

KAYNAĞIN İKİ BOYUTTAKİ TRANSİYEN TERMAL ELASTO- PLASTİK SİMULASYONU

Ergün NART

Özet - Bu çalışmada kaynak yapımı sonucunda yapıda kalan artık gerilmeler, sonlu elemanlar metodunun kullanımı ile hesaplanmıştır. İlk aşamada ısı dağılımının zamana göre değişimi bulunmuş ve bu ısı dağılımı sonucu oluşan gerilmeler elastik ve plastik formülasyona göre hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler - Kaynak simülasyonu, Sonlu elemanlar metodu, Artık gerilmeler

Abstract - In this research, the residual stresses resulted from welding process are calculated by using finite element method. First, the temperature distribution changing with respect to time is determined. Then the residual stresses resulted by this temperature distribution are evaluated according to the elastic-plastic formulations.

Keywords - Welding Simulation, Finite Element Method, Residual Stresses

I.Giriş

Kaynakla iki metalin birleştirme işlemi, endüstride çok sık kullanılan bir yöntemdir. Kısmi bir bölgeye yüksek miktarda ısı uygulandığı ve bağlayıcı metalin erimiş bir durumda kaynak yerine ulaştığı için, bölgede soğuma sonrası oluşan gerilmeler, yapıda kalıcı şekil değişikliklerine yol açmaktadır. İçeriği nikel esaslı süper austenitik paslanmaz çelikler, demir esaslı sıradan çeliklere göre ısı genleşme katsayısı daha büyük olduğu için, bu kalıcı deformasyon bu tip çeliklerde daha fazla olmaktadır. Bu tip çelik malzemelerin gemi endüstrisinde kullanılmasını yüksek teknolojiye sahip ülkelerde uzun zamandır araştırma konusu olmaktadır. Paslanmaya karşı dayanıklı olması ve manyetik özelliği bulunmaması gibi özellikleri yüzünden, bu çelikler, gemilerin bakım masraflarını azaltmakta ve deniz mayınlarına karşı askeri alanda koruma sağlamaktadır.

II. ISI DAĞILIMININ BULUNMASI

Kaynak işlemi sonucu oluşan gerilmelerin hesabı iki aşamada yapılabilir. Birinci aşamada bölgedeki ısı dağılımı hesapları için temel ifade:

$$\frac{\partial(k(T,t)\partial T/\partial x)}{\partial x} + \frac{\partial(k(T,t)\partial T/\partial y)}{\partial y} + Q + \dot{Q}_{tot} = \rho(T,t)C(T,t)\frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

olup zamana bağlı ısı dağılımını hesaplamaya yarar [5]. Sonlu elemanlar metodunda, her element için sıcaklık, yaklaşık olarak, şekil fonksiyonlarının lineer kombinasyonu şeklinde

$$\bar{T} = \sum_{i=1}^{10,12} N_i T_i \quad (2)$$

olduğu varsayılır. Yukardaki deklemden N_i şekil fonksiyonlarını, T_i sıcaklığı temsil etmektedir. Galerkin metodunu ve 2 numaralı deklemleri kullanarak, diferensiyel deklemler

$$\int_{\Omega_e} \rho c N_i N_j dx dy \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\}_j + \int_{\Omega_e} \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} k_x \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} k_y \frac{\partial N_j}{\partial y} \right] dx dy \{T\}_j = \int_{\Omega_e} N_i (Q + \dot{Q}_{tot}) dx dy + \int_{\Gamma} N_i \bar{q} d\Gamma \quad (3)$$

formuna getirilir [9]. Denklem 3 ise

$$C\dot{T} + KT = F \quad (4)$$

şeklinde de ifade edilebilir. Özelliklerin zaman ve sıcaklık ile değiştiğini göz önüne alırsak, deklemler

$$C(T,t)\dot{T} + K(T,t)T = F(T,t) \quad (5)$$

formunda yazılabilir. Genelleştirilmiş orta nokta metodunun kullanımı ile denklem 5

$$C(T_{n+\alpha}, t_{n+\alpha})T_{n+\alpha} + K(T_{n+\alpha}, t_{n+\alpha})T_{n+\alpha} = F(T_{n+\alpha}, t_{n+\alpha}) \quad (6)$$

halini alır. Burada n "n" inci zaman adımını temsil etmekte ve $0 \leq \alpha \leq 1$ arası değişmektedir.

$$\begin{aligned} T_{n+\alpha} &= (1-\alpha)T_n + \alpha T_{n+1}, \\ \dot{T}_{n+\alpha} &= \frac{T_{n+1} - T_n}{\Delta t}, \\ t_{n+\alpha} &= t_n + \alpha \Delta t. \end{aligned} \quad (7)$$

7. denklemi 6. denklem içine yerleştirirsek

$$\left[\frac{C_{n+\alpha}}{\Delta t} + \alpha K_{n+\alpha} \right] (T_{n+1}) = \left[\frac{C_{n+\alpha}}{\Delta t} - (1-\alpha)K_{n+\alpha} \right] (T_n) + (F_{n+\alpha}) \quad (8)$$

denklemi elde edilir. α değişgenin değerini 0 ile 1 arasında değiştirerek değişik metodlar elde edilir. Örneğin;

$\alpha = 0$ -İleri Euler.

$\alpha = \frac{1}{2}$ -Orta nokta kuralı veya Crank Nicolson.

$\alpha = \frac{2}{3}$ -Galerkin.

$\alpha = 1$ -Geri Euler.

metodlarını verir [6,7].

Bütün bu yukardaki yöntemler, birinci ileri Euler yöntemi hariç, dolaylıdır. Çözüm için matris tersi alma işleminin yapılması zorunludur.

Lineer olmayan bu problemde yakınsama kriteri

$$\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N \{T_k^i\}^2 - \{T_k^{i-1}\}^2}{\sum_{k=1}^N \{T_k^i\}^2}} \leq \text{Tolerans} \quad (9)$$

olarak tanımlanır. Aşağıdaki formülden görülebileceği gibi zaman aralıkları Δt_{cr} den küçük olmalıdır.

$$\Delta t < \Delta t_{cr} \equiv \frac{2}{(1-2\alpha)\lambda} \quad (10)$$

denklemden

$$\lambda = \frac{\{\Delta T\}^T [K]^T \{\Delta T\}}{\{\Delta T\}^T [C] \{\Delta T\}} \quad (11)$$

dır. Formülde;

$\lambda \rightarrow$ zaman özdeğeri

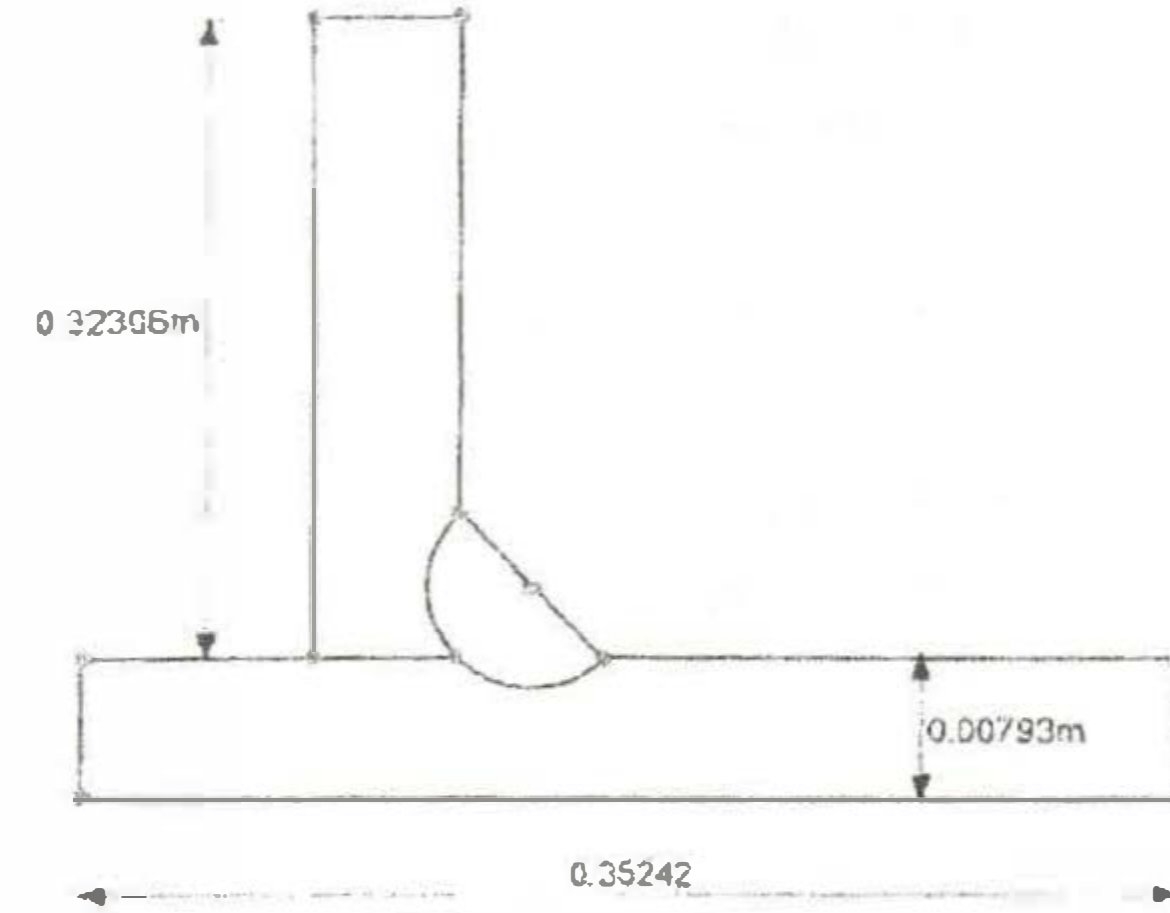
$\{\Delta T\} \rightarrow$ bir önceki çözüm (t_{n-1} eden t_n 'e)

$[K] \rightarrow$ kondüksiyon matrisi

$[C] \rightarrow$ özgül ısı matrisi

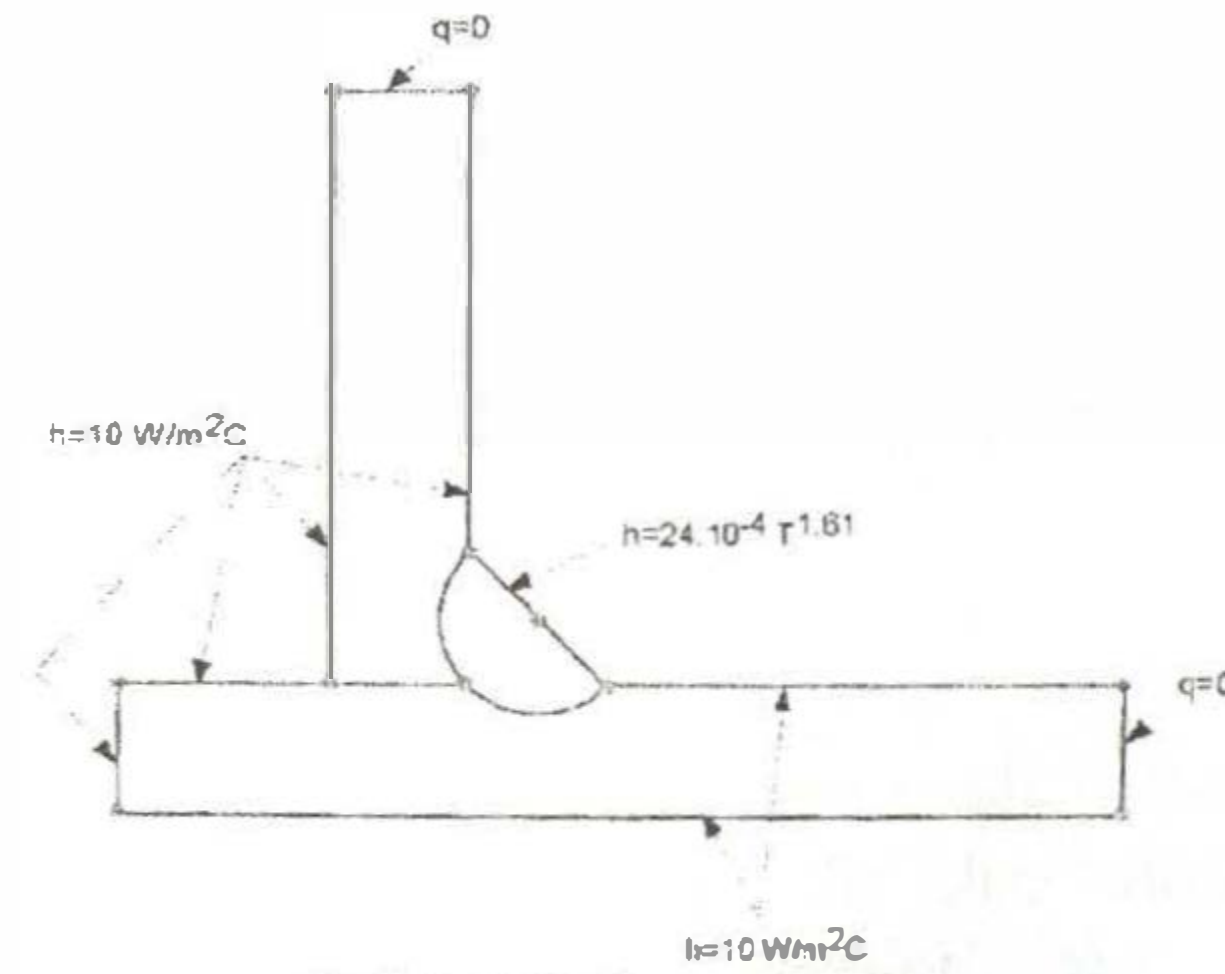
anlamlarına gelmektedir.

Şekil 1'de görüldüğü gibi, kaynak yapılacak parça simetri olanağından yararlanılarak $\frac{1}{4}$ 'ü sonlu elemanlar analizinde kullanılacaktır.



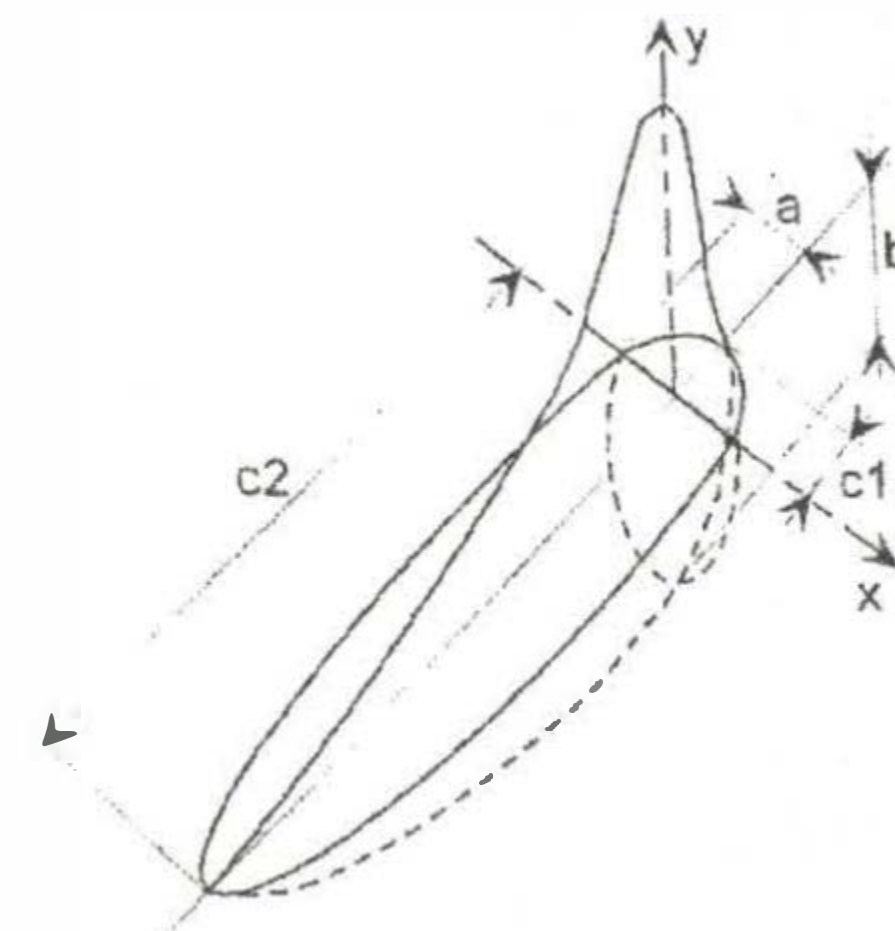
Şekil 1. Kaynak parçası

Isıl sınır şartları ise



Şekil 2. Isıl sınır şartları

şeklindedir. Yarım daire şeklindeki kaynak metalinin bölgesine ise Goldak modeline [14] göre bir ısı üretici uygulanır (Şekil 3).



Şekil 3. Goldak ısı üretici modeli

Lineer ısı genleşme katsayısı	
Sıcaklık	Isı genleşme katsayısı
°C	(10 ⁻⁶ /°C)
20	8.5
100	15.3
200	15.5
300	15.7
400	16
500	16.4
600	16.7
700	17.1
800	17.6
1200	19.6
1250	19.9
1300	20.1
1320	20.4

Modele göre; iki ellipsoid kaynak elektrodunun önü ve arkasında Gaussiyen bir dağılım gösterir ve uygulanacak ısı akısını veren formül;

$$q_{1,2} = \frac{6\sqrt{3}f_{1,2}Q}{a.b.c_{1,2}\pi\sqrt{\pi}} e^{-\frac{3x^2}{a^2}} e^{-\frac{3y^2}{b^2}} e^{-\frac{3(z-v)}{c^2}} \quad (12)$$

şeklindedir.

Hesaplamalar sırasında kullanılan malzeme nikel tabanlı AL-6XN adlı süper austenitik çelik olup, zamana göre değişen özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir. Diğer taraftan çelik malzeme

austenitik yapıya sahip olduğu için faz dönüşümlerinin etkisi ihmal edilmiştir.

Deneyel katsayılar ise

$$a = 0.00635 \text{ m}$$

$$b = 0.00317 \text{ m}$$

$$c_1 = 0.005 \text{ m}$$

$$c_2 = 0.01 \text{ m}$$

$$\eta = 0.85$$

$$V = 35 \text{ Volt}$$

$$I = 120 \text{ Amp}$$

$$v = 0.004 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

olarak alınmıştır.

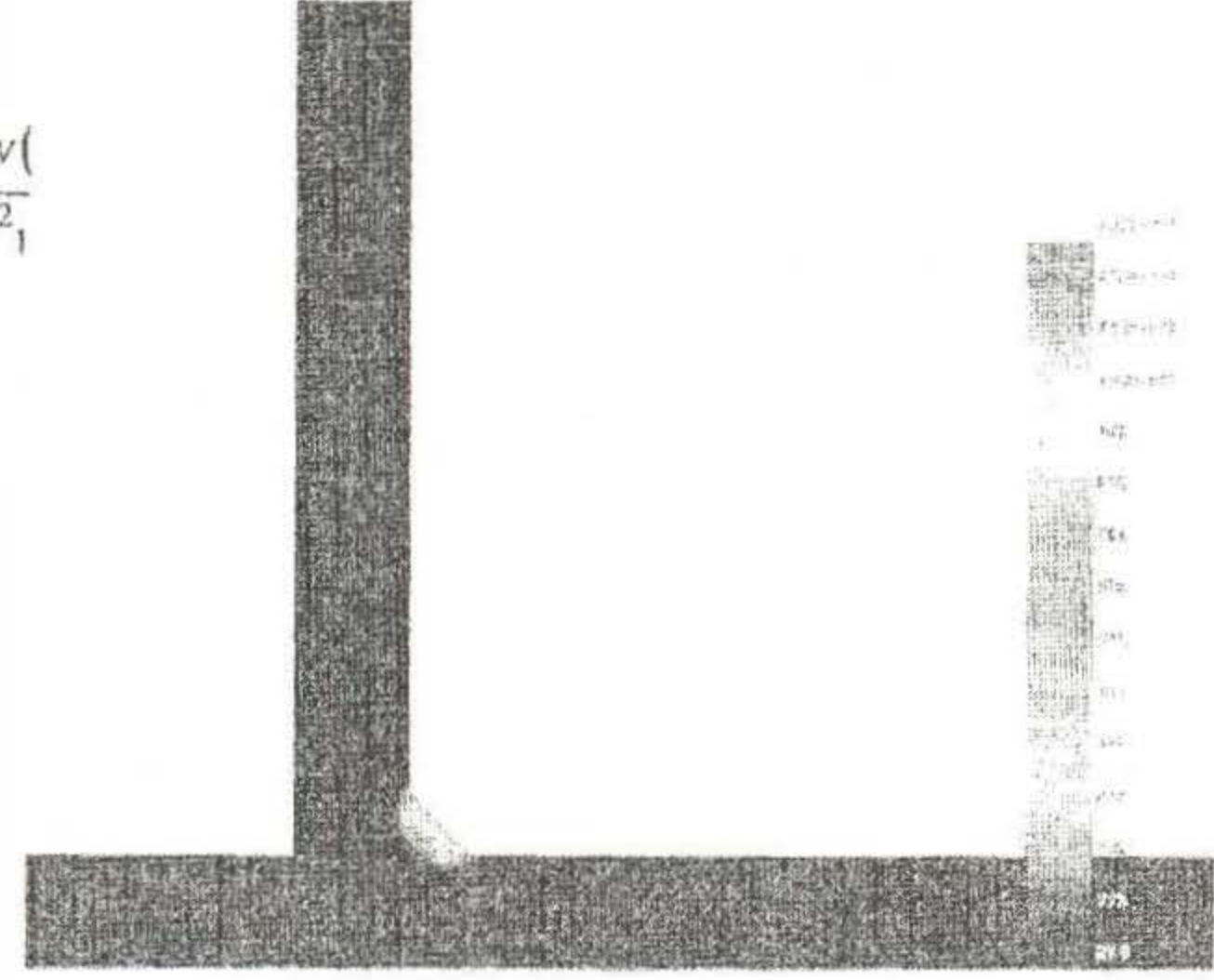
Tablo 1. AL-6XN adlı malzemenin özelliklerinin sıcaklıkla değişimi

Isı iletim katsayısı	
C°	W/mK
20	13.7
100	13.7
500	25
1320	40

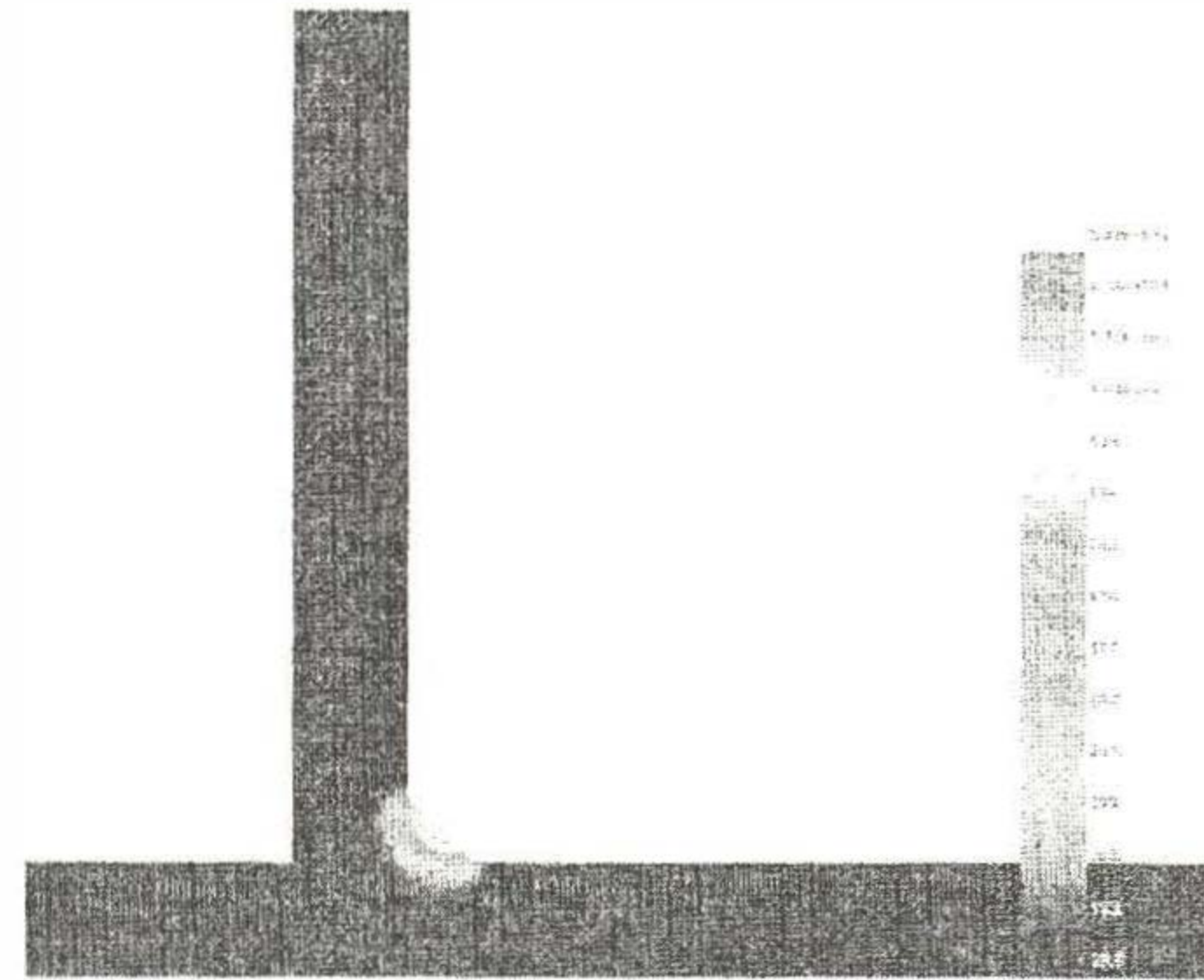
Özgül Isı (Cp)	
C°	J/kgK
20	500
500	600
1200	650
1320	665

Sonlu elemanlar formülasyonu

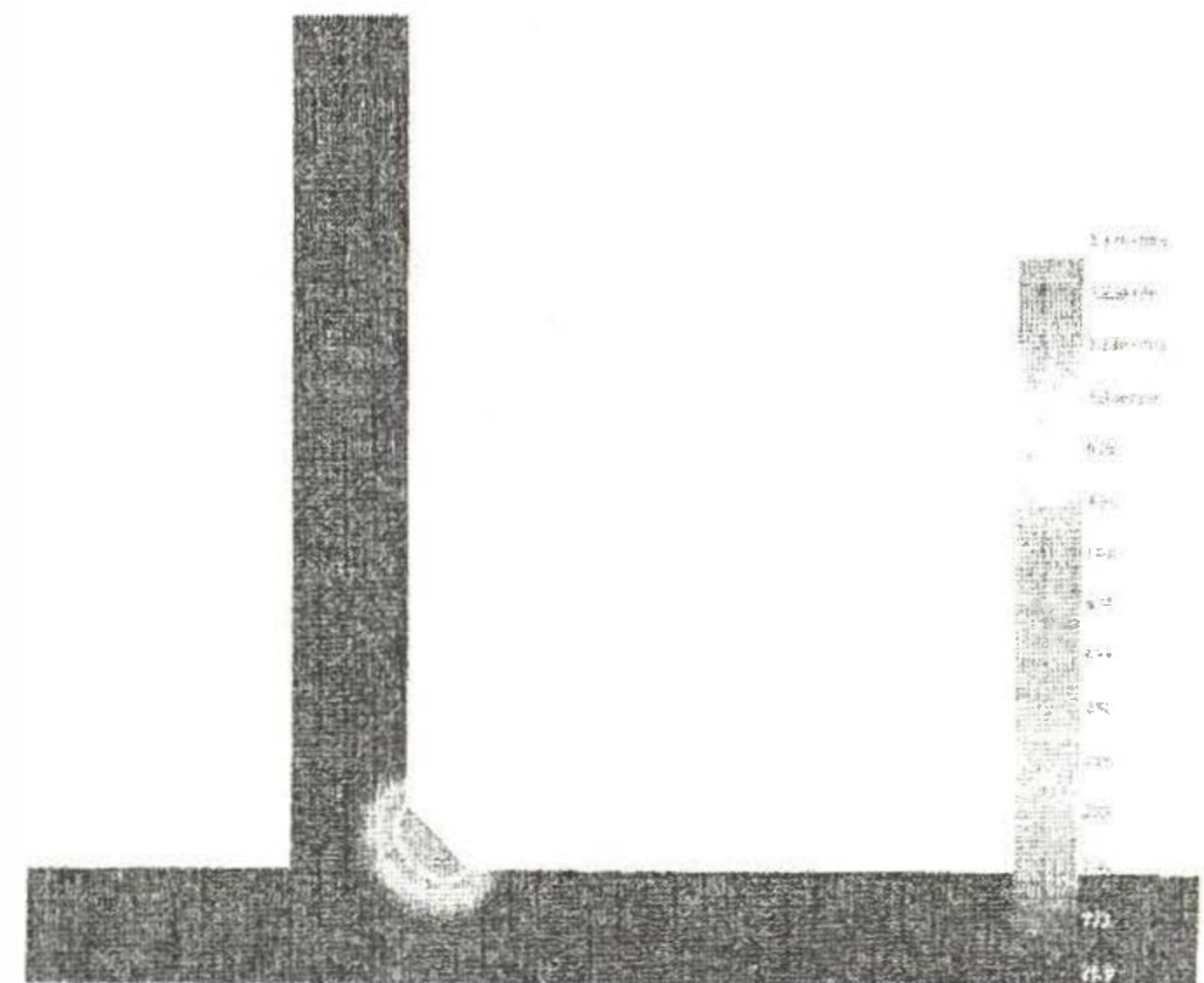
sonucunda oluşturulan lineer deklem sistemi, frontal veya iterative çözücü ile çözülür. Frontal çözücü kullanılan bilgisayar sisteminin düşük miktarda belleğe sahip olması durumunda kullanılır. İteratif çözücü ise yüksek miktarda bellek bulunması durumunda seçilir.



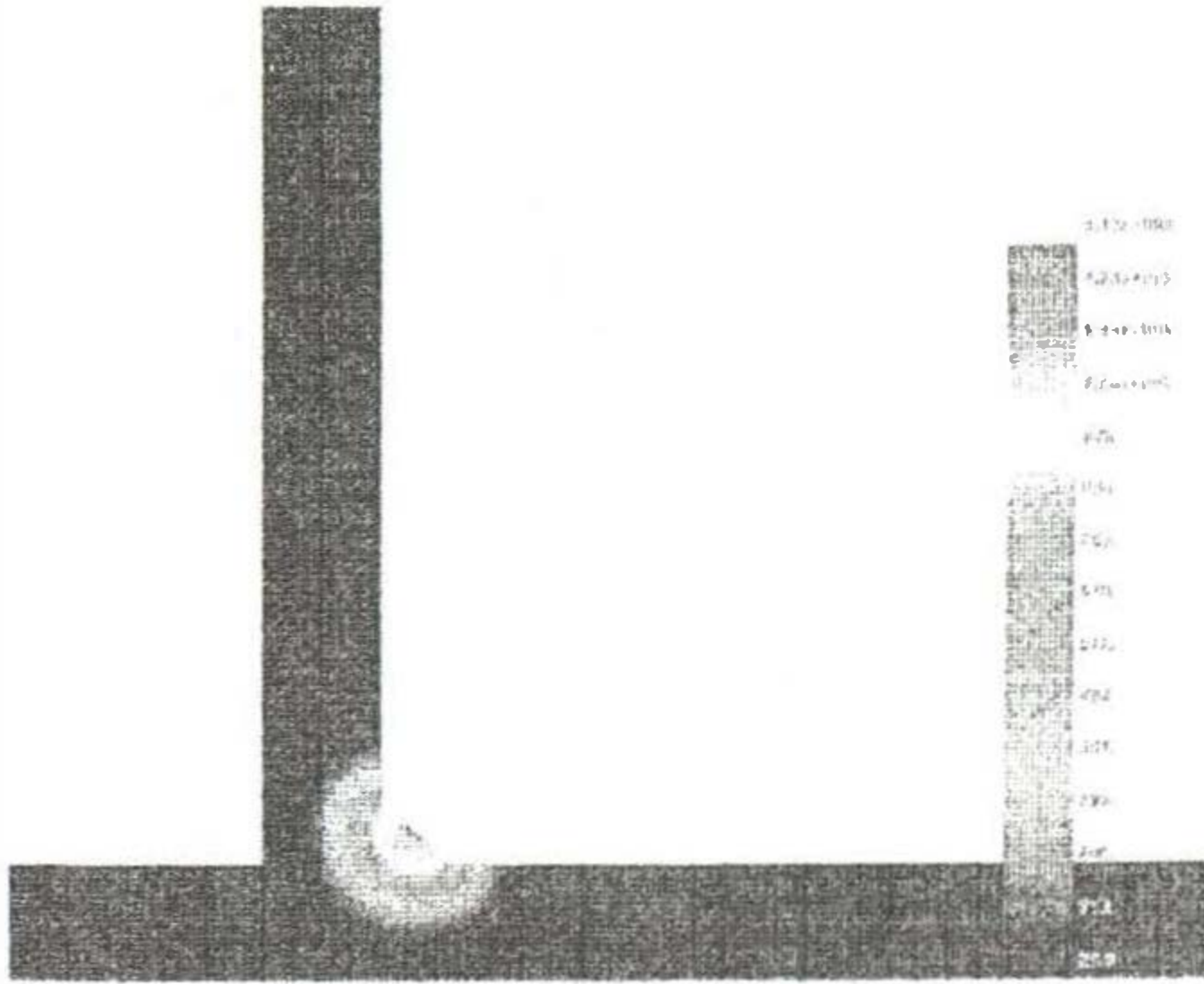
Şekil 4. Kaynak elektrodunun ilgi noktasına yaklaşırkenki sıcaklık dağılımı t=0.01 sn.



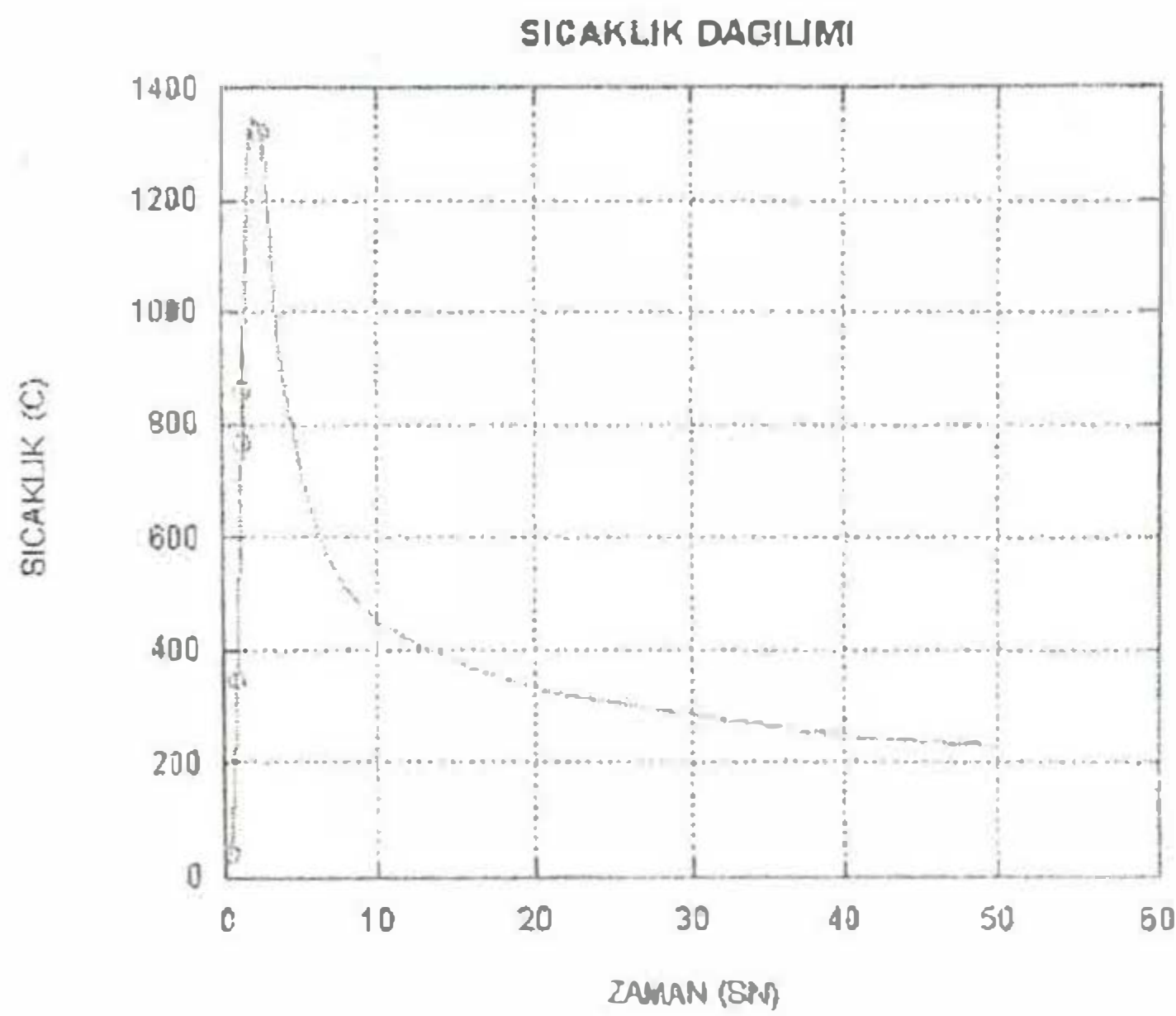
Şekil 5. Kaynak elektrodunun ilgi noktasına yaklaşırkenki sıcaklık dağılımı t=0.5 sn.



Şekil 6. Kaynak elektrodunun ilgi noktası üzerindeyken sıcaklık dağılımı t=1.25 sn.



Şekil 7. Kaynak elektrodunun ilgi noktasına uzaklaşırkenki sıcaklık dağılımı t=3.5 sn.



Şekil 8. x=0.032 y=0.0069 koordinatlarındaki zamana bağlı sıcaklık değişimi.

III. ISIL-ELASTO-PLASTİK FORMÜLASYON

Elasto-plastik formulasyonda birim şekil değiştirme ve gerilme arasındaki ilişki;

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon_e\} = [D](\{\epsilon\} - \alpha(T - T_0) - \epsilon_p) \quad (13)$$

şeklindedir. Burada formülde düzlemsel birim şekil değiştirmeye göre;

$$D = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad (14)$$

dir.

Düzlemsel gerilme problemlerinde ise;

$$D = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

dir. ϵ_p ise plastik şekil değiştirmeyi temsil etmektedir. Artımsal olarak ifade

$$\{d\sigma\} = [D](\{d\epsilon\} - \alpha dT - \{T - T_0\} d\alpha - d\epsilon_p) + [dD]\{\epsilon_e\} \quad (16)$$

formunda yazılabilir. Artımsal plastik şekil değiştirme aşağıdaki gibi türetilir [3].

$$F(\sigma, \theta, \sigma_0) = 0 \quad (17)$$

Yukarıdaki ifadede F akma sınırı fonksiyonu olarak adlandırılır. θ ise akma sınırı yüzeyinin yerdeğiştirme miktarını verir. σ_0 akma sınırı yüzeyinin ölçüsünü veren bir değişendir.

Diğer yandan, akma sınırı yüzeyinin ölçüsü, sıcaklığın ve birikmiş plastik şekil değiştirme miktarının bir fonksiyonu gibi ele alınabilir.

$$\sigma_0 = \sigma_0(E_p, T) \quad (18)$$

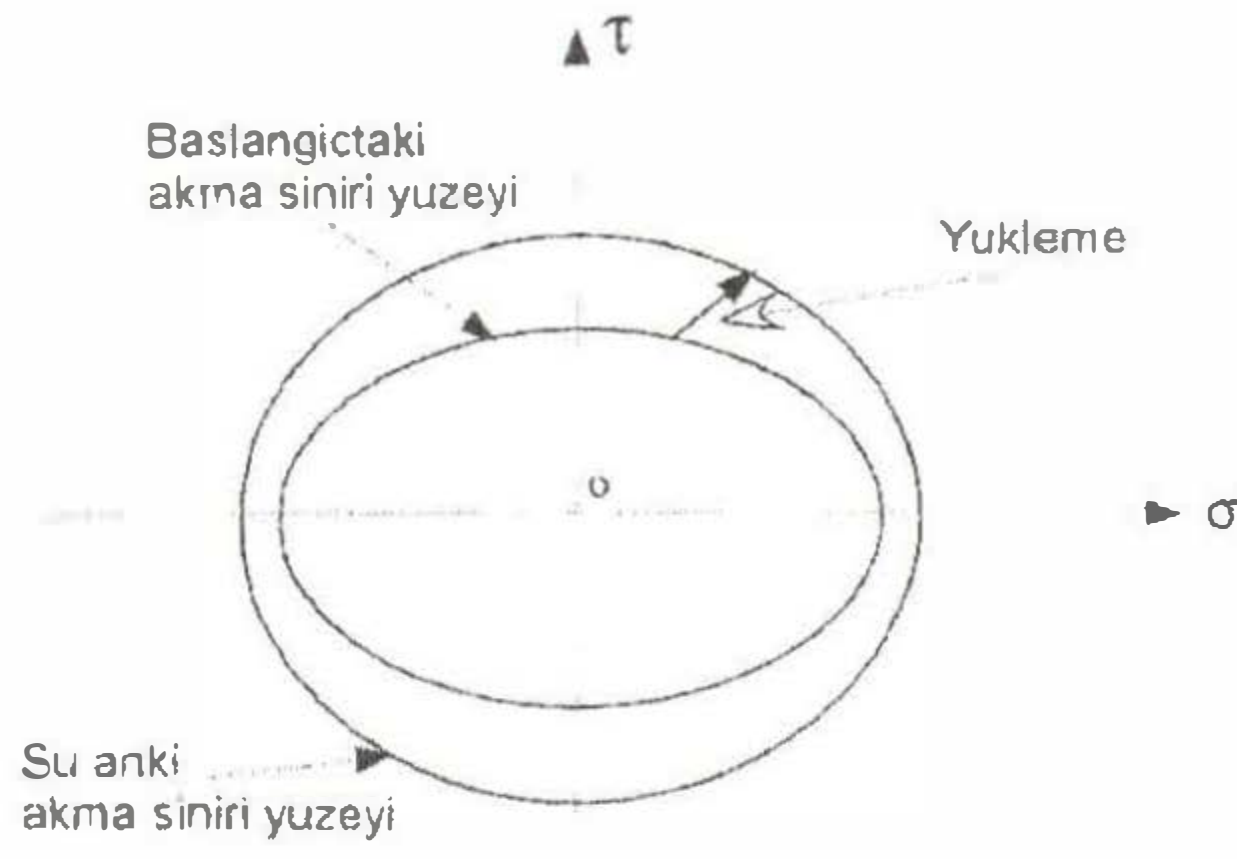
Genel olarak, akma noktası yüzeyinin şekli, ölçüsü ve konumu, malzemedeki plastik deformasyon süreci ile değişir. Bu fiziksel olaya şekil değiştirme tokluğu denir.

İsotropik toklaşma durumunda: akma sınırı yüzeyinin konumunda hiç bir değişiklik olmaksızın, yüzeyin miktarında bir artma olduğu kabul edilir (Şekil 9).

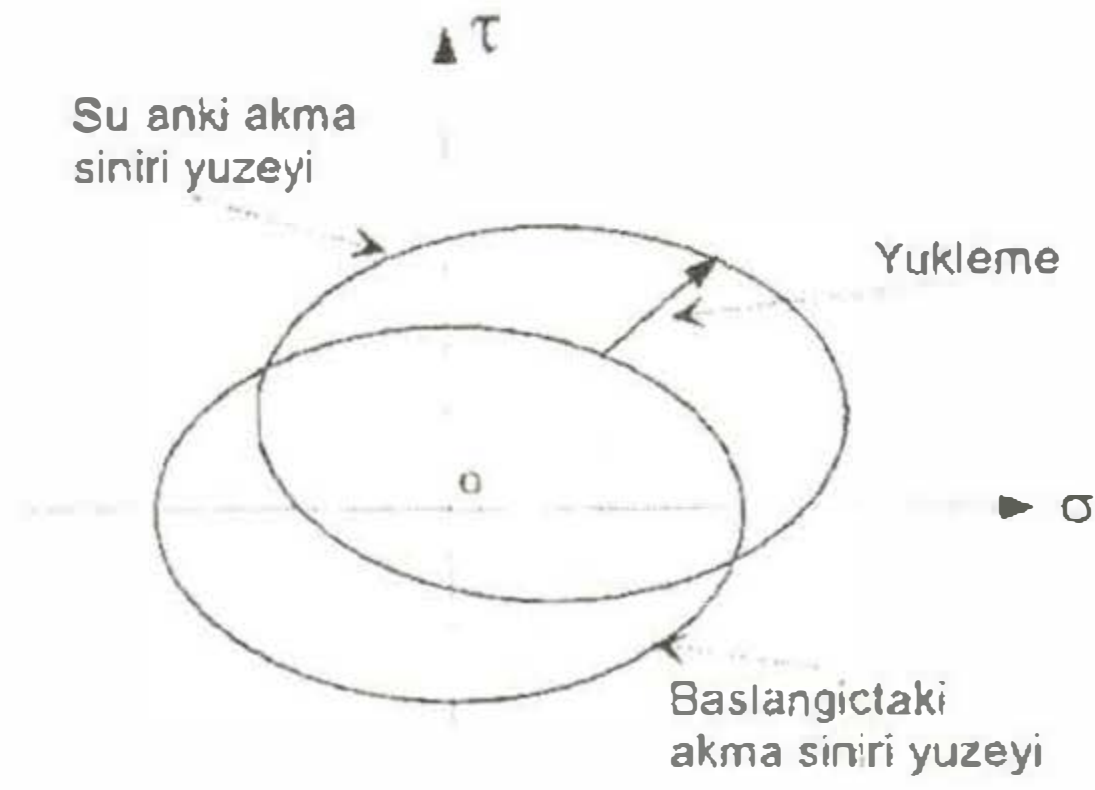
Kinematik toklaşmada ise, miktarı sabit kalmak sureti ile, akma sınırı yüzeyinin konumu değişir (Şekil 10). Bauschinger etkisine bağlı olarak, malzemelerin tekrarlı yüklenmesi durumunda bu iki teorinin bir kombinasyonunun kullanılması en iyisi yöntemdir.

$$F(\sigma, \theta, \sigma_0) = f(\sigma - \theta) - \sigma_0(E_p, T) = 0 \quad (19)$$

$dF > 0$ olması durumunda malzemede gerilme, akma noktasını geçer ve plastik deformasyon meydana gelir. $dF < 0$ olması durumu ise elastik geri yükleme olur. $dF = 0$ halinde nötr yükleme oluşur.



Şekil 9. İsootropik toklaşma hali



Şekil 10. Kinematik toklaşma hali.

Akma sınırına gelmeden önce $F = 0$ ve $dF = 0$ dır.

$$dF = \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma^*} \right)^T d(\sigma - \theta) - \left(\frac{\partial \sigma_0}{\partial E_p} \right) dE_p - \left(\frac{\partial \sigma_0}{\partial T} \right) dT = 0 \quad (20)$$

formülde $\sigma^* = (\sigma - \theta)$ dir. Prager'e göre akma sınırı yüzeyinin yerdeğiştirilmesi birim plastik şekil değiştirme artımı ile aynı yöndedir.

$$\{d\theta\} = C \{d\varepsilon_p\} (1 - \xi) = \frac{2H}{3} dE_p \{n\} (1 - \xi) \quad (21)$$

formüldeki ξ bir katsayı ve $C = 2H/3$ sabit tir [17]. İsootropik toklaşma durumunda $\xi = 1$, kinematik toklaşma durumunda ise $\xi = 0$ dır. H değişgeni

$$H = \frac{d\bar{\sigma}}{dE_p} = \frac{EE^T}{(E - E^T)} \quad (22)$$

olarak tanımlanır. Formülde $\bar{\sigma}$ efektif gerilmeyi temsil etmektedir. 21 numaralı denklem, 20 numaralı denklemde yerine yerleştirilir ise;

$$dF = \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma^*} \right)^T \left(\{d\sigma\} - \frac{2H}{3} dE_p \{n\} (1 - \xi) \right) - \left(\frac{\partial \sigma_0}{\partial E_p} \right) dE_p - \left(\frac{\partial \sigma_0}{\partial T} \right) dT = 0 \quad (23)$$

denklemini elde edilir. Von Mises akma sınırı kriterine göre;

$$f = J_2' = \frac{1}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij} \quad (24)$$

formülde J_2' ikinci deviatorik invariyan ve şu andaki akma sınırı dayanımı

$$Y = Y_0 + \xi H E_p^e \quad (25)$$

$$\sigma_0 = Y^2 / 3 \quad (26)$$

dır. Akma sınırı yüzeyine normal olan vektör;

$$\{n\} = \frac{\left(\frac{\partial f}{\partial \sigma^*} \right)}{f_m} \quad (27)$$

$$f_m = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial \sigma^*} \right)^T \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma^*} \right)}$$

halindedir.

$$\left(\frac{\partial f}{\partial \sigma^*} \right)^T = \left(\frac{\partial J_2'}{\partial \sigma^*} \right) = \{ \sigma'_{11}, \sigma'_{22}, \sigma'_{33}, \sigma'_{12}, \sigma'_{23}, \sigma'_{31} \} \quad (28)$$

En genel halde σ'_{mn}

$$\sigma'_{mn} = (\sigma'_{mn} - \theta_{mn}) \quad (29)$$

olarak yazılır.

Artımsal teoride, plastik sınırlar içinde tanımlanan bir potansiyel fonksiyon; akma sınırı fonksiyonu olarak adlandırılır. Plastik birim şekil değiştirme artımı akma sınırı yüzeyine normaldir ve

$$\{de^p\} = \frac{\sqrt{3/2} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma^*} \right\}}{\left[\left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma^*} \right\}^T \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma^*} \right\} \right]^{1/2}} dE_p^e \quad (30)$$

$$= \sqrt{3/2} \{n\} dE_p^e = dE_p \{n\}$$

olarak elde edilir. Efektif plastik birim şekil değiştirme artımı;

$$d\bar{E}_p = \left[2/3 (d\epsilon^p)^T (d\epsilon^p) \right]^{1/2} = \sqrt{2/3} dE_p \quad (31)$$

25 ve 26 numaralı denklemlerden

$$\frac{\partial \sigma_0}{\partial E_p} = \left(\frac{2}{3} \right)^{3/2} Y H \xi \quad (32)$$

$$\frac{\partial \sigma_0}{\partial T} = \left(\frac{2Y}{3} \right) \frac{\partial Y}{\partial T} \quad (33)$$

yazılabilir.

$$\begin{aligned} \{n\}^T f_m (\{d\sigma\} - \frac{2H}{3} dE_p \{n\} (1-\xi)) \\ = \frac{2Y}{3} \left(\left(\frac{\partial Y}{\partial T} \right) dT + \sqrt{\frac{2}{3}} H \xi dE_p \right) \end{aligned} \quad (34)$$

Denklem 34 ve 16'da $\{d\sigma\}$ ifadesini yok ederek tekrar düzenlersek plastik birim şekil değiştirme artım miktarı aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{aligned} dE_p = \frac{\{n\}^T [D] (\{d\epsilon\} - \{\alpha\} dT - (T - T_0) \{d\alpha\})}{S} \\ + \frac{\{n\}^T [dD] \{\epsilon_e\} - 2/3 Y f_m^{-1} (\partial Y / \partial T) dT}{S} \end{aligned} \quad (35)$$

formülde

$$\begin{aligned} S = \{n\}^T [D] \{n\} + 2/3 H \{n\} (1-\xi) \\ + 2Y/3 f_m^{-1} \xi H \sqrt{2/3} \end{aligned} \quad (36)$$

dir. Plastik deformasyon altındaki artımsal gerilme:

$$\begin{aligned} \{d\sigma\} = [D] (\{d\epsilon\} - \alpha dT - \{T - T_0\} d\alpha) + [dD] \{\epsilon_e\} \\ - [D] \{n\} \left(\frac{\{n\}^T [D] (\{d\epsilon\} - \{\alpha\} dT - (T - T_0) \{d\alpha\})}{S} \right. \\ \left. + \frac{\{n\}^T [dD] \{\epsilon_e\} - 2/3 Y f_m^{-1} (\partial Y / \partial T) dT}{S} \right) \end{aligned} \quad (37)$$

olarak bulunur. Yeniden düzenliyerek

$$\begin{aligned} \{d\sigma\} = [D_p] (\{d\epsilon\} - \alpha dT - \{T - T_0\} d\alpha) \\ + \left(dD - \frac{[D] \{n\}^T [dD]}{S} \right) \epsilon_e \\ + \left(\frac{[D] \{n\} 2/3 Y f_m^{-1} (\partial Y / \partial T) dT}{S} \right) \end{aligned} \quad (38)$$

olur. Formülde

$$D_p = [D] - \frac{[D] \{n\} \{n\}^T [D]}{S} \quad (39)$$

dir. $(\partial Y / \partial T) dT$ 25 numaralı formülden türetilerek

$$\left(\frac{\partial Y}{\partial T} \right) dT = \left(\frac{\partial Y_0}{\partial T} \right) dT + \xi \left(\frac{\partial (H \bar{E}_p)}{\partial T} \right) dT \quad (40)$$

olarak yazılır. Bu artımsal değerler malzemelerin sıcaklığa göre varyasyonunu kullanarak hesaplanır.

$$\int_{vol} B^T \{d\sigma\} dvol = dR \quad (41)$$

$$\begin{aligned} \int_{vol} B^T [D_p] B dvol = dR + \\ \int_{vol} B^T \left[[D_p] (\{d\epsilon\} - \alpha dT - \{T - T_0\} d\alpha) \right. \\ \left. - \left(dD - \frac{[D] \{n\}^T [dD]}{S} \right) \epsilon_e \right. \\ \left. - \left(\frac{[D] \{n\} 2/3 Y f_m^{-1} (\partial Y / \partial T) dT}{S} \right) \right] dvol \end{aligned} \quad (42)$$

$$\sqrt{\frac{\sum_{r=1}^N (F_{applied}^i - F_{calculated}^i)_r^2}{\sum_{r=1}^N (F_{applied}^l - F_{calculated}^l)_r^2}} \leq \text{Tolerance} \quad (43)$$

or

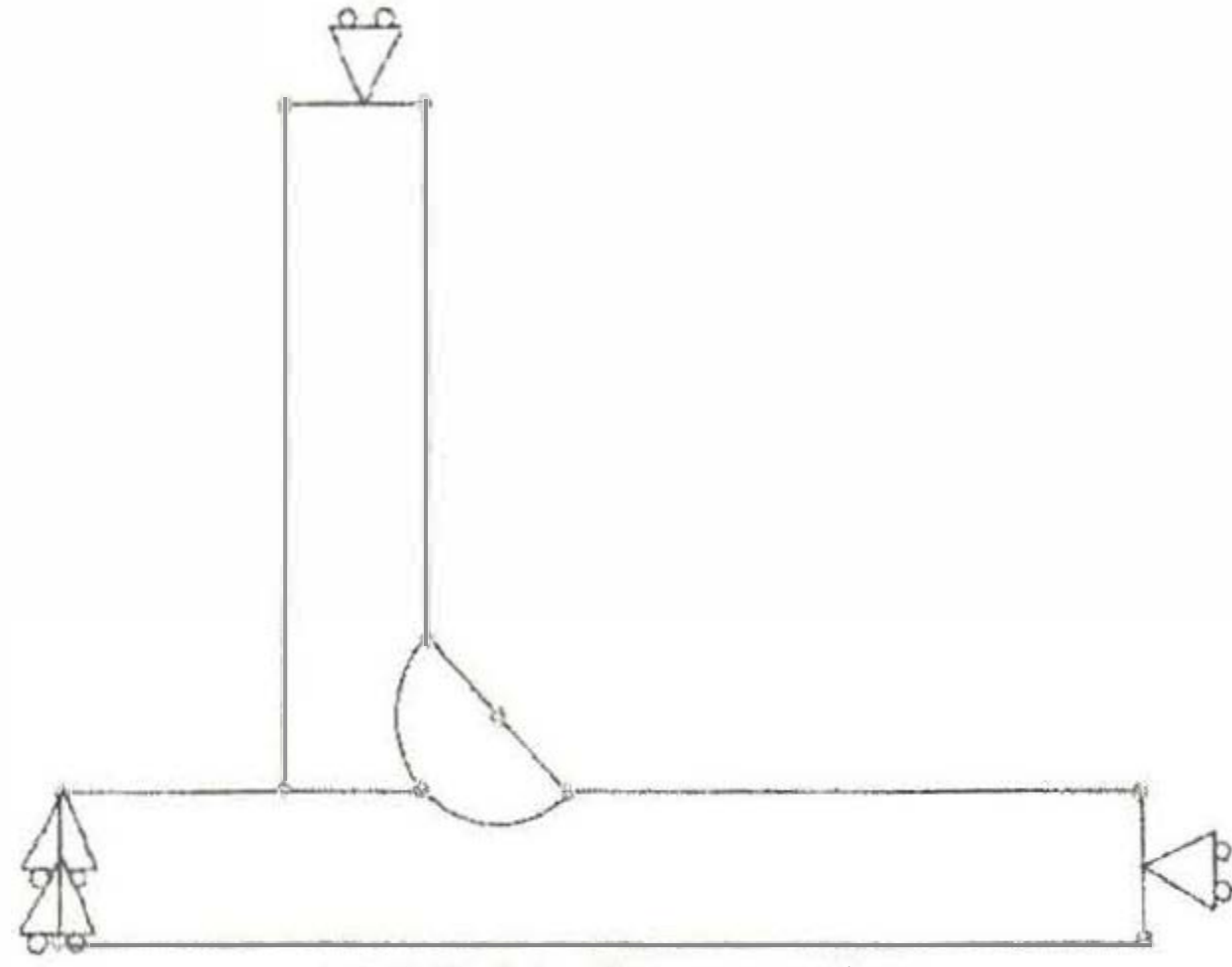
$$\sqrt{\frac{\sum_{r=1}^N (\Delta F^i \Delta u^i)_r}{\sum_{r=1}^N (\Delta F^l \Delta u^l)_r}} \leq \text{Tolerance}$$

IV. GERİLMELERİN İNTEGRASYONU

Plastik deformasyonlar altında gerilme integrasyonu, elastik olarak başlangıç bir gerilme değerinin alınması ile başlar. Bu işlemi akma noktasını aşan gerilmeler için uygun bir düzeltmenin yapılması izler. Öyle ki efektif plastik birim şekil değiştirme ve akma noktası gerilmesi değerlerinde arkası arkasına gelen bu ayarlamalar akma noktası kriterine göre tutarlı bir dengeye ulaşılan kadar devam edilir.

Artımsal gerilme değerinin hesaplanmasını takiben, o anki gerilme ve ona karşılık gelen von Mises gerilme değeri elde edilir.

Malzemenin akma sınırı gerilmesi Y karışık toklaşma kuralının göz önüne alınması ile hesaplanır. Gerilmeler ve plastik birim şekil değiştirmelerdeki düzeltmeler bütün artımlarda eşgüdümlü şekilde 38 ve 42 numaralı deklemleri kullanarak tamamlanır.



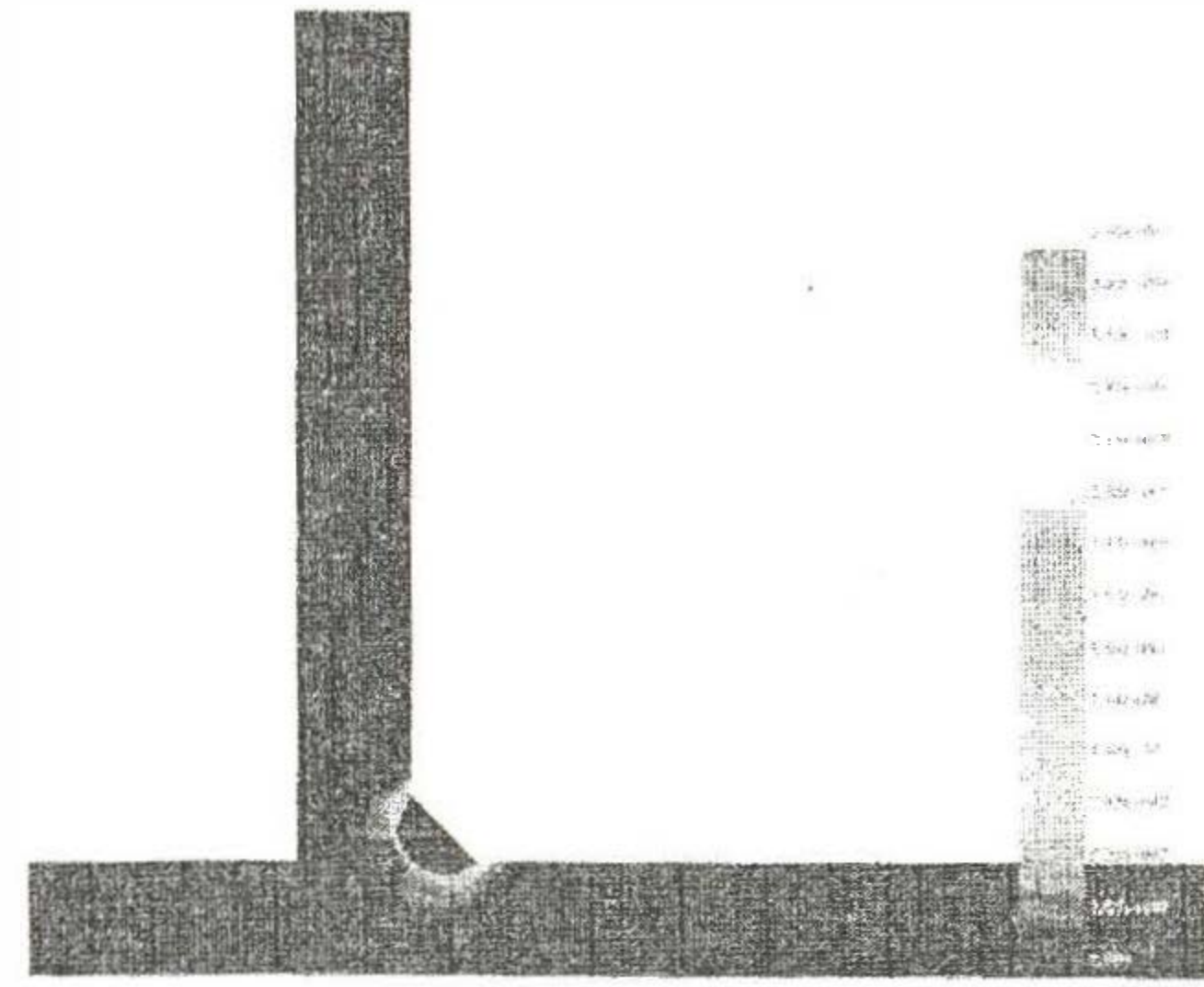
Şekil 11. Sınır şartları

Tablo 2. Malzemenin mekanik özellikleri

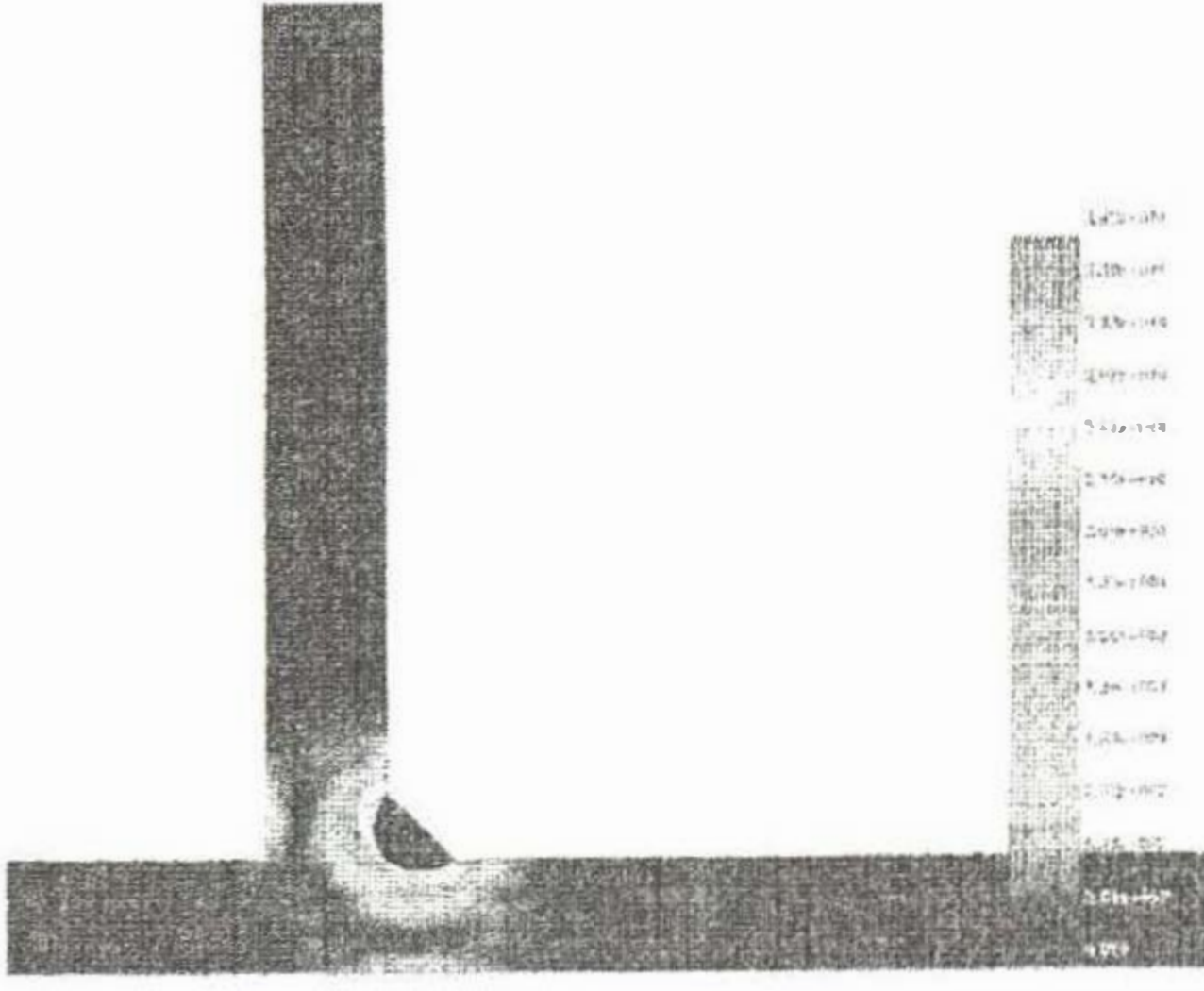
Elastik Modül	
Sıcaklık (C)	Modül (GPa)
24	195
93	189
204	180
316	171
427	161
538	152
982	90
1093	72
1200	45
1260	41
1300	20
1320	10
1350	0

Tablo 3. Malzemenin mekanik özellikleri

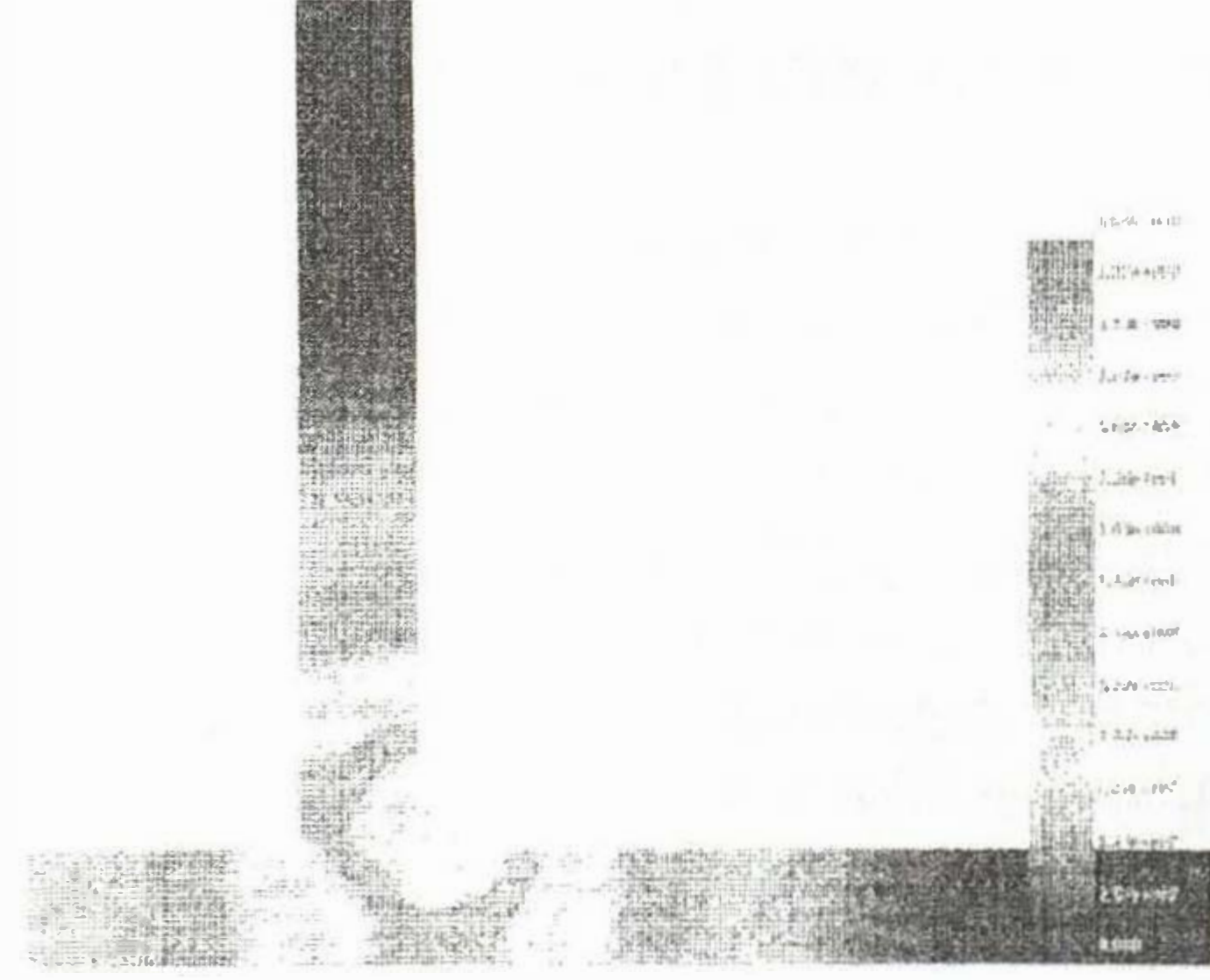
Sıcaklık °C	Akma Sınırı Dayanımı MPa	Kırılma Noktaları %	Kopma Noktası Gerilmesi MPa
21	365	0.2-50	770
93	325	0.2-45	725
149	290	0.2-45	670
204	270	0.2-45	640
260	255	0.2-45	620
316	235	0.2-45	605
371	230	0.2-45	595
427	230	0.2-45	585
482	220	0.2-44	580
538	215	0.2-42	560
982	70	0.2-42	324
1093	39	0.2-42	255
1200	31	0.2-42	206
1260	28	0.2-42	186
1300	20	0.2-42	151
1320	10	0.2-42	131
1350	0	0-0	0



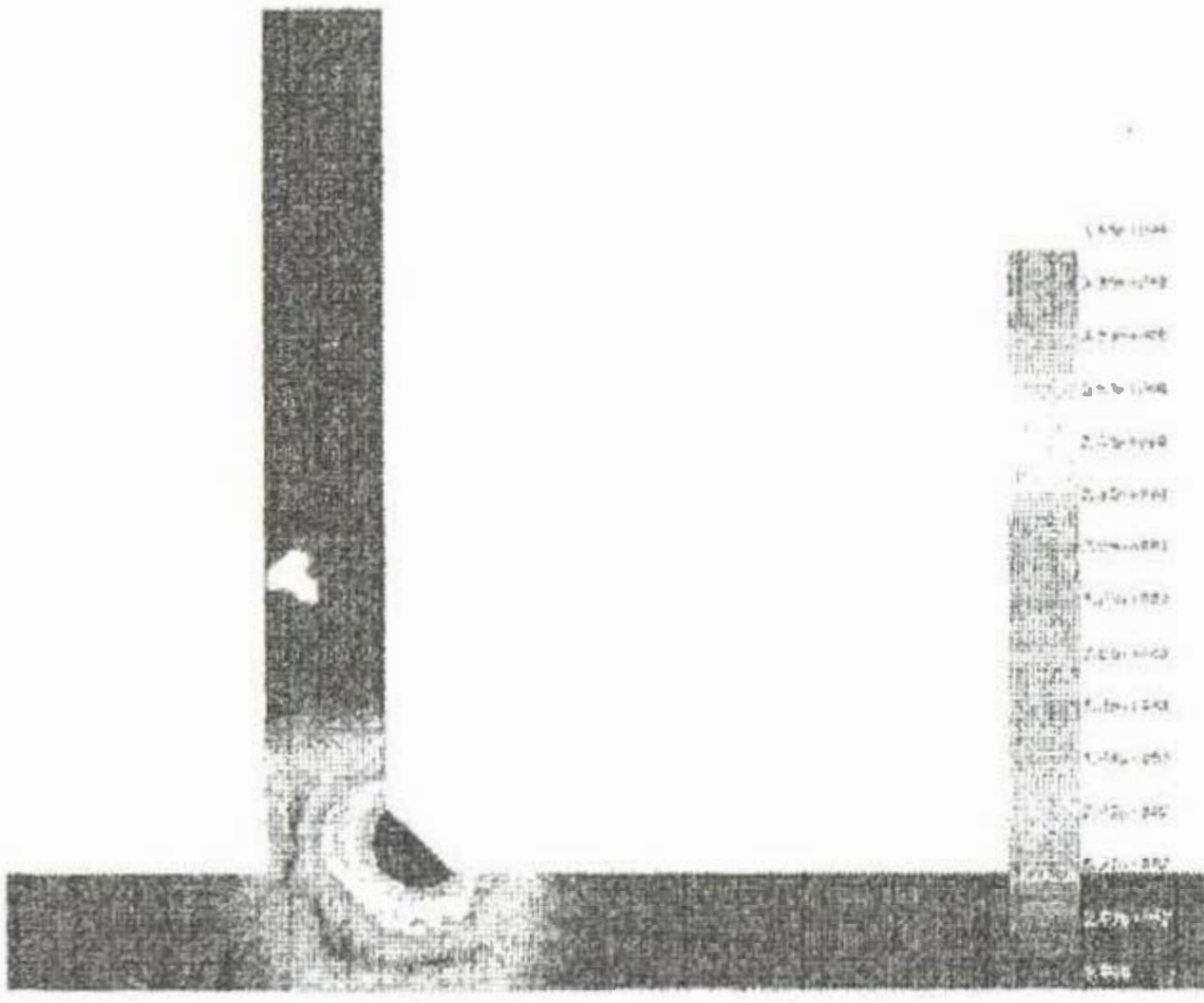
Şekil 12. Efektif gerilmeler



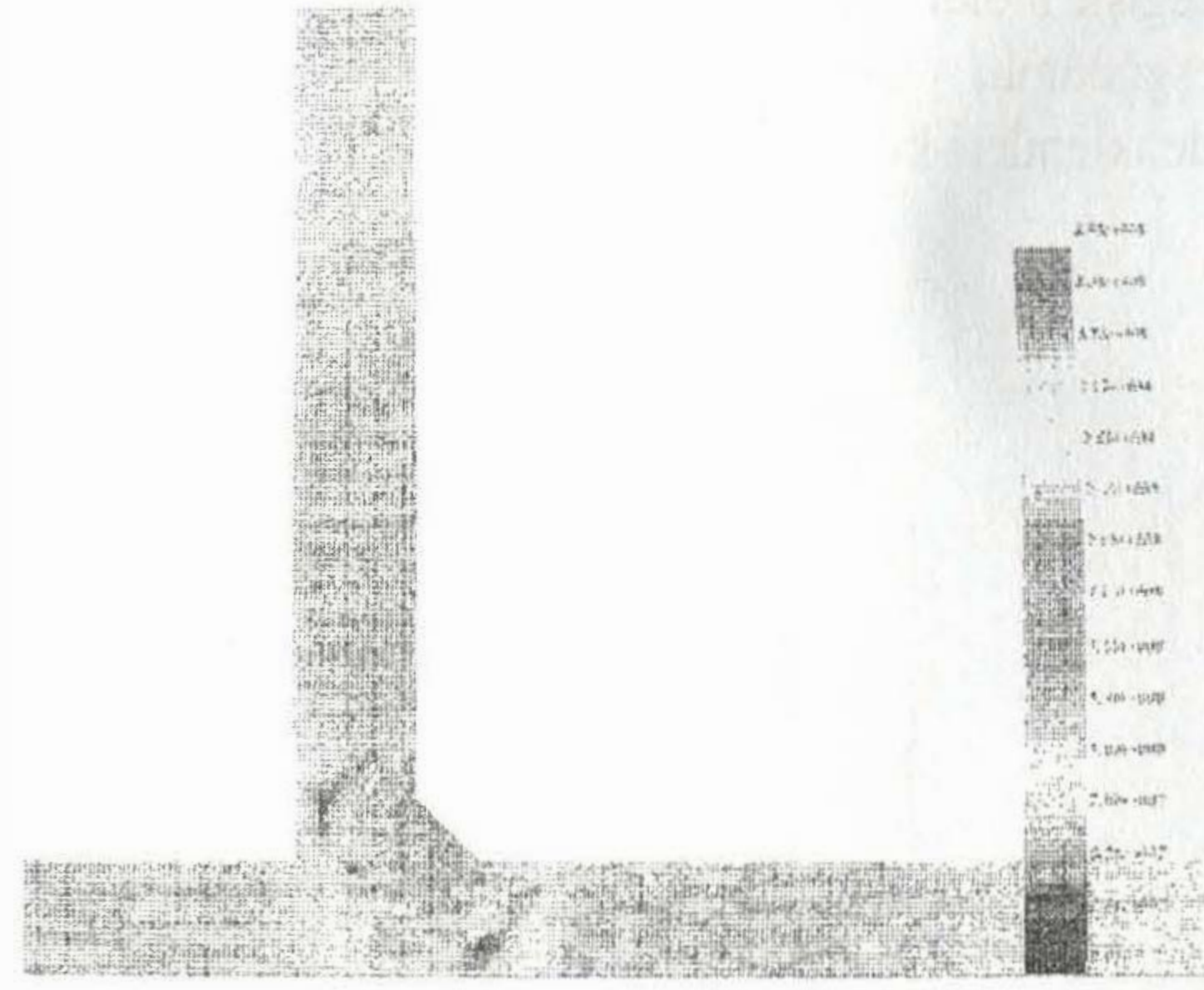
Şekil 13. Efektif gerilmeler



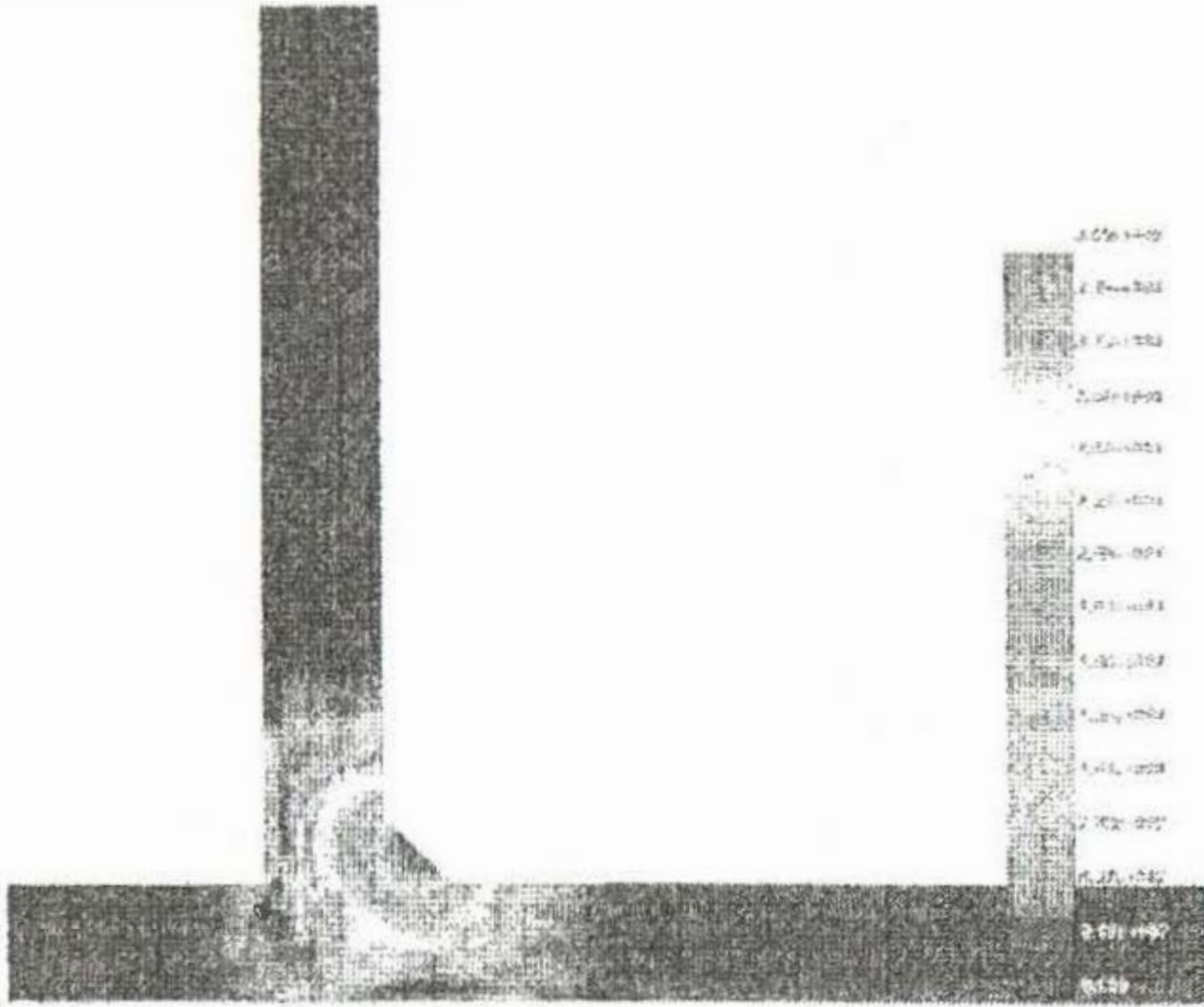
Şekil 16. Efektif gerilmeler



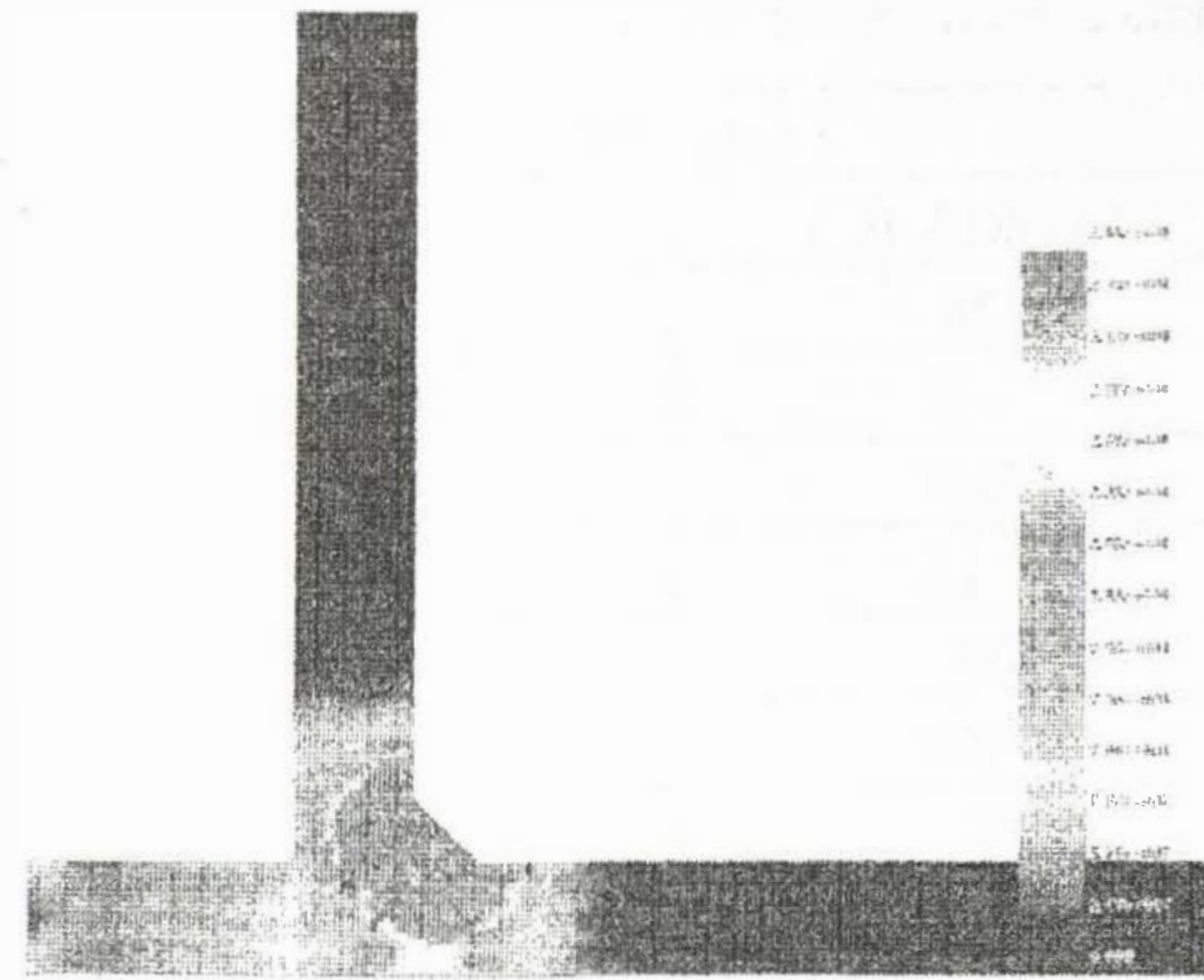
Şekil 14. Efektif gerilmeler



Şekil 17. Efektif gerilmeler



Şekil 15. Efektif gerilmeler

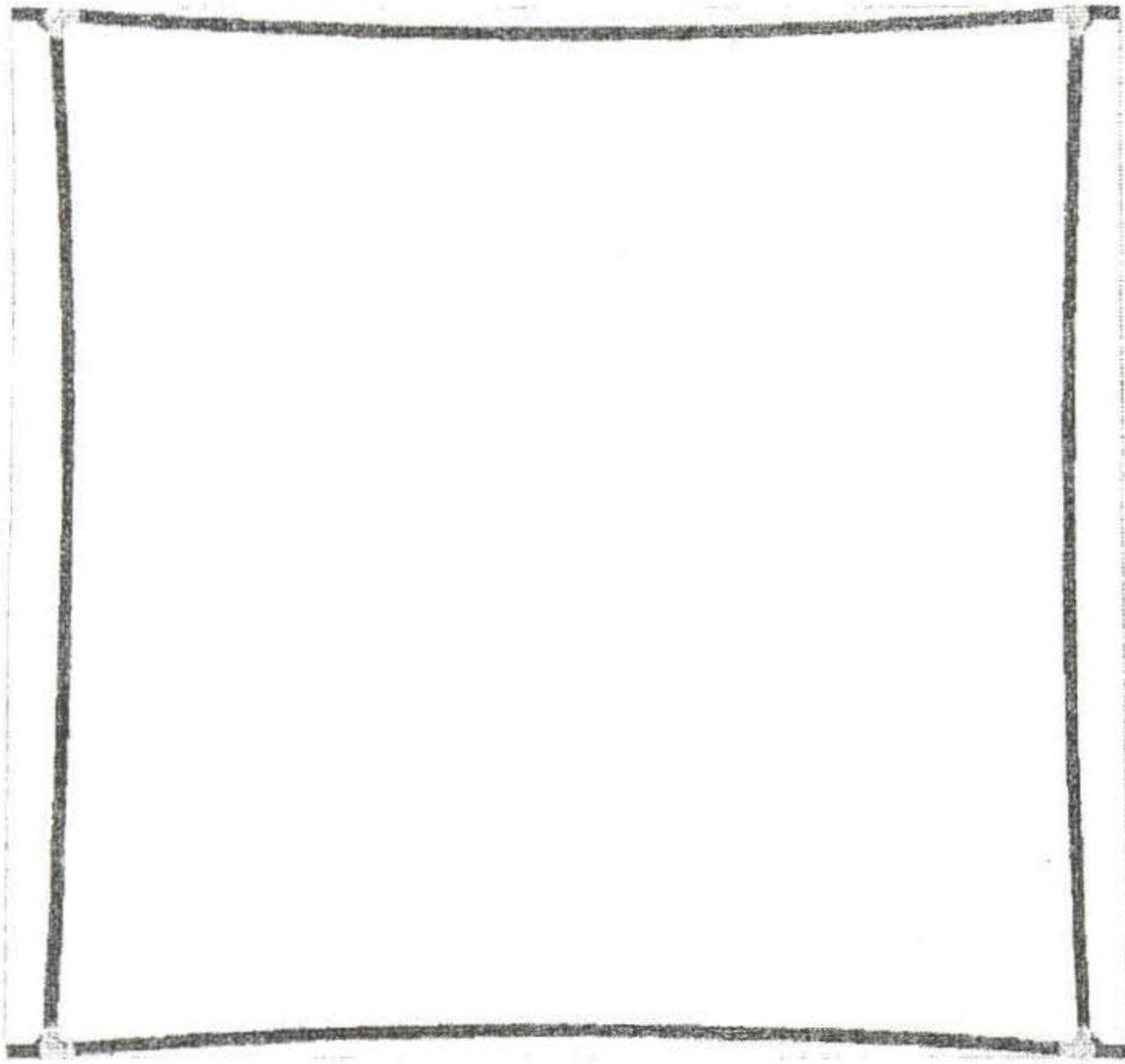


Şekil 18. Efektif gerilmeler (son)

Şekil 11 den 17'e kadar, efektif gerilmelerin oluşumu gösterilmektedir. Şekil 11'den 13'e kadar olan değişimden görülebileceği gibi kaynak bölgesinde elemanlar, kaynak elektrodunun ilgi böldesine varışına kadar pasif durumda dır. Dolgu malzemesinin bölgeye elektrodun varması ile ulaşması üzerine o bölgedeki elemanlar aktif hale getirilirler ve hesaplamalarda yer almaya başlarlar. Kırmızı bölge efektif gerilmenin akma sınırı değerine ulaştığı bölgeyi gösterir.

V. SONUÇ

İki boyutlu ortamda düzlemsel birim şekil değiştirme formülasyonuna göre transiyen termal elasto plastik kaynak simülasyonu yapıldı. Hesaplamalarda kalıcı artık gerilmeler ve deformasyon bulundu (Şekil 19). Bu hesaplamaların yapılması için yaklaşık 20000 satırlık Fortran dilinde yazılmış program geliştirildi.



Şekil 19. Deforme olmuş Gemi hull kesitinde effective gerilmeler

KAYNAKLAR

- [1]Walter E. Haisler and James A. Stricklin, "Development and Evaluation of Soution Procedures for Geometrically Nonlinear Structural Analysis" AIAA Journal, vol. 10 no.3, (1972), pp. 264-272.
- [2]Advances in Applied Mechanics, Academic Press, John W. Hutchinson and Theodore Y. Wu. vol. 29, (1992), pp. 151-163.
- [3]Mendelson, Plasticity " Theory and Application", Macmillan, New York (1968).
- [4]Engineering Fracture Mechanics: Numerical Methods and Applications, Pineridge Press, D.R. J. Owen, A.J. Fawkes, (1982).

[5]Modeling of engineering heat transfer Phenomena,B. Suadon, M. Faghri, southampton, UK, (1999).

[6]W.J. Minkowycz, E.M.Sparrow, G.E. Schneider, and R.H. Pletcher, editors. Handbook of Numerical T.J.R.Huges. Analysis of transient algorithms with particular reference to stability behaviour. *Computational methods for transient analysis*. Elsevier Science Publishers, 4:145-150, 1983.

[7]W.L. Wood and R.W.Lewis. A comparison of time marching schemes for the transient heat conduction equation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 9:679-689,1975.

[8]S. Kakac, Y. Tener. Heat conduction, Hemisphere Publishing Corporation, pp. 140-150,1985.

[9]J.Barlow and G.A.O.Davies. Selected FE benchmarks in structural and thermal analysis. Technical Report FEBSTA REV 1, NAFEMS, 1986.

[10]Frank P. Incropera, David P. De Witt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer pp.266-270, John Wiley and Sons (1990).

[11]Herman F. Nied, Thermal shock fracture in an edge-cracked plate, *Journal of Thermal Stresses*, 6:217-229,1983

[12]V. Pavelic, R. Tanbakuchi, O.A. Uyehara, and P.S. Myers: *Welding Journal Research Supplement*, 1969, vol. 48, pp.295-305.

[13]G. W. Krutz and L.J. Segerlind: *Welding Journal Research Supplement*, 1978, vol 57, pp. 211-216.

[14]John Goldak, Aditya Chakravarti, Malcolm Bibby, " A New Finite Element Model for Welding Heat Sources," *Metallurgical Transactions B*, Vol. 15B, June 1984, pp. 299-305.

[15]F.G. Rammerstorfer, D. F. Fischer, W. Mitter, K.J. Bathe and M. D. Snyder, "On thermo-elastic-plastic analysis of heat treatment process including creep and phase changes," *Computers & Structures* Vol. 60 No. 1. Pp. 131-154, 1996.

[16]D. P. Koistinen and R. E. Marburger, "A general equation prescribing extent of austenite-martensite transformation in pure iron-carbon alloys and carbon steels," *Acta Metall.* 7, pp. 59-68 (1959).

[17]Mark D. Snyder and K.J. Bathe, "A solution procedure for thermo-elasto-plastic and creep problems, *Nuclear Engr. Des.*, 64, 49-80, 1981