

## St 22 Çeliğinin Derin Çekilebilirliğine Etki Eden Parametrelerin ANOVA ile Analizi

Erdoğan KANCA\*<sup>1</sup>, Ali GÜNEN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 31200, Hatay

<sup>2</sup>İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 31200, Hatay

(Alınış / Received: 18.09.2017, Kabul / Accepted: 14.03.2018, Online Yayınlanma / Published Online: 20.04.2018)

### Anahtar Kelimeler

Düşük karbonlu çelik,  
Derin çekilebilirlik,  
Soğuk haddeleme,  
Galvanizleme,  
ANOVA

**Özet:** Bu çalışmada soğuk haddelenmiş ve ardından galvanizlenmiş St 22 çeliğinin kimyasal bileşimi, soğuk haddeleme öncesindeki sac kalınlığı ve mekanik özellikleri (akma ve çekme gerilmesi, % uzama) ile soğuk haddeleme ezme oranının derin çekilebilirliğe etkileri varyans analizi (ANOVA) kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada düşük karbonlu St 22 çeliği değişik ezme oranlarında soğuk haddelenmiş ardından galvanizleme işlemine tabi tutulmuştur. Malzemenin derin çekilebilirliğinin tespiti için Erichsen çökertme deney sonuçları kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda derin çekilebilirliğe etkisi en yüksek parametrenin ezme oranı olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen matematik model sonuçları ile deney verilerinin iyi bir şekilde örtüştüğü görülmüştür. Bu çalışma sonucu elde edilen ampirik formül kullanılarak derin çekme işlemlerinde kullanılan sacların daha ekonomik ve pratik bir şekilde şekillendirilebilecekleri öngörülmektedir.

## Analysis of the Parameters Affecting the Deep Drawability of St 22 Steel by ANOVA

### Keywords

Low carbon steel,  
Deep drawability,  
Cold rolling,  
Galvanizing,  
ANOVA.

**Abstract:** The effect of chemical composition, sheet thickness before cold rolling, mechanical properties (yield and tensile strength, % elongation) and cold rolling ratio on deep drawability of cold-rolled and galvanized St 22 steel was investigated by variance analysis (ANOVA). The low-carbon St 22 steel cold-rolled in various reduction ratio then subjected to galvanizing. Erichsen cupping test was applied in order to determine the deep drawability of Cold rolled and galvanized St 22 samples. As a result of performed studies, it was determined that cold rolling ratio has the highest effect on deep drawability. A good agreement has been obtained with the mathematical model and experimental results. It is predicted that the sheets used in deep drawing processes can be shaped more economically and practically by using the empirical formula obtained from this study.

### 1. Giriş

St 22 çeliğinin nispeten düşük maliyetine nazaran yüksek süneklilik, iyi kaynak edilebilirlik ve iyi şekillendirilebilirlik özelliklerine sahip olması bu çelik kalitesini soğuk haddeleme ve galvaniz ile kaplama uygulamalarında en yaygın kullanılan çeliklerden biri haline getirmiştir. Sac malzemelerin şekillendirilmesi esnasında ortaya çıkan problemleri çözmek için şekillendirilebilirlik verilerinin tespiti hem imalatçılar hem de kullanıcılar açısından çok önemlidir [1].

Sac malzemelerin şekillendirme işlemleri, bükme, gererek şekillendirme ve derin çekme işlemlerinin bir

arada meydana gelmesinden dolayı karmaşık bir işlemdir. Bu sebepten dolayı, akma gerilmesi, çekme dayanımı, şekil değiştirme sertleşmesi üssü, anizotropi gibi mekanik özellikleri tek başlarına şekillendirme özelliklerini belirlemede yetersiz kalmaktadır [2].

Şekillendirilecek malzemenin tane büyüklüğü ve bunun şekillendirilecek parça yüküne oranı şekillendirilebilirliği etkileyen faktörlerden biridir. Fu ve Chan yaptıkları çalışmada değişik kalınlıkta ve tane büyüklüğündeki saf bakır folyolara çekme deneyi uygulamışlar ve kopma yüzeylerindeki akma gerilimi, süneklilik ve mikro boşlukların numune boyutunun tane boyutuna oranının düşmesiyle

azaldığını gözlemlemişlerdir. Bu durum malzeme kusurlarının numune boyutlarının küçülmesiyle aynı oranda azalmamasından dolayı ortaya çıkmakta ve numune kalınlığının azalmasıyla da belirginleşmektedir [3].

Sıcak haddeleme koşullarının sac malzemenin mikro yapısına ve şekillendirilebilirliği üzerine etkisi üzerine yapılmış bir çalışmada sürekli tavlama işlemi için üretilmiş sacın en iyi şekillendirilebilirlik özelliğinin sıcak haddeleme sırasında yüksek bitiş (930 °C) ve sarım (730 °C) sıcaklıkları kullanılarak elde edildiği görülmüştür [4].

Malzemenin soğuk işlenmesi sırasında uygulanan ısı işlemlerin de malzemenin iç yapısına ve şekillenebilirliği üzerine etkisi oldukça belirgindir. Yapılan bir deneysel çalışmada 1045 çeliğinin soğuk yüzük haddeleme prosesi öncesinde tavlama sırasında uygulanan soğuma hızının arttırıldığında tane yapısının incelendiği ve perlit tabakaları arasındaki mesafelerin azaldığı tespit edilmiştir. Bu da malzemenin dayanımını ve plastik şekillendirilme kabiliyetini iyileştirmiştir [5].

Malzemenin mekanik özelliklerinin ve mikro yapısının derin çekilebilirliği ile ilgili olarak yapılan deneysel çalışmaların yanında prosesin sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesiyle de çalışmalar yapılmaktadır. Karbon oranları %0,01 ve %0,047 olan soğuk haddelenmiş iki sacın derin çekilebilirliğinin karşılaştırıldığı bir çalışmada düşük karbonlu malzemenin yırtılma olmadan şekillenebildiği; daha yüksek karbonlu malzemede ise sementit parçacıklarının bulunduğu ve bunların sertliğin artmasına, şekil verilebilme kabiliyetinin azalmasına yol açtığı görülmüştür [6].

Bir diğer çalışmada, alüminyumla söndürülmüş beş değişik ekstra derin çekilebilir düşük karbonlu çeliğin şekil verilebilirliği, şekillendirme sınır diyagramlarındaki kritik gerilmelerin seviyesi ve aralığı bakımından karşılaştırılmış sonuçların şekillenebilirlik parametreleriyle örtüştüğü tespit edilmiştir [7].

İşlenebilirlik parametrelerinin malzemenin imalat parametrelerine bağlı olarak tahmini, üreticinin müşterinin taleplerini uygun maliyetlerle karşılayabilmesi açısından önemlidir. Bunun dışında üretim sırasında kullanılan parametrelerin ürünün istenilen bir özelliğini iyileştirirken diğer bazı özelliklerini kötüleştirebilir. Bu durum da bazı optimizasyon tekniklerinin uygulanmasını gerekli kılmaktadır.

Proses parametrelerinin soğuk haddelenmiş düşük karbonlu çelik sacın mekanik ve işlenebilirlik özelliklerine etkisinin yapay sinir ağları (ANN) ile analizinin yapıldığı bir çalışmada oluşturulan modelin ürünün özelliklerinin kontrolü için kullanılabilirliği gösterilmiştir [8]. Yapılan başka bir çalışmada ise ANN üretilen X70 boru çeliği

malzemesinin maksimum kopma dayanımını belirlemede kullanılmıştır [9].

Varyans analizi (ANOVA) malzemelerin mekanik özelliklerinin ve şekil verilebilirliğinin üretim parametrelerine bağlı olarak tahmini ve değerlerin optimizasyonunda da kullanılmaktadır. Khaki ve diğerleri yaptıkları çalışmada Nb mikroalaşımli çelik sacların mekanik ve şekillendirilebilirlik özelliklerini etkileyen sıcak haddeleme parametrelerini analiz etmek için 2<sup>3</sup> faktöriyel tasarımı (2 seviyedeki 3 değişken) kullanmış ve yeterli doğrulukta regresyon modelleri elde etmişlerdir [10]. Diğer bir çalışmada ise yine sıcak haddeleme parametrelerinin Nb mikroalaşımli çelik sacların mekanik özelliklerine etkisini belirlemede ve ampirik formüllerini oluşturmada yanıt yüzeyi metodunu kullanmışlardır [11].

Hâlihazırdaki çalışmada soğuk haddelenmiş ve sıcak daldırma yöntemiyle galvanizlenmiş düşük karbonlu St. 22 çeliğin derin çekilebilirlik kabiliyetini belirlemede etkili olan bazı özellikler (malzemenin kimyasal içeriği, başlangıçtaki mekanik özellikleri ve soğuk haddelemede ezme oranları) varyans analizi (ANOVA) kullanılarak incelenmiştir.

## 2. Malzeme ve Metot

### 2.1. Malzeme ve test cihazları

Bu çalışmada kullanılan St. 22 çelik numuneler bölgemizde faaliyet gösteren MMK Metalurji sac üretim tesislerinden temin edilmiştir. Temin edilen sacların üretiminde kullanılan rulolar aynı firmanın Rusya'daki tesislerinde üretilmiş, soğuk haddeleme ve galvanizleme işlemleri ise MMK Metalurji Dörtüyl tesislerinde yapılmıştır.

Malzemenin iç yapısı ile ilgili bilgi edinmek amacıyla çalışmada kullanılan herhangi bir haddeleme işlemine tabi tutulmayan sıcak haddelenmiş, %51 ezme oranı ve %79 ezme oranları ile soğuk haddelenmiş numunelerin mikroyapıları Nikon MA 200 optik mikroskop ile incelenmiştir. Mikroyapı incelemeleri için bakalite alınan numunelerin yüzeyleri 240-420-600-800-1000 numaralı SiC zımparaları ile zımparalama işlemine tabi tutuldu. Ardından 3 mikronluk parlatma kristali ile kaba parlatma, daha sonra 1 mikronluk parlatma kristali ile de ince parlatma işlemleri yapılmış ve %3 lük Nital solüsyonunda 5 sn süre ile dağlanmıştır. Erichsen çökertme deneyleri TS EN ISO 20482 standardına göre Zwick Roell BUP200, çekme deneyleri EN 10002 standardına göre Zwick Roell Z250 test cihazı kullanılarak yapılmıştır [12].

### 2.2. Deney prosedürü

St 22 kalitedeki, 1,5; 1,8 ve 2,0 mm kalınlıklarında saclar endüstriyel üretim tesisinde değişik ezme oranlarında soğuk haddelemeye tabi tutulmuştur. Daha sonra 750 °C sıcaklıkta tavlama malzemeler 460 °C galvaniz banyosuna daldırılarak kaplanmıştır.

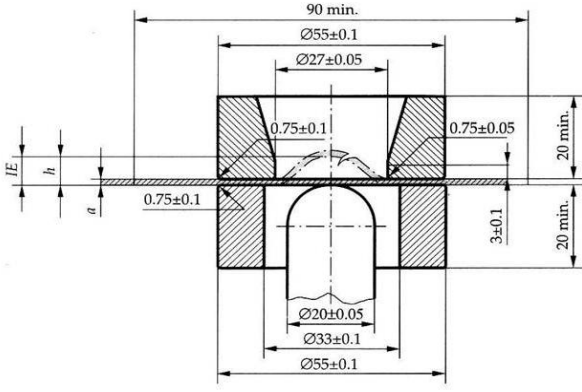
Soğuk haddeleme öncesi malzemelerin akma gerilmesi, çekme dayanımı ve yüzde uzaması tespit edilmiştir. Soğuk haddeleme ve galvanizleme sonrasında malzemelerden alınan numuneler Erichsen çökertme testine tabi tutulmuştur. Deney sonuçları Tablo 1.'de verilmiştir. Deneyin yapılışı şu şekildedir (Şekil 1) [13]:

- Numune kalıpla tutucu çember arasında 500 ile 1000 kilogramlık bir kuvvetle sıkıştırılır.

- Küresel uçlu zımba numuneye dokundurularak derinlik ölçümü için başlangıç noktası belirlenir.
- Zımba 5-20 mm/dk sabit hızla ilerletilir. Deneyin sonuna doğru yırtılmanın başladığı anın doğru bir şekilde belirlenmesi için ilerleme hızı 5 mm/dk'ya düşürülür.
- Yırtılmanın meydana geldiği andaki zımba derinliği 0,01 mm hassasiyetle ölçülür. Bu değer Erichsen indeksi olarak tespit edilir.

**Tablo 1.** St 22 çeliği soğuk haddeleme öncesi mekanik değer, kimyasal bileşim ve derin çekme deneyi sonuçları

Sıra No	Soğuk Haddeleme Öncesi				%oC	%o Si	%oMn	%o P	%oS	%oDiğ.	Ezme Oranı (%)	Çökme Derinliği (mm)
	Kalınlık (mm)	Akma Ger. (MPa)	Kopma Ger. (MPa)	Uzama (%)								
1	1.8	220	300	38	0.43	0.16	1.94	0.08	0.15	0.59	64	8.38
2	1.8	223	302	38	0.43	0.16	1.94	0.08	0.15	0.59	64	8.38
3	1.8	210	309	38	0.37	0.13	1.79	0.08	0.12	0.59	51	8.94
4	2.0	225	310	34	0.32	0.10	1.84	0.07	0.09	0.54	77	7.59
5	1.5	205	310	34	0.38	0.18	1.96	0.09	0.09	0.51	63	8.00
6	1.5	210	285	34	0.29	0.18	1.86	0.12	0.05	0.46	62	8.80
7	1.5	245	330	33	0.35	0.09	1.87	0.05	0.10	0.53	79	5.35
8	1.5	226	340	33	0.36	0.12	1.87	0.06	0.08	0.39	63	8.01
9	1.8	205	300	33	0.47	0.13	2.27	0.09	0.04	0.44	58	8.54
10	1.5	210	310	32	0.37	0.08	2.02	0.09	0.09	0.40	63	8.06
11	1.5	245	306	32	0.38	0.11	1.87	0.12	0.09	0.55	47	8.62
12	1.8	290	420	32	0.43	0.12	2.16	0.10	0.10	0.60	64	8.41
13	1.8	290	420	32	0.43	0.12	2.16	0.10	0.10	0.60	64	8.41
14	1.5	220	310	31	0.36	0.26	2.13	0.09	0.03	0.55	62	8.09
15	1.5	220	332	31	0.42	0.08	2.06	0.07	0.07	0.39	63	7.81
16	1.5	240	325	30	0.50	0.20	1.93	0.10	0.05	0.53	79	8.36
17	2.0	235	325	29	0.36	0.27	2.28	0.06	0.08	0.27	77	7.46
18	1.8	255	340	29	0.48	0.17	2.19	0.05	0.11	0.43	59	8.45
19	1.8	250	320	29	0.34	0.08	1.85	0.06	0.09	0.50	59	8.69
20	2.0	245	330	27	0.53	0.20	1.90	0.07	0.07	0.51	77	7.83
21	1.5	205	250	26	0.40	0.17	1.82	0.15	0.06	0.45	63	8.21
22	2.0	273	345	24	0.53	0.21	2.22	0.08	0.06	0.45	77	7.69
23	1.8	261	350	24	0.42	0.18	1.82	0.06	0.03	0.50	79	4.40
24	1.8	270	350	24	0.35	0.12	2.01	0.11	0.1	0.47	79	7.50
25	1.8	285	355	37	0.70	0.10	3.80	0.11	0.25	0.32	45	7.76
26	1.8	285	355	36	0.34	0.08	1.85	0.06	0.09	0.50	59	8.69
27	1.8	300	370	35	0.70	0.20	3.90	0.11	0.13	0.53	51	8.42
28	1.5	300	370	36	0.60	0.10	3.90	0.23	0.14	0.04	63	7.70
29	1.8	290	365	35	0.70	0.20	3.80	0.15	0.21	0.50	51	6.83
30	1.5	295	370	36	0.70	0.20	4.20	0.11	0.22	0.49	63	7.69
31	1.8	300	370	35	0.70	0.20	3.90	0.11	0.13	0.53	51	8.52
32	1.8	290	365	36	0.60	0.10	3.80	0.10	0.17	0.54	64	8.14
33	1.8	280	355	36	0.50	0.10	3.70	0.11	0.19	0.49	51	6.81
34	2.0	295	370	36	0.60	0.10	4.20	0.16	0.15	0.02	77	7.52
35	1.5	305	370	35	0.80	0.10	3.90	0.15	0.09	0.02	79	8.02
36	1.5	305	370	35	0.80	0.10	3.90	0.15	0.09	0.02	79	7.73
37	1.8	285	360	36	0.70	0.20	3.90	0.11	0.13	0.53	79	7.40
38	1.8	300	370	35	0.60	0.20	3.80	0.09	0.17	0.37	79	7.69
39	2.0	295	370	36	0.60	0.10	4.20	0.16	0.15	0.02	77	7.63
40	2.0	290	365	36	0.70	0.10	3.80	0.15	0.09	0.02	77	7.65
41	1.5	300	360	35	0.70	0.10	4.20	0.10	0.18	0.36	63	7.70
42	1.8	290	365	36	0.60	0.10	3.80	0.17	0.24	0.55	45	6.01
43	2.0	285	360	36	0.60	0.20	3.80	0.11	0.18	0.44	77	7.66
44	1.5	295	345	36	0.70	0.10	4.20	0.10	0.18	0.36	63	8.57
45	1.5	290	365	36	0.60	0.10	4.10	0.17	0.14	0.46	63	7.66
46	1.5	305	370	35	0.60	0.10	3.90	0.23	0.14	0.04	49	8.29
47	1.5	310	370	35	0.70	0.10	3.90	0.07	0.24	0.43	47	8.22
48	1.5	295	360	36	0.90	0.20	4.20	0.16	0.19	0.59	47	8.18
Min	1.5	205	250	24	0.29	0.08	1.79	0.05	0.03	0.02	45	4.40
Maks.	2.0	310	420	38	0.90	0.27	4.20	0.23	0.25	0.06	79	8.94



Şekil 1. Erichsen çökertme deneyi düzeneği.

### 2.3. Varyans analizi (ANOVA)

Varyans analizi, bir deneyde girdilerin (bağımsız değişken) çıktılar (bağımlı değişken) üzerinde etki derecelerini araştırmak için geliştirilmiş istatistiksel işlemler topluluğudur. Varyans analizi (ANOVA) sırasında faktörlerin kareleri toplamı ve artık yansız hataların karelerinin toplamından oluşan kareler toplamı hesaplanır. Daha sonra her bir faktörün etkileri, sıfır hipotezinin veya her olasılık seviyesinin anlamlılık testi olan, varyansların eşitliği hipotezinin test edilmesiyle değerlendirilir. Bunun için ortalamaların karelerinin artık hatanın ortalama karelerine oranı, diğer ifadeyle F-istatistik, hesaplanır ve Fisher dağılımı ile ilgili tablolardaki F değerleri ile karşılaştırılır. Fisher dağılımı ile ilgili F değerleri her birinden ayrı faktörlerin serbestlik derecelerinin sayısı, artık hataların serbestlik derecelerinin sayısı ve olasılık seviyesine bağlıdır. Her bir faktörün modeldeki istatistik öneminin seviyesini belirlemek için katkı derecesi ( $\% \rho$ ) elde edilir. Katkı derecesi ( $\% \rho$ ), F dağılımına göre belirlenir. Her faktörün F değeri hesaplandıktan sonra her faktörün değerinin hesaplanmış toplam F dağılımına oranı bize her faktörün katkı derecesini verir [14].

Tablo 2'teki etki derecesi sütunu bağımsız parametrelerin ölçülen bağlı parametrelere katkı derecesi ile ilgili fikir verir. Eğer  $\% \rho$  değeri büyükse faktörün ilgili tepkiye katkısı yüksek demektir.

ANOVA analizi ile bağımsız parametrelerin, (malzemenin kimyasal içeriği, malzemenin soğuk haddelenme öncesi kalınlık, akma, çekme gerilmeleri, yüzde uzaması ve soğuk haddelenme ezme oranı) bağımlı parametre (çökme derinliği) üzerinde belirgin bir etkisinin olup olmadığını belirlenmiştir. İstatistik olarak belirgin ( $p < 0.010$ ) bağımsız parametrelerin ve bunların bağlı parametrelere katkısının belirlenmesi için bir istatistiksel analiz gerçekleştirilir. Bu çalışmada ANOVA analizleri ticari bir istatistik yazılımı (Design Expert 7.0.3) kullanılmıştır.

### 3. Bulgular

Her bir numune için soğuk haddelenme başlangıç kalınlığı, malzeme içeriğindeki C, Si, Mn, P, S ve diğer

elementlerin ağırlık oranları, malzemenin soğuk haddelenme işlemi öncesindeki akma, kopma gerilimi ve yüzde uzama değerleri ile soğuk haddelenme sırasında uygulanan ezme oranı bağımsız değişkenler olarak istatistik yazılımına girilmiştir. Çökme miktarı ise bağlı parametre olarak belirtilmiştir.

Elde edilen veri kümeleri için hangi tür (lineer, ikinci, üçüncü dereceden gibi) bağıntı modelinin uygun olduğuna karar vermeden önce F ve P değerlerine göre istatistiksel olarak anlamlı ve önerilen modeller istatistik yazılım paketi kullanılarak oluşturulur. Yapılan varyans analizi sonucunda en doğru sonucu veren modelin iki faktörlü etkileşim (2-factor interaction) olduğu görülmüştür. Sonuca anlamlı etkisi olan bağımsız parametreler ( $P < 0.01$ ) ve etkileşimleri Tablo 2.'te sunulmuştur.

### 3.1. Mikroyapı

Şekil 2'de herhangi bir haddelenme işlemine tabi tutulmayan sıcak haddelenmiş, %51 ezme oranı ve %79 ezme oranları ile soğuk haddelenmiş numunelerin mikroyapıları görünüşleri verilmiştir.

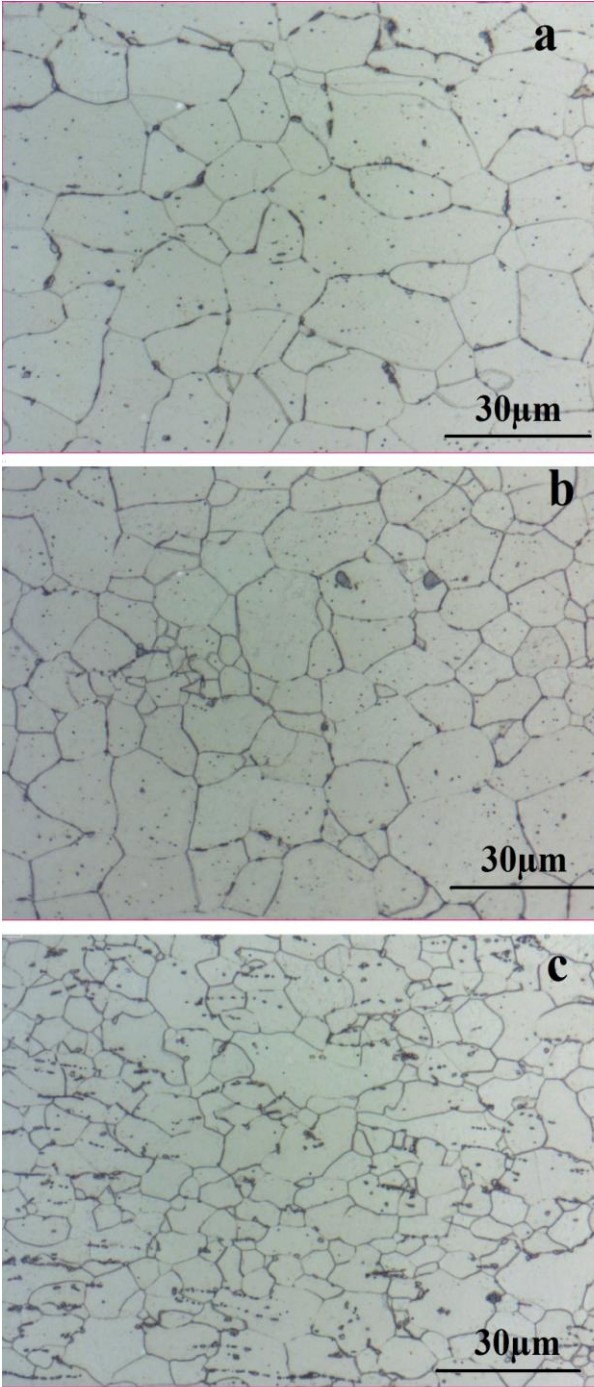
Herhangi bir işleme tabi tutulmayan sıcak haddelenmiş St 22 çeliğinin mikroyapı resminde görüldüğü üzere tane sınırları açık bir şekilde görülmüş olup tane büyüklüklerinin homojen olmayan bir ferritik yapıdan oluştuğu görülmektedir (Şekil 2a). St 22 çeliği %51 oranında soğuk haddelenme işlemine tabi tutulması ile tane boyutlarında işlemsiz numuneye göre bir küçülme ve tane sınırlarında karbür çökeltilerinin arttığı görülmektedir (Şekil 2b). Soğuk haddelenme oranının %79 uygulanmasıyla tane boyutlarındaki küçülme ve tane sınırlarındaki karbür çökeltilerinde artmaların devam ettiği görülmüştür (Şekil 2c). Mikroyapı görünüşlerindeki tane farklılığının tezinin desteklenmesi amacıyla numunelerin ortalama tane boyutu ASTM E112-13 standardına göre ölçülmüş ve sıcak haddelenmiş, %51 soğuk haddelenmiş ve %79 soğuk haddelenmiş numunelerin ortalama tane boyutları sırasıyla 57.10, 27.61 ve 18.50  $\mu\text{m}^2$  olarak ölçülmüştür.

### 3.2. ANOVA sonuçları

Erichsen deneyi ile tespit edilen çökme miktarı sacların derin çekilebilirliğinin tespiti açısından oldukça belirleyicidir. ANOVA sonucunda bağımsız parametrelerin ve bunların ikili etkileşimlerinin çökme miktarına etki katsayıları Tablo 2'de sunulmuştur.

Varyans analizi sonucunda derin çekilebilirliğe etkisi en yüksek parametrenin %29,55 ile ezme oranı olduğu tespit edilmiştir. Bu parametreyi sırasıyla mangan oranı %7,88, % uzamanın ezme oranına çarpımı %7,6, son kalınlığın fosfor oranına çarpımı 7,22, ilk kalınlığın fosfor oranına çarpımı %5,72, Kopma gerilmesi %5,31 şeklindedir. Diğer

parametrelerin etkisi %5 altında olduğundan ihmal edilebilir.

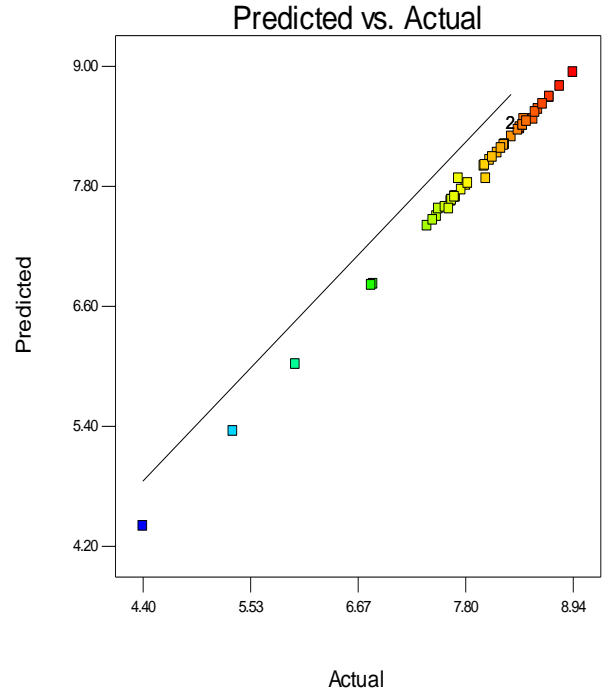


**Şekil 2.** St 22 çeliğinin a) sıcak haddelenmiş b) %51 soğuk haddelenmiş ve c) %79 oranında soğuk haddeme işlemleri uygulanmış numunelerin optik mikroyapı görünümleri

Soğuk haddemede ezme oranının yüksek olması daha fazla pekleşmeye neden olur. Bu durum derin çekme sırasında meydana gelecek plastik deformasyonu sınırlandırılmış olduğundan ezme oranının %29'luk etkisi negatif yönde gerçekleşmiştir. Haddeme esnasında tane sınırlarında Mn ve S birikerek kırılabilirliği yüksek bölgeler oluşturduğu ve derin çekilebilirliğe olumsuz etkide bulunduğu düşünülmektedir. Yüzde uzama

malzemenin sünekliliğini gösterdiğinden her ne kadar ezme oranı derin çekilebilirliği olumsuz etkilese de bunların çarpımları olumlu bir etkiye sahiptir. Kopma gerilmesinin yüksek olması malzemenin sünekliliğini gösterdiğinden çekilebilirlik üzerine olumlu bir etkiye sahiptir.

Çökme miktarının matematik model ile hesaplanan değeri ile deneysel değerleri grafiksel olarak Şekil 3'de karşılaştırılmıştır. Model sonuçları ve deneysel verilerin iyi bir şekilde örtüştüğü görülmektedir.



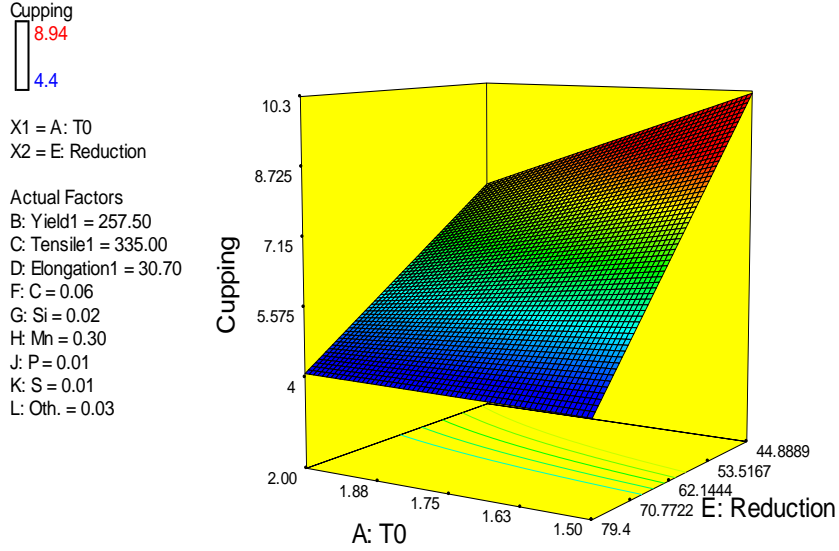
**Şekil 3.** Model sonuçları ile deneysel sonuçların karşılaştırılması

Soğuk haddeme başlangıç kalınlığı ve ezme oranının derin çekilebilirliğe etkisi Şekil 4'te görülmektedir. Burada derin çekilebilirliği ezme oranındaki artışın olumsuz yönde, ilk kalınlıktaki artışın ise olumlu yönde etkilediği görülmektedir. Grafiğin genelinde ezme oranının eğiminin daha büyük oluşu bu parametrenin daha etkin olduğunu gösterir. Bu sebepten ilk kalınlık ve ezme oranının etkileşimi de derin çekilebilirliği negatif yönde etkilemektedir.

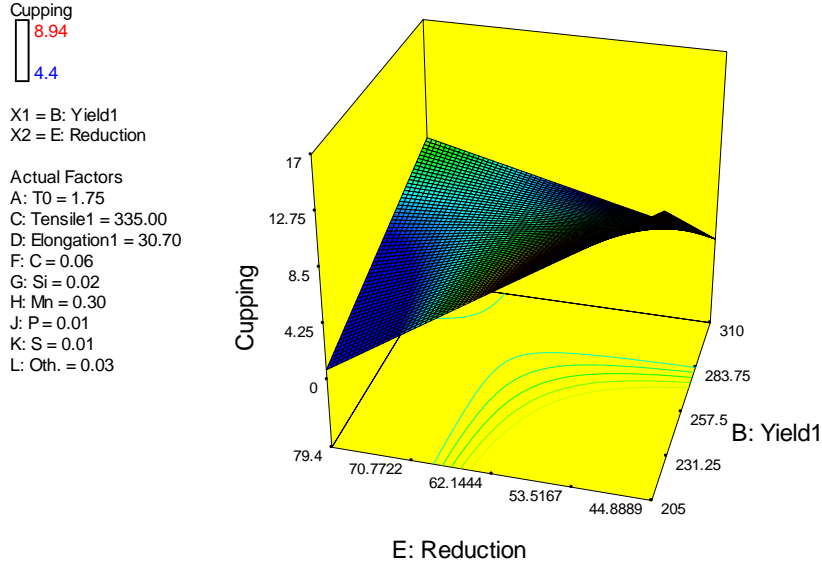
Soğuk haddeme öncesi akma gerilimi ve ezme oranının etkisi Şekil 5'te bir arada incelendiğinde akma gerilmesinin düşük olduğu bölgede ezme oranı derin çekilebilmeyi olumsuz yönde, akma gerilmesinin yüksek olduğu bölgede ise olumlu yönde etkilediği görülmektedir. Aynı grafikte ezme oranının düşük olduğu bölgede akma gerilmesinin derin çekilebilmeyi olumsuz yönde, ezme oranının yüksek olduğu bölgede ise olumlu yönde etkilediği görülmektedir. Bu durum matematik modelde bu iki parametrenin çarpımının da derin çekilebilmeyi negatif yönde etkilemesinden dolayı meydana gelmektedir.

Tablo 2. ANOVA Sonuçları

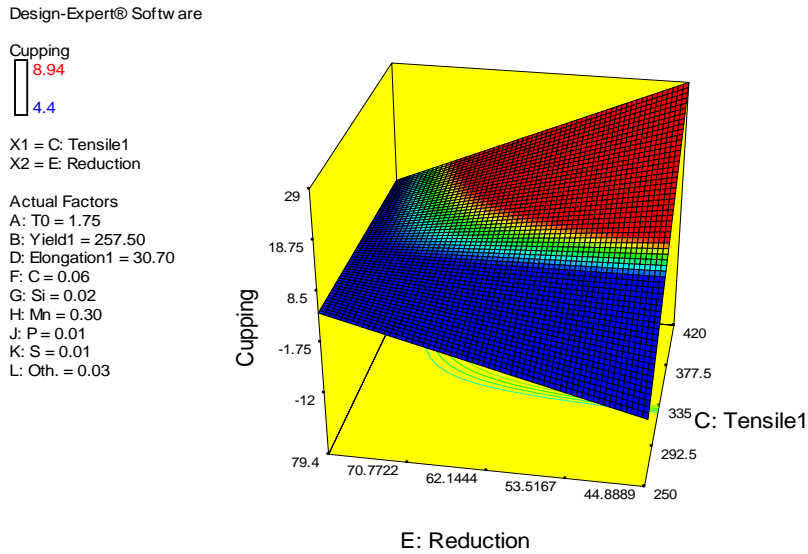
Bağımsız değişkenler	Matematik Model Katsayısı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	p Değeri	Etki Oranı (%p)	İstatistik olarak anlamlı mı?
<i>Sabit</i>	-62.53888							
<i>İlk Kalınlık (T0)</i>	7.80497	0.096	1	0.096	14.35	0.0053	0.613	E
<i>Akma Gerilmesi (Y)</i>	-0.13669	0.075	1	0.075	11.21	0.0101	0.479	E
<i>Kopma gerilmesi (T1)</i>	0.63973	0.83	1	0.83	124.34	< 0.0001	5.312	E
<i>Yüzde Uzama (E)</i>	1.59577	4.62E-04	1	4.62E-04	0.069	0.7993	0.003	H
<i>Ezme Oranı (R)</i>	-0.22215	4.63	1	4.63	691.72	< 0.0001	29.553	E
<i>C</i>	162.02114	0.049	1	0.049	7.35	0.0266	0.314	E
<i>Si</i>	1601.5234	0.49	1	0.49	73.6	< 0.0001	3.144	E
<i>Mn</i>	-441.71804	1.24	1	1.24	184.51	< 0.0001	7.883	E
<i>P</i>	2112.2636	0.19	1	0.19	28.19	0.0007	1.204	E
<i>S</i>	-1526.3672	0.23	1	0.23	35.09	0.0004	1.499	E
<i>Diğer Elementler (Dg.)</i>	-232.62057	0.16	1	0.16	24.22	0.0012	1.035	E
<i>T0 * E</i>	-0.39572	0.025	1	0.025	3.76	0.0885	0.161	E
<i>T0 * R</i>	0.15142	0.17	1	0.17	25.52	0.001	1.090	E
<i>T0 * C</i>	-147.51898	0.21	1	0.21	31.47	0.0005	1.345	E
<i>T0 * Si</i>	166.44487	0.073	1	0.073	10.86	0.0109	0.464	E
<i>T0 * Mn</i>	44.21786	0.36	1	0.36	54.22	< 0.0001	2.316	E
<i>T0 * P</i>	-964.96165	0.9	1	0.9	133.91	< 0.0001	5.721	E
<i>T0 * Dg.</i>	-45.84443	0.038	1	0.038	5.75	0.0434	0.246	E
<i>Y * T1</i>	-5.19E-04	0.14	1	0.14	21.66	0.0016	0.925	E
<i>Y * E</i>	-1.85E-03	0.013	1	0.013	1.93	0.2022	0.082	H
<i>Y * R</i>	5.79E-03	0.27	1	0.27	39.85	0.0002	1.703	E
<i>Y * C</i>	-4.1513	0.13	1	0.13	19.16	0.0024	0.819	E
<i>Y * Si</i>	4.07342	0.098	1	0.098	14.66	0.005	0.626	E
<i>Y * Mn</i>	1.20942	0.6	1	0.6	88.94	< 0.0001	3.800	E
<i>Y * P</i>	-12.79362	0.37	1	0.37	54.65	< 0.0001	2.335	E
<i>Y * S</i>	-4.94225	0.037	1	0.037	5.49	0.0472	0.235	E
<i>Y * Dg.</i>	1.00954	0.036	1	0.036	5.39	0.0488	0.230	E
<i>T1 * E</i>	-6.92E-03	0.15	1	0.15	22.82	0.0014	0.975	E
<i>T1 * R</i>	-7.08E-03	0.19	1	0.19	27.95	0.0007	1.194	E
<i>T1 * C</i>	2.83051	0.039	1	0.039	5.81	0.0425	0.248	E
<i>T1 * Si</i>	-6.6269	0.26	1	0.26	38.43	0.0003	1.642	E
<i>T1 * Mn</i>	-0.59043	0.15	1	0.15	21.99	0.0016	0.939	E
<i>T1 * P</i>	19.46003	1.13	1	1.13	169.03	< 0.0001	7.222	E
<i>T1 * S</i>	7.94539	0.054	1	0.054	8.1	0.0216	0.346	E
<i>E * R</i>	0.022575	1.19	1	1.19	177.96	< 0.0001	7.603	E
<i>E * C</i>	8.6471	9.34E-03	1	9.34E-03	1.4	0.2714	0.060	H
<i>E * Si</i>	-19.54005	0.091	1	0.091	13.55	0.0062	0.579	E
<i>E * Mn</i>	6.48033	0.26	1	0.26	38.49	0.0003	1.644	E
<i>E * P</i>	-114.25524	0.69	1	0.69	103.22	< 0.0001	4.410	E



Şekil 4. Çökme derinliğinin ilk kalınlık ve ezme oranı etkileşimine bağlı değişimi.



Şekil 5. Çökme derinliğinin soğuk haddelenme öncesi akma gerilimi ve ezme oranına bağlı değişimi.



Şekil 6. Çökme derinliğinin soğuk haddelenme öncesi çekme gerilimi ve ezme oranına bağlı değişimi.

Soğuk haddeleme öncesi kopma gerilmesi ve ezme oranı Şekil 6'da bir arada incelendiğinde ise kopma gerilmesinin düşük olduğu bölgede ezme oranı derin çekilebilmeyi olumlu yönde etkilerken, kopma gerilmesinin yüksek olduğu bölgede bunun tersi görülmektedir. Kopma gerilmesindeki artış bütün bölgelerde derin çekilebilmeyi olumlu yönde etkilemektedir. Fakat bu durum ezme oranının düşük olduğu bölgede daha belirgin görülmektedir. Matematik modelde kopma gerilmesinin katsayısının pozitif, ezme oranının ve bu iki faktörün çarpımının katsayısının negatif olması bu durumu ortaya çıkarmaktadır.

#### 4. Tartışma ve Sonuçlar

Bu çalışmada, kimyasal bileşenlerin, soğuk haddeleme öncesindeki mekanik özelliklerin ve soğuk haddeleme ezme oranının galvanizlenmiş düşük karbonlu çelik malzemeye uygulanan Erichsen çökertme deneyindeki çökme üzerindeki etkisi ANOVA kullanılarak incelenmiştir. ANOVA ile faktörlerin ikili etkileşimi şeklinde bir istatistiksel model elde edilmiştir.

Mikroyapı bakımından incelendiğinde artan soğuk haddeleme (ezme) oranı numunelerin ortalama tane boyutlarında ve tane sınırlarındaki karbür çökelmelerinde artışa neden olmuştur. İstatistiksel model incelendiğinde ise çökme miktarı üzerinde etkili faktörün ezme oranı olduğu görülmüştür. Bu parametreyi sırasıyla mangan oranı, % uzamanın ezme oranı ile etkileşimi, son kalınlığın fosfor oranı ile etkileşimi, ilk kalınlığın fosfor oranı ile etkileşimi ve Kopma gerilmesi parametreleri izlemiştir. Oluşturulan matematiksel model ile deneysel sonuçların çok iyi bir şekilde örtüştüğü tespit edilmiştir.

Bu çalışma ile endüstriyel uygulamalarda derin çekme işlemleri için kullanılacak çeliklerin üretim parametrelerinin optimizasyonu elde edilen ampirik formül kullanılarak kolaylıkla yapılabilecektir.

#### Teşekkür

Yazarlar çalışmada kullanılan numunelerin temini, verdikleri teknik destek ve laboratuvarlarının kullanımına izin verdikleri için MMK Türkiye'ye teşekkür eder.

#### Kaynakça

- [1] Anket, O., Ay, I., 2011. Sac Malzemelerin Şekillendirilmesinde Şekillendirme Sınır Diyagramlarının Kullanımı, Politeknik Dergisi, 14, 39-47.
- [2] Kayalı, S., 2000. "Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları", Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul, ISBN: 2880000050148, 105s.

- [3] Fu, M.W., Chan, W.L., 2011. Geometry and Grain Size Effects on the Fracture Behavior of Sheet Metal in Micro-Scale Plastic Deformation, Materials & Design, 32, 4738-4746.
- [4] Erdem, G., Taptik, Y., 2005. Effect of Hot Rolling Conditions to Produce Deep Drawing Quality Steels for Continuous Annealing Process, Journal of Materials Processing Technology, 170, 17-23.
- [5] Wu, M., Hua, L., Shao, Y.C., Zhou, Q.J., 2011. Influence of the Annealing Cooling Rate on the Microstructure Evolution and Deformation Behaviours in the Cold Ring Rolling of Medium Steel, Materials & Design, 32, 2292-2300.
- [6] Torkar, M., Tehovnik, F., Podgornik, B., 2014. Failure Analysis at Deep Drawing of Low Carbon Steels", Engineering Failure Analysis, 40, 1-7.
- [7] Ravi Kumar, D., 2002. Formability Analysis Of Extra-Deep Drawing Steel, Journal of Materials Processing Technology, 130-131, 31-41.
- [8] Monajati, H., Asefi, D., Parsapour, A., Abbasi, S., 2010. Analysis of the Effects of Processing Parameters on Mechanical Properties and Formability of Cold Rolled Low Carbon Steel Sheets Using Neural Networks, Computational Materials Science, 49, 876-881.
- [9] Khalaj, G., Azimzadegan, T., Khoeini, M., Etaat, M., 2013. Artificial Neural Networks Application to Predict the Ultimate Tensile Strength of X70 Pipeline Steels, Neural Comput & Applic, 23, 2301-2308.
- [10] Khaki, D., Ayaz, M., Arab, N., Noroozi, A., 2014. Multiresponse Optimization of Mechanical Properties and Formability of Hot Rolled Microalloyed Steels, J. of Materi Eng and Perform, 23, 1002-1015.
- [11] Noroozi, A., Ayaz, M., Mostafa Arab, N.B., Mirahmadi Khaki, D., 2013. Response Surface Methodology to Predict the Mechanical Properties of Hot-Rolled Sheets, Rev. Metall., 110, 359-371.
- [12] BSI, "Tensile Testing of Metallic Materials", Method of Test at Ambient Temperature, in, 2001.
- [13] TSE. 2014. "Metalik malzemeler - Sac ve şeritler - Erichsen çökertme deneyi.
- [14] Şahmaran, M., Bilici, Z., Ozbay, E., Erdem, T.K., Yucel, H.E., Lachemi, M., 2013. Improving the Workability and Rheological Properties of Engineered Cementitious Composites Using Factorial Experimental Design, Composites Part B: Engineering, 45, 356-368.
- [15] Rutherford, A., 2011. "Introducing Anova and Ancova a GLM Approach, 2nd Edition, Wiley", 360s.