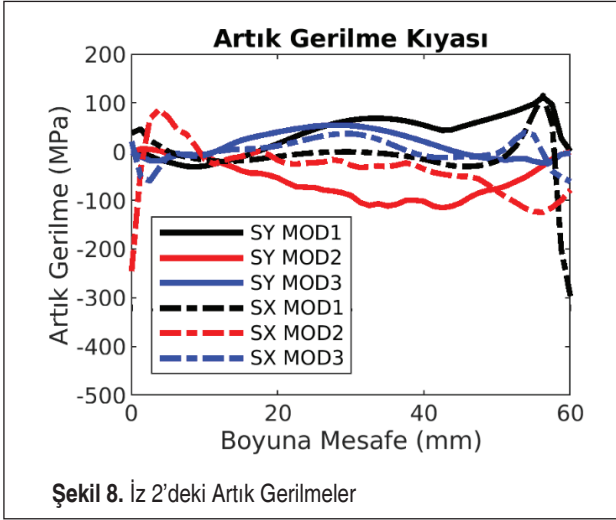
caklık değişiminin deformasyon üzerinde etki etmesiyle beraber deformasyonun da sıcaklık değişimine etkisi olduğu (işle sertleştirme) gerçeğidir. Deformasyonun çarpaz modelde yani MOD 3'te diğer 2 modelin ortasında bir değere sahip olması hem boyuna hem de enine kaynak dikişlerinin yapılmış olmasına bağlanabilir. Şekil 6'da diğer bir önemli husus da MOD 1 ve MOD 3'te dış bükey plaka eğilmesi olurken, MOD 2'de iç bükey eğilme söz konusudur. MOD 1 ve MOD 3'deki dış bükeyliğin boyuna kaynak dikişlerinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

Şekil 7 İz 1 boyunca (Bakınız Şekil 3) meydana gelen boyuna (SY) ve enine (SX) artık gerilmelerin kıyasının yapıldığı şekildedir. Her üç modelde (Bakınız Şekil 2a, 2b ve 2c) meydana gelen enine ve boyuna gerilmelerin karşılaştırmalı olarak sunulduğu bu şekil incelendiğinde; en yüksek değer MOD 1 boyuna gerilmelerde ve en düşük değerin de MOD 2 boyuna gerilmelerde gözlemlendiği görülmüştür. Bu ikisi karşılaştırıldığında MOD 1'de çekme, MOD 2'de ise basma gerilmesinin olduğu görülmektedir. Bunlardan basma gerilmesi her zaman emniyetli tarafta kalmak için tercih edilmelidir. Her üç modelin enine gerilmeleri incelendiğinde, bunların boyuna gerilmelerin MOD 2 ve MOD 3 değerleri arasında yer aldığı görülmektedir. Bunların kendi aralarındaki sıralaması ise büyükten küçüğe doğru MOD 3, MOD 1 ve MOD 2'dir. Burada gene MOD 2'nin en küçük değerle emniyetli tarafta kaldığı görülmektedir.

Şekil 8 İz 2 boyunca (Bakınız Şekil 3) meydana gelen boyuna (SY) ve enine (SX) artık gerilmelerin kıyasının yapıldığı şekildedir. Burada İz 2'nin başlangıcı ve sonundaki küçük mesafeler kapsam dışı bırakıldığında, Şekil 7'dekine benzer bir dizilim oluştuğu görülmektedir. En yüksek değer gene MOD 1 boyuna gerilmelerde görülmektedir. En düşük değer ise MOD 2 boyuna gerilmelerde. Aynı şekilde MOD 2 hem enine hem de boyuna en yüksek basma gerilmesine neden olduğu için en emniyetli modeli oluşturmaktadır.



Şekil 7. İz 1'deki Artık Gerilmeler



4. SONUÇLAR

Sert dolgu prosesinde en yüksek sıcaklığın hem boyuna hem de enine kaynak dikişleri içeren MOD 3'te gerçekleştiği görülmüştür. En düşük sıcaklık ise MOD 2'de görülmüştür. MOD 2 sadece enine kaynak dikişi içermektedir. En düşük deformasyon da MOD 2'de gözlenmiştir. MOD 1 ve MOD 3'te dışbükey eğilme, MOD 2'de ise iç bükey eğilme söz konusudur. MOD1 ve MOD3'teki dışbükeyliğin boyuna kaynak dikişlerinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Dikdörtgen plakadaki enine izde en yüksek artık gerilme MOD 1'deki boyuna gerilmedir, en küçük gerilme ise MOD 2'deki boyuna gerilmedir; enine gerilmeler ise büyükten küçüğe doğru MOD 3, MOD 1 ve MOD 2 şeklinde sıralanmıştır. Dikdörtgen plakadaki boyuna izin başlangıcı ve sonundaki küçük bölgeler hariç gerilmeler enine izdekine benzer bir şekilde sıralanmıştır. Gelecekte bu çalışmanın devamında yapılabilecek çalışmalar şu şekilde özetlenebilir: Plakalar üzerinde seyrek ve sık değişik yüzey paternleri incelenmeli ve bunlarda meydana gelebilecek deformasyon ve artık gerilmeler karşılaştırılmalıdır.

KAYNAKÇA

1. Goldak, J., Chakravarti, A. & Bibby, M. 1984. A New Finite Element Model for Welding Heat Sources. Met. Trans. B 15 B, 299 , doi: 10.1080/21681805.2017.1363816.
2. Pandey, A. K., Dixit, A., Pandey, S. & Pandey, P. M. 2019. Distortion control in welded structure with advanced submerged Arc welding. in Materials Today: Proceedings vol. 26 1492–1495 , doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.306.
3. İrizalp, S. G., Saklakoğlu, N., İldaş, G. & Demirok, S. 2018. 1 . 2714 Çeliği Üzerine Sert Dolgu K aynağı ile K aplanmış Fe-Cr-V E saslı Alaşımın Malzeme Özelliklerinin

- İncelenmesi Examination of Materials Properties of Fe-Cr-V Hardfacing Coating Deposited on. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimar. Fakültesi Derg. 33, 35–46.
4. **Çelik, A. A., Şen, Ş. & Şen, U.** 2015. TIG kaynağı ile yüzeyi sertleştirilen AISI1020 ve AISI 316 çeliğinin mikroyapı incelemeleri Microstructure investigation of harfaced AISI 1020 and AISI 316 steel by TIG welding. 237–244.
 5. **Kaptanoğlu, M. & Eroğlu, M.** 2017. Ferroniyobyum ve Ferrobor İçeren Tozaltı Kaynak Tozları ile Elde Edilen Kaplamaların Mikroyapı ve Aşınma Özelliklerinin Araştırılması. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg. 20, 64–64, doi: 10.17780/ksujes.292373.
 6. **Moselli, P. C., de Oliveira, M. F. & Moreno, J. R. S.** 2013. Wear resistance in hardfacing applied in substrate SAE 1020 using welding process Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) alloy Stellite 6 in powder form. Sci. Res. Essays 8, 1730–1740 , doi: 10.5897/SRE2013.5638.
 7. **Pradeep, G. R. C., Ramesh, A. & Prasad, D. B.** 2010. a Review Paper on Hardfacing Processes and Materials. Int. J. Eng. Sci. Technol. 2, 6507–6510.
 8. **Kaptanoğlu, M., Odabaşı, A. & Aydoğmuş, Z.** 2016. Prediction of Optimal Process Parameters in Hardfacings Obtained by Using Submerged Arc Welding Technique. Haran Üniversitesi Mühendislik Derg. 1, 25–35.
 9. **Zhao, C., Stewart, D., Jiang, J. & Dunne, F. P. E.** 2018. A comparative assessment of iron and cobalt-based hard-facing alloy deformation using HR-EBSD and HR-DIC. Acta Mater. 159, 173–186 , doi: 10.1016/j.actamat.2018.08.021.
 10. **Wu, A. P., Ren, J. L., Peng, Z. S., Murakawa, H. & Ueda, Y.** 2000. Numerical simulation for the residual stresses of Stellite hard-facing on carbon steel. J. Mater. Process. Technol. 101, 70–75 , doi: 10.1016/S0924-0136(99)00456-2.
 11. **Yang, Q. X., Yao, M. & Park, J.** 2004. Numerical simulation on residual stress distribution of hard-face-welded steel specimens with martensite transformation. Mater. Sci. Eng. A 364, 244–248 , doi: 10.1016/j.msea.2003.08.024.
 12. **Lazic, V., Arsić, D., Nikolić, R. R.** 2015. Experimental determination of deformations of the hard faced samples made of steel for operating at elevated temperatures. in Procedia Engineering vol. 111 495–501 , doi: 10.1016/j.proeng.2015.07.122.
 13. **Lazić, V., Arsić, D., Nikolić, R. R. & Hadzima, B.** 2016. Experimental Determination of Residual Stresses in the Hard-faced Layers after Hard-facing and Tempering of Hot Work Steels. in Procedia Engineering vol. 153 392–399 , doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.139.
 14. **Savaş, A.** 2021. Investigating the thermal and structural responses in hard-facing application with the GTAW process. J. Theor. Appl. Mech. 59, 343–35, doi: 10.15632/jtam-pl/136210
 15. **Chen, B. Q., Hashemzadeh, M. & Guedes Soares, C.** 2014. Numerical and experimental studies on temperature and distortion patterns in butt-welded plates. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 72, 1121–1131 , doi: 10.1007/s00170-014-5740-8.
 16. **Xavier, C. R., Junior, H. G. D. & De Castro, J. A.** 2015. An experimental and numerical approach for the welding effects on the duplex stainless steel microstructure. Mater. Res. 18, 489–502 , doi: 10.1590/1516-1439.302014.



EK 1

Transient Structural APDL komutları (çift elipsoid hareketli ısı kaynağı):

```
TREF,20
SF,Convection,CONV,10,20
SF,Convection,RAD,0.8,20
CMSEL,ALL

*GET,EMAX,ELEM,,NUM,MAX
*GET,EMIN,ELEM,,NUM,MIN

ALLSEL
TIME_WELD=10
DT=0.02
A=0.005
B=0.005
C1=0.005
C2=0.015
TAU=0
FF=0.5
FR=1.5
Q=1500
VEL=6e-3
NPT=TIME_WELD/DT
NROPT, FULL

!FIRST PASS

*DO,i,1,NPT,1
WTIME=(i/50)
TIME,WTIME+0*TIME_WELD
HCENTER=VEL*WTIME

*DO,jj,EMIN,EMAX,1
X=CENTRX(jj)-1*0.005
Y=CENTRY(jj)
Z=CENTRZ(jj)
CSI=Y+VEL*(TAU-WTIME)

*IF,Y,GT,HCENTER,THEN
C=C1
F=FF

*ELSE
C=C2
F=FR

*ENDIF
```

```
PART1=(6*(3**0.5)*F*Q)/(A*B*C*3.14*(3.14**0.5))
PART2=(exp(-3*(Z/A)**2))*(exp(-3*(X/B)**2))*(exp(-3*(CSI/C)**2))
QF=PART1*PART2
BFE,jj,HGEN,,QF
*ENDDO

SOLVE

*ENDDO

!SECOND PASS

*DO,i,1,NPT,1
WTIME=(i/50)
TIME,WTIME+1*TIME_WELD
HCENTER=VEL*WTIME

*DO,jj,EMIN,EMAX,1
X=CENTRX(jj)-1*0.015
Y=CENTRY(jj)
Z=CENTRZ(jj)
CSI=Y+VEL*(TAU-WTIME)

*IF,Y,GT,HCENTER,THEN
C=C1
F=FF

*ELSE
C=C2
F=FR

*ENDIF
PART1=(6*(3**0.5)*F*Q)/(A*B*C*3.14*(3.14**0.5))
PART2=(exp(-3*(Z/A)**2))*(exp(-3*(X/B)**2))*(exp(-3*(CSI/C)**2))
QF=PART1*PART2
BFE,jj,HGEN,,QF
*ENDDO

SOLVE

*ENDDO

!THIRD PASS

*DO,i,1,NPT,1
WTIME=(i/50)
TIME,WTIME+2*TIME_WELD
HCENTER=VEL*WTIME

*DO,jj,EMIN,EMAX,1
X=CENTRX(jj)-1*0.025
```



```

Y=CENTRY(jj)
Z=CENTRZ(jj)
CSI=Y+VEL*(TAU-WTIME)

*IF,Y,GT,HCENTER,THEN
C=C1
F=FF

*ELSE
C=C2
F=FR

*ENDIF
PART1=(6*(3**0.5)*F*Q)/(A*B*C*3.14*(3.14**0.5))
PART2=(exp(-3*(Z/A)**2))*(exp(-3*(X/B)**2))*(exp(-3*(CSI/C)**2))
QF=PART1*PART2
BFE,jj,HGEN,,QF
*ENDDO

SOLVE

*ENDDO

CMSEL,ALL
BFEDELE,ALL,ALL
ALLSEL

```

EK 2

Geometry-Solid-Command APDL komutları (St37'nin sıcaklığa bağlı termo-fiziksel ve termo-mekanik özellikleri):

```

ET,1,226
KEYOPT,1,1,11
KEYOPT,1,2,1
KEYOPT,1,6,1
KEYOPT,1,9,1

MPTEMP,1,0,100,200,300,400,600
MPTEMP,7,800,1200,1300,1500

MPDATA,DENS,1,1,7900,7880,7830,7790,7750,7660
MPDATA,DENS,1,7,7560,7370,7320,7320

MPDATA,C,1,1,444,472,503,537,579,692
MPDATA,C,1,7,837,860,863

MPDATA,KXX,1,1,45.9,44.8,43.4,41.4,38.9,33.6
MPDATA,KXX,1,7,28.7,28.6,29.5

MPDATA,KYY,1,1,45.9,44.8,43.4,41.4,38.9,33.6

```


MPDATA,KYY,1,7,28.7,28.6,29.5

MPDATA,KZZ,1,1,45.9,44.8,43.4,41.4,38.9,33.6

MPDATA,KZZ,1,7,28.7,28.6,29.5

MPDATA,EX,1,1,205E09,202.5E09,200E9,187.5E09,175E09,148E09

MPDATA,EX,1,7,100E09,17.5E09,15E09,10E09

MPDATA,EY,1,1,205E09,202.5E09,200E9,187.5E09,175E09,148E09

MPDATA,EY,1,7,100E09,17.5E09,15E09,10E09

MPDATA,EZ,1,1,205E09,202.5E09,200E9,187.5E09,175E09,148E09

MPDATA,EZ,1,7,100E09,17.5E09,15E09,10E09

MPDATA,NUXY,1,1,0.33,0.34,0.35,0.36,0.37,0.39

MPDATA,NUXY,1,7,0.41,0.45,0.46,0.48

MPDATA,NUYZ,1,1,0.33,0.34,0.35,0.36,0.37,0.39

MPDATA,NUYZ,1,7,0.41,0.45,0.46,0.48

MPDATA,NUXZ,1,1,0.33,0.34,0.35,0.36,0.37,0.39

MPDATA,NUXZ,1,7,0.41,0.45,0.46,0.48

MPDATA,GXY,1,1,205E09/2.8,202.5E09/2.8,200E9/2.8,187.5E09/2.8,175E09/2.8,148E09/2.8

MPDATA,GXY,1,7,100E09/2.8,17.5E09/2.8,15E09/2.8,10E09/2.8

MPDATA,GYZ,1,1,205E09/2.8,202.5E09/2.8,200E9/2.8,187.5E09/2.8,175E09/2.8,148E09/2.8

MPDATA,GYZ,1,7,100E09/2.8,17.5E09/2.8,15E09/2.8,10E09/2.8

MPDATA,GXZ,1,1,205E09/2.8,202.5E09/2.8,200E9/2.8,187.5E09/2.8,175E09/2.8,148E09/2.8

MPDATA,GXZ,1,7,100E09/2.8,17.5E09/2.8,15E09/2.8,10E09/2.8

MPDATA,AL

PX,1,1,0.000012,0.0000122,0.0000124,0.0000126,0.0000128,0.0000132

MPDATA,ALPX,1,7,0.0000136,0.0000144,0.0000146,0.000015

MPDATA,AL

PY,1,1,0.000012,0.0000122,0.0000124,0.0000126,0.0000128,0.0000132

MPDATA,ALPY,1,7,0.0000136,0.0000144,0.0000146,0.000015

MPDATA,AL

PZ,1,1,0.000012,0.0000122,0.0000124,0.0000126,0.0000128,0.0000132

MPDATA,ALPZ,1,7,0.0000136,0.0000144,0.0000146,0.000015

TB,BISO,1,1,2

TBDATA,,235E06,2E09

MP,QRATE,1,0.9