

Makaralı bükme işleminde ince sacların kenar dalgalanma kusurunun deneysel incelenmesi

Osman Eldar DÖNMEZ*, Hikmet KOCABAŞ

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Konstrüksiyon ve İmalat Programı, 34437, Gümüşsuyu, İstanbul

Özet

Makaralı bükme işlemi arka arkaya yerleştirilmiş makara setlerinin hareket ettirilmesi ile sac malzemenin makaraların arasından geçerken kenarının bükülerek istenilen profilin elde edilmesi olarak tarif edilebilir. Çok çeşitli kesitler bu yöntemle imal edilmekte ve sanayi üretiminde makaralı bükme işleminin payı hızla artmaktadır. Yaklaşık yüzyıllık bir işlem olmasına rağmen, tezgah ve makara tasarımı, günümüz teknolojisinde halen deneysel olarak elde edilen bilgilere ve çalışanların pratik deneyimlerine bağlıdır. Yüksek maliyet ve harcamalardan ötürü sistematik olarak deneysel çalışmalar çok az yapılabilmektedir. Makaralı bükme tezgahı tasarımı istenilen profilin en az makara seti kullanılarak elde edilmesi hedefi ile yapılmaktadır. Makaralı bükme işleminde görülen kusurlar içinde kenar yüzeyde dalgalanma en sık görüleni olmakla birlikte, sac yüzeyinde/tabana alanında cep oluşumu, dikey ve yatay yönde eğilme, burkulma ve burulma sayılabilir. Bu çalışmada ince sacların makaralı bükme işleminde kenar dalgalanma kusuru deneysel olarak incelenmiştir. Kenar dalgalanmasının davranışının daha iyi anlaşılması ve bu kusurun kontrol altında tutulması makara setleri ve tezgah tasarımının daha düşük maliyetle ve daha hızlı yapılabilmesi açısından önem taşımaktadır. Deneysel çalışmada Taguçi yaklaşımı ile üç değişkenli ve iki düzeyli L8 tam eşleştirmeli deney yöntemi benimsenmiş ve elde edilen sonuçlar aynı yöntemle incelenmiştir. Sac malzemenin kenar yüksekliği değişimi en büyük etki olarak gözlenmiş, ayrıca yüzey kalitesine etkisi olan kenar yüksekliği ile malzeme cinsi ve makara dizilişi ile malzeme cinsi arasında etkileşimler tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Makaralı bükme işlemi, makaralı bükme (roll form), ondülasyon, kenar yüzeylerde dalgalanma, Taguçi yöntemi.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Osman Eldar DÖNMEZ. oedonmez@gmail.com; Tel: (532) 452 80 88.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Konstrüksiyon ve İmalat Programı'nda tamamlanmış olan "Makaralı bükme işleminde ince sacların kenar dalgalanma kusurunun deneysel incelenmesi ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 19.07.2007 tarihinde dergiye ulaşmış, 15.01.2008 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.07.2009 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Experimental investigation of edge waviness during cold roll forming of thin sheet metal

Extended abstract

Cold roll forming (CRF) is the process of forming the sheet metal by passing it through a series of rotating rolls arranged in tandem that bend and shape the sheet metal. CRF is gaining more significance between the other metal forming in today's manufacturing environment. The producers request tighter tolerances, improved surface quality and increased variety of cross sections that require the parameters affecting the process to be revisited in order to understand the effects and interactions among them. The design of the process is still based on empirically gained data and practical experience of employees. Systematic experimental researches have been done with limited forms because of high costs. The CAD tools in this field require to be improved in order to simulate and analyze the process in a better way. In this regard the latest design software packages are being sold with finite element analysis interfaces, as the design software packages are limited with the empirical methods & analogy with the previous similar shapes. On the producers' side it is very important to deliver the CRF machine as early as possible once an order is received. However, only after production, the CRF machines can be tuned to prevent any undesired shape defects that require additional time to fix some of which may need a rework on the machine. On the customer side the time loss is the biggest risk as it is a mass production machine and the tuning and design change costs which are always accompanied with time and profit loss.

Due to complex deformations unlike bending or deep drawing, CRF requires careful modeling of the process. The most frequent defect observed during CRF process of symmetrical u-shape profiles is the edge waviness. The web-buckling, twist, bend in the horizontal and vertical plane are the other defects, which can be observed during CRF. The introduced empirical equations i.e. forming angle method, forming rate method, Bhattacharyya method, Ona & Jimma method are the ones used by CRF machine & flower pattern designers. However these equations generally offer roll set numbers or flower patterns within a large safety margin. Therefore, for complex shapes the designer's experience is still the most reliable tool for deciding the design parameters.

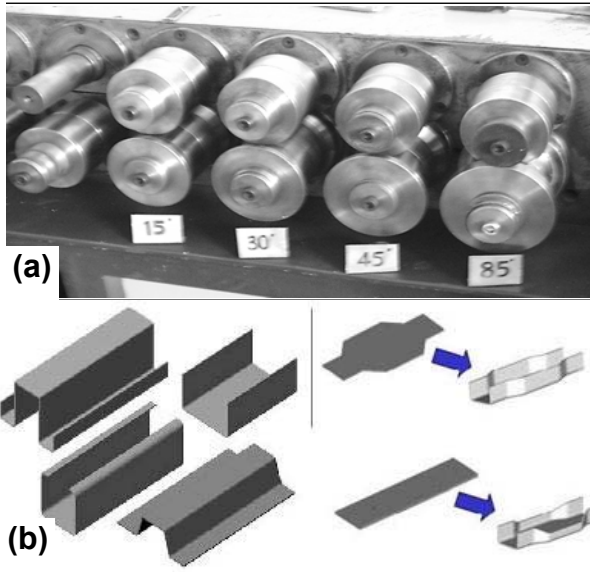
In this study Taguchi method as used in order to investigate edge waviness defect during CRF process of thin sheet metal applying full factorial L8 design method. During the experimental study the effects of the parameters of roll setup (the angle difference at the roll sets 40 and 55 degrees), flange length (12 mm or 17 mm) and material mechanical properties (mild steel or aluminum) on edge waviness and interrelations between them were investigated. The study shows that the flange length has the biggest effect on the edge waviness formation. The roll setup and material type has equal effects and are observed to have equal magnitudes after flange length. In addition to these effects, the interactions between the flange length, material type and roll setup are observed and detailed in this study. The interaction between roll setup and edge length shows that as the angle increment between two roll sets decrease, the edge waviness decreases for both of the edge length values. In this regard if there is a need to work with changing edge length, the angle increments between the roll sets should be reduced. This interaction result is especially important for the state of the art CRF machine design to manufacture parts with variable cross section. The second interaction between edge length and material type shows that as the edge length decreases the surface waviness decreases for both of the material types of aluminum and mild steel. The importance of this interaction is important in the classical CRF technology to control the material non-homogeneity. In other words using a larger edge length the CRF machine becomes sensitive to material mechanical properties changes. Another defect observed during the experimental study was the (longitudinal) bow. Due to the large angle difference between the last two roll stands a weak correlation is observed between the edge waviness and the bow formation in this study.

The experimental results, within the limits of this study, can be summarized as follows: 1) The edge length is the most important parameter to control the edge waviness. 2) The mechanical properties of the materials are equally important with the roll angle increment. 3) There is an interaction between roll angle increment and edge length. 4) There is another interaction between edge length and material properties. Shorter edge length controls the material mechanical properties non-homogeneity.

Keywords: Cold roll forming, ondulation, edge waviness, Taguchi method.

Giriş

Makaralı bükme işlemi veya İngilizce terimi ile "Cold Roll Forming" işlemi Şekil 1a'daki gibi arka arkaya dizilen makaralar arasından sac malzemenin geçirilmesi ile kademeli olarak istenilen profil kesitinin elde edilmesi olarak tarif edilebilir. İlk makaralı bükme makinesi (Yoder Y-70 Mud Strip Forming Machine) 1910 yılında, otomobil çamurluklarının imalatı için, Carl M. Yoder tarafından tasarlanmış, üretilmiş ve kullanılmıştır.



Şekil 1a Makaralı bükme düzeneği, 1b makaralı bükme işlemi ile üretilen sabit (solda) ve değişken (sağda) kesitli profiller

Makaralı bükme işleminin önemi giderek artmaktadır. Sac levhadan üretilmiş ürünlerin yaklaşık olarak %30 ila %50 arasında bu işlemle üretildiği kaynaklar tarafından belirtilmektedir. Makaralı bükme işlemi ile üretilen parçalar arasında raf ayakları, dekoratif ürünlerin yanı sıra cam kenar tutucuları, tüp üretimi, beyaz eşya parçaları, PVC pencere iç profilleri, kablo taşıyıcılar, otomobil tamponu gibi çeşitli örnekler sayılabilir.

Son dönemde yapılan çalışmalar, Şekil 1b'de örnekleri sunulan değişken kesitli profillerin, makaralı bükme işlemi ile üretilmesi üzerine yoğunlaşmaktadır. Konu paralelinde Sweeney ve Grunewald tarafından sunulan çalışmada otomotiv sanayinde makaralı bükme işleminin kulla-

nımının getireceği yararlar belirtilmekte ve önümüzdeki dönemde bu konuda firmaların ihtiyaçlarının çeşitleneceğinden ve bunların makaralı bükme işlemi ile üretilmesi ile daha rekabetçi bir yapıya dönüşeceği belirtilmektedir (Sweeney ve Grunewald, 2003).

Makaralı bükme işleminde makara tasarımı, günümüz teknolojisinde halen deneysel olarak elde edilen bilgilere ve çalışanların pratik deneyimlerine bağlıdır. Yüksek maliyet ve harcamalardan ötürü sistematik deneysel çalışmalar çok az yapılabilmektedir. Makaralı bükme işlemi ile ilgili olarak daha dar toleranslar, daha kaliteli yüzey sonuçları ve çeşitlenerek artan kesit tasarımları nedeniyle makaralı bükme işlemine etki eden değişkenlerin daha iyi incelenmesi ve aralarındaki etkileşimlerin daha iyi anlaşılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Etkilerin ve etkileşimlerin dikkate alınması ile daha verimli bir tasarım süreci yaşanarak, üretim öncesinde sorunlar azaltılacaktır. Öte yandan, SEA yazılımlarının daha etkin kullanılması ve deneylerin bilgisayar ortamında daha güvenilir bir şekilde yapılması ile pahalı deney düzenekleri nedeniyle kısıtlı kalmakta olan çalışmalar zenginleşecektir.

Makaralı bükme işleminde görülen şekil bozuklukları içinde kenar dalgalanmaları en sık rastlanan kusurdur. Diğer görülen kusurlar sac yüzeyinde/taban alanında cep oluşumu, kenar yüzeyde dalgalanma, eğilme, burkulma, burulma sayılabilir. Söz konusu plastik şekil değişimlerinin yaşanmaması için tasarımcılar en sık karşılaşılan kusurlara dikkat ederek basitleştirilmiş gerinim hesaplarından yararlanmaktadır.

Makaralı bükme işleminde iki makara seti arasında kalan bükülen kenar ucundaki gerinim, en basit halde Şekil 2a ve 2b'de görüldüğü üzere iki makara seti arasında düz bir sac parçasının kalması varsayımı ile aşağıdaki şekilde hesap edilebilir.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \sqrt{1 + \frac{2a^2(1 - \cos \theta)}{L^2}} - 1 \quad (1)$$

Ancak yukarıda verilen bağıntı çok basit bir hesaplama olup gerçekte iki makara seti arasından

geçerken Şekil 2a ve 2c'deki gibi sinüzoidal bir form almaktadır. Şekil 2c'de görüleceği gibi makara girişinden önce kenar bölgede uzama maksimum seviyeye çıkmakta, makara girişinde ise kenar bölge tekrar kısalarak çıkmaktadır.

Halmos tarafından önerilen iyileştirilmiş bir denklemde ise kenarın 90° büküldüğü varsayımından hareketle aşağıdaki 2 numaralı denklem ile kenar ucunda oluşan gerinim hesaplanmaktadır (Halmos, 2006).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \sqrt{1 + 2.467 \frac{a^2}{L^2}} - 1 \quad (2)$$

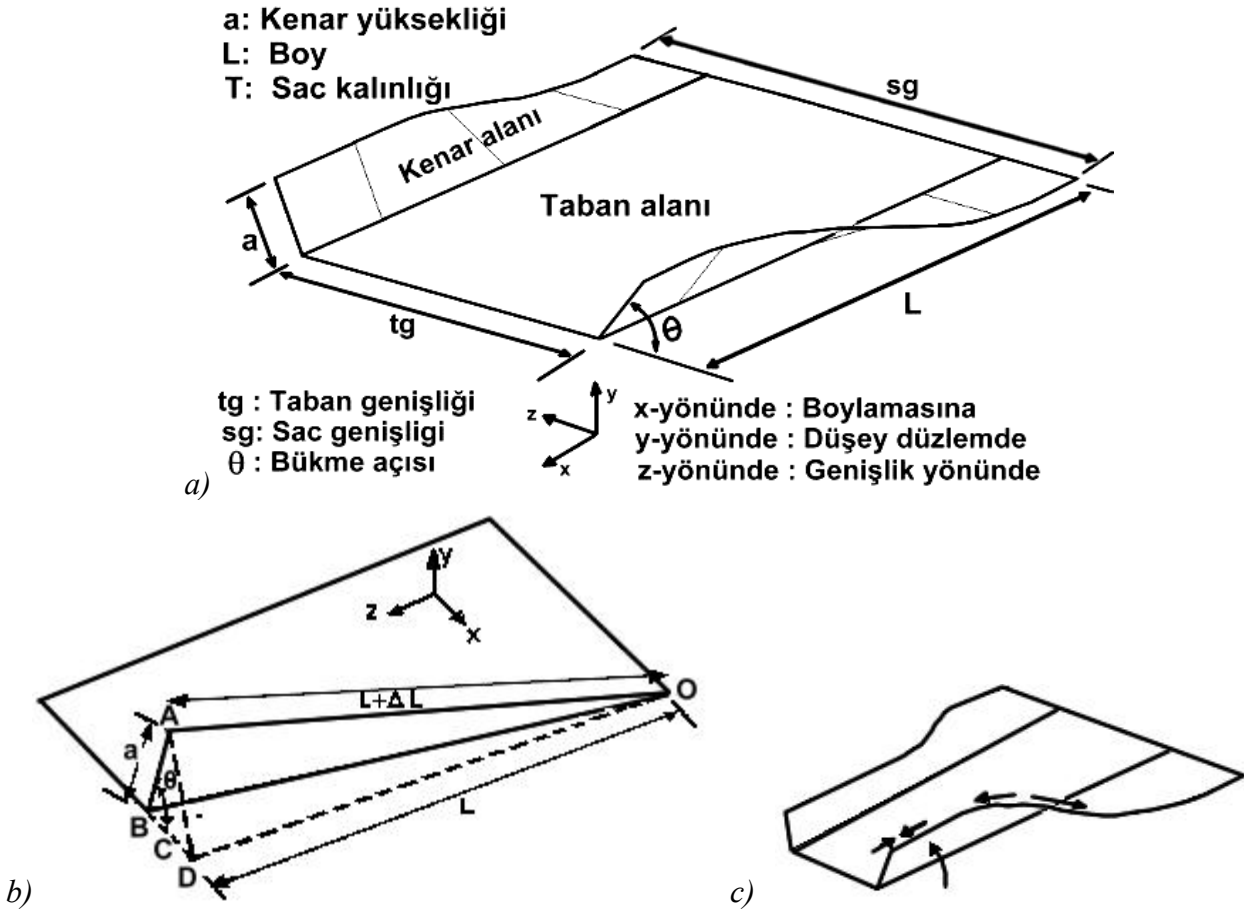
Makaralı bükme tasarımcısı kenar dalgalanma kusuruna sebebiyet vermemek için gerinimleri kritik seviyelerin altında tutmaya ve bükmenin sadece makara setinden gelen yan kuvvetler ile

yapılmasına çalışmaktadır. Ancak bunu mümkün olan en az makara seti ile düşük maliyetle yapmak tasarım çalışmalarını zorlaştırmaktadır. Makaralı bükme makara tasarımında en çok kullanılan Angel tarafından 1949 yılında geliştirilen form-açısı metodudur.

Bu metoda makara tasarımı için satılan ticari paket programların içinde de yer verilmektedir. Form açısı metodu sac malzemenin ilk makara setine girişinden son makara istasyonundan çıkışına kadar kenar ucunun Şekil 3'te gösterildiği gibi düz bir çizgiyi takip etmesi halinde iyi sonuç alınacağını tavsiye etmektedir.

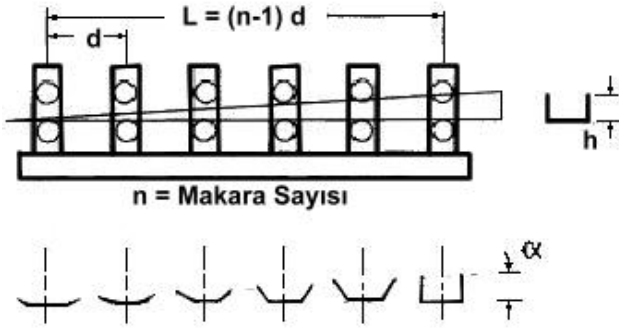
Form açısının kotanjant değeri 3 numaralı denklem ile verilmektedir.

$$\cot \alpha = \frac{L}{h} = \frac{(n-1)d}{h} \quad (3)$$



Şekil 2. İki makara seti arasında kalan sac parçası gerinimi a) kavramlar b) basitleştirilmiş model c) kenar şekil değişimi

h: kenar yüksekliği (son makaradan çıktıktan sonra), d: iki makara istasyonu arasındaki uzaklık, n: makara istasyonu sayısı



Şekil 3. Form açısı metodu

Genellikle, deneyimler sonucu oluşan birikim ile uygulamalarda, $\cot \alpha = 40.5$ değeri $\alpha \approx 1.5^\circ$ alınmaktadır. Buradan hareketle 4 numaralı denklem ile makara sayısı bulunabilmektedir.

$$n = \frac{40.5h}{d} + 1 \quad (4)$$

Plastik gerinimleri en aza indirebilmek için, form açısının 2° 'yi aşmaması tavsiye edilmektedir. Genellikle 1° olduğu hallerde iyi sonuçlar verdiği belirtilmektedir. Form açısı olarak $1^\circ - 25^\circ$ derece düşük karbonlu sünek çelikler için, $1^\circ - 35^\circ$ derece ise paslanmaz çelik ve sünekliği fazla olan alüminyum ve alaşımları için önerilmektedir (Nallapati, 1996; Senanayake vd., 1994).

Konu hakkında en çok referans gösterilen çalışmalardan birisi Bhattacharyya ve Smith'in 1984 tarihli deneysel çalışmasıdır. Bu çalışmanın konusunu makaralı bükme işleminde boylamasına gerinimlerin oluşması ve ürün kalitesine etkisi oluşturmaktadır. Yaptıkları çalışmada kenar açısı 90° dereceden küçük u-tipi şekil elde ederken en az sayıda makara kullanarak bükme açılarının optimizasyonu konusunda çalışmışlardır. Sırayla 0° 'li ve $\theta_i = 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ dereceli makaraları 2'li dizerek gerinim-ölçer yardımı ile bükme anındaki maksimum gerinimleri ölçmüşlerdir. Devamında 3. makara olarak 0° 'li, 2. makara ile aynı açılı, veya daha büyük açılı bükmelerde sonuçlarını sunmuşlardır.

Yazarlar elde ettikleri sonuçlarla şu önermelerde bulunmaktadır: 1- İlk makara istasyonunda kenar dalgalanması yaratmayacak en büyük açı ölçülmeli, bunun ardından ilk makara seti bu açıdan daha küçük bir açı ile üretilmelidir 2- Son makara istasyonunda istenilen açığı belirledikten sonra ara makara setleri (kenar dalgalanma yaratan açı örnek olarak 40° ise bu dereceden küçük) benzer şekilde üretilmelidir. Prensip olarak son makara girişinden önce de o açıdan 5 derece küçük bir makara eklenilmesi yazarlar tarafından önerilmektedir. Yazarlar bu prensiple ($0^\circ - 45^\circ - 85^\circ - 90^\circ$) makara düzeni ile düzgün bir ürün çıkarttıklarını bildirmektedirler (Bhattacharyya ve Smith, 1984).

Bhattacharyya ve diğerleri, her makara istasyonunda şekil değişim uzunluğunu (makara girişinde plastik şekil değişimi olan alan) tahmin eden bir metot üzerinde çalışmalarını aktarmaktadırlar; Malzeme katı-plastik kabul edilerek, şekil değiştirme enerjisinin en az olması prensibi ile hesaplama yapılmıştır. İlk sonuç olarak, pratikte malzemenin şekil verme işlemindeki davranışında, malzemenin fiziksel özelliklerinin, malzemenin mekanik özelliklerinden daha çok etki yaptığını gözlemlemişlerdir. Bildirdikleri sonuçlarında 5 numaralı denklem ile en az şekil değiştirme enerjisi sağlandığını, sonuçların $\pm \%6$ seviyesinde olduğunu, 5 numaralı denklemde belirtildiği gibi, şekil değiştirme uzunluğunun 3 fiziksel parametre ile ilgili olduğunu ve malzemelerin mekanik özelliklerinden pratikte bağımsız sayılabileceğini belirtmektedirler (Bhattacharyya vd., 1984).

$$L = a \sqrt{\frac{8 \times a \times \theta_p}{3 \times t}} \quad (5)$$

a: kenar yüksekliği, t: malzeme kalınlığı, θ_p : bükme açısı

Ona ve diğerleri (1984) yaptıkları çalışmada ise Hitachi Ltd. firmasının bilgi birikimi tablolaştırılarak benzetim yolu ile makaralı bükme tezgah tasarımı için makara adedinin belirlenmesi ile ilgili pratik yöntemler aktarılmaktadır. Bu çalışmada hem simetrik hem de asimetrik şekiller için verilen tablolaştırılmış bağıntılar sunulmuştur (Ona vd., 1984).

Bhattacharyya ve diğerleri tarafından yumuşak çelik ve 0.6 mm kalınlığında malzeme kullanılarak yapılan devam çalışmasında ise gerinim temel alınarak ampirik bir bağıntı bildirilmiştir. Yapılan deneylerle teorik olarak maksimum uygulanabilir gerinim değerleri ile hesaplanan makara kombinasyonları incelenmiş, maksimum gerinim olarak 0.0025 değerinin tasarımcı tarafından seçilmesi durumunda en uygun çözümün 0° - 29° - 61° - 85° - 90° kombinasyonu ile 4 adet makara olacağı belirtilmiştir (Bhattacharyya vd., 1990).

Konu hakkında makaralı bükme işleminin sonlu elemanlarla analiz çalışmaları da bulunmaktadır. Bu çalışmalar daha önce yapılmış deneysel çalışmalardaki geometriyi temel alarak bildirilen gerinim değerlerini tahmin etmeye çalışmaktadırlar.

Bütün bu çalışmalarda makaralı bükme işleminde sık görülen kusurlardan olan kenar dalgalanma kusurunun davranışı ile ilgili çalışmalar detaylı olarak bildirilmemektedir. Genellikle kusur görülmemesi için çerçeve alan belirlenmekte ve iyi bir tasarım için bu limitler içinde kalınması önerilmektedir. Ancak çalışmalardan görüleceği üzere, ampirik bağıntılarda bazı değişkenler gene tasarımcıya bırakılmaktadır.

Yukarıda sunulan çalışmalarda kusur gözlenmesi için daha güvenli tasarım yaklaşımları önerilmekte ancak makara sayısı yaklaşımlara bağlı olarak farklılık göstermektedir. Günümüzde makina üreticilerinden daha dar toleranslar ve artan çeşitlilikte kesitler beklenmesi ile kusura etki eden parametrelerin daha iyi incelenmesi ve aralarındaki etkileşimlerinin daha iyi anlaşılmasına ihtiyaç bulunmaktadır.

Amaç

Bu çalışmada ince saclarda makaralı bükme işleminde simetrik u-tipi açık profil üzerinde sık görülen kusurlardan biri olan kenar dalgalanması davranışının Taguçi yöntemiyle deneysel olarak incelenmesi suretiyle değişkenler ve aralarındaki etki ve etkileşimlerin daha iyi anlaşılması hedeflenmiştir.

Yöntem

Bu çalışmada, ince sac malzemelerde makaralı bükme işleminde u-tipi simetrik açık profil için kenar dalgalanma kusuru davranışı Şirvancı tarafından aktarılan Taguçi yaklaşımı ile L8 tam eşleştirmeli deney metodu ile incelenecektir (Şirvancı, 1997). Seçilen makara açısız dizilişi, malzeme cinsi ve kenar yüksekliği değişkenlerinin (iki düzeyli) deneysel olarak kenar dalgalanma kusuru davranışına etkileri incelenecektir. Sonuçlar gene L8 deney yöntemine göre incelenecektir. Sonuçların değerlendirilmesi bilgisayar ortamında 3-boyutlu tarama yöntemi ile nokta bulutu olarak aktarılmış dosyalar üzerinde yapılacak ve kenar dalgalanma ortalamaları belirlenecektir.

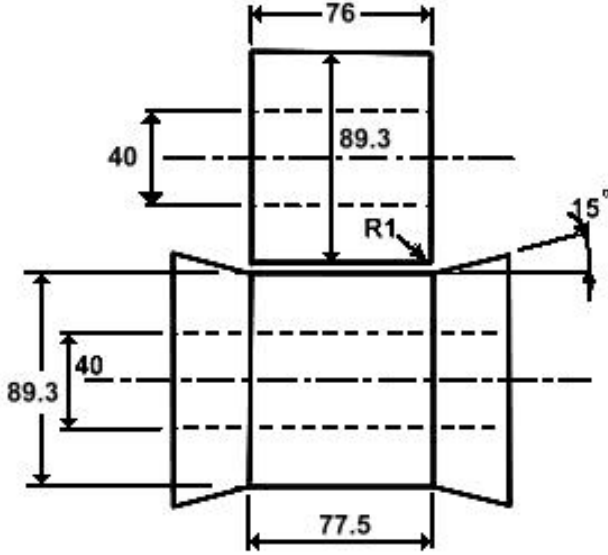
L8 deneyleri için seçilen 3 değişken ve değişkenlerin iki adet düzeyleri aşağıdaki şekilde belirlenmiştir:

- 1) Makara dizilişi (A): $A1=15^{\circ}-30^{\circ}-45^{\circ}-85^{\circ}$ ve $A2=15^{\circ}-30^{\circ}-85^{\circ}$
- 2) Kenar yüksekliği (B): $B1=17$ mm (sg=110 mm) ve $B2=12$ mm (sg=100 mm)
- 3) Malzeme cinsi (C): $C1=Alüminyum$ ve $C2=Yumuşak$ çelik.

Çalışmada elde edilen profillerdeki kenar dalgalanma değerleri işlem sonrasında ölçüleceği için makara açısı dizilişi ile ilgili kusur elde edilmesinin garantilenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla incelenen makale çalışmalarında 30 dereceden büyük veya 40 derece olarak bildirilen güvenli sınır üzerinde makara setleri arasında açısı farkları alınmıştır. İlave olarak 15 derecelik bir fark ile tamamen kusurlu profiller elde edilebileceği hesaplanmıştır.

Deneyler Şekil 4'te verilen daha önce 0.5 mm kalınlıkta alüminyum malzeme ile Panel 85 profili imalatı için üretilmiş bir makaralı bükme makinası üzerinde son dört makara seti kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada 0.5 mm nominal kalınlığında sünek çelik ve alüminyum sac kullanılmıştır. Çalışma için kenar dalgalanması kusuru yaratacak bir açısı farkı için 85° açılı yeni bir makara seti üretilmiştir. Makina üzerinde maka-

ra aralıkları sabit olarak 130 mm'dir. Makinada kullanılan motor, sac malzemeyi yaklaşık 15 metre/dakika hızla ittirecek şekilde makara setlerini çevirmektedir.



Şekil 4. Deneylerde kullanılan makara geometrisi kesit görünümü (ölçüler mm cinsindedir)

Deney sonuçlarının incelenmesi

Elde edilen profiller, 3-boyutlu taramadan geçirilmiş ve kenar dalgalanması bilgisayar ortamında ölçülmüştür. Kenar dalgaları yanı sıra elde edilen ürünlerde dikey yönde eğim de görüldüğünden bu eğilmenin tepe değerleri de ölçülmüştür. Elde edilen değerler Tablo 1'de sunulmaktadır.

Ayrıca deneylerde kullanılan malzemelerin gerilme-gerinim değerleri de çekme deneyleri ile hesaplatılmıştır. Alüminyum malzeme için akma gerilmesi, $\sigma_y=139$ MPa, elastisite modülüsü, $E = 64.3$ GPa, ve karşılık gelen akma gerinim $\epsilon_{akma} = 0.00216$ ve sünek çelik malzeme için akma gerilmesi, $\sigma_y = 301$ MPa, elastisite modülüsü, $E=109.7$ GPa, ve karşılık gelen akma gerinim değeri $\epsilon_{akma}=0.00274$ olarak hesap edilmektedir. Denklem 1 ile sunulan basitleştirilmiş gerinim hesabına göre 40° ve 55° açı farkları ile 12 mm ve 17 mm'lik kenar yüksekliğine karşılık gerinim değerleri test düzeneğinde $\epsilon_{40, 12mm}=0.002$, $\epsilon_{40, 17mm}=0.004$, $\epsilon_{55, 12mm}=0.0036$, $\epsilon_{55, 17mm}=0.0073$ sonuçlarına karşılık gelmekte-

dir. Kısa kenarlılar sünek çelik kritik gerinim civarında olup 2 kombinasyon için gerinimin kalıcı etki yaratması beklenirken, alüminyum malzeme için 3 kombinasyonun da etki yaratması beklenmiş olup deney sonuçları Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Deney sonucu elde edilen ortalama kenar dalgalanma değerleri, maksimum dikey eğilme değerleri ve dalgalı kenar ucu uzama değerleri

Sıra no	Deney kombinasyonu	Kenar dalgalanma ortalaması (mm)	Maksimum düşey düzlemde eğilme değerleri (mm)	Kenar ucu uzama değerleri (mm)
1	A1-B1-C1	1.361	3.56	1.84
2	A1-B1-C2	0.715	2.51	1.43
3	A1-B2-C1	0.378	4.41	0.61
4	A1-B2-C2	0.29	5.18	0.61
5	A2-B1-C1	1.871	12.26	3.04
6	A2-B1-C2	1.367	11.21	2.57
7	A2-B2-C1	0.68	10.57	1.11
8	A2-B2-C2	0.441	14.94	0.71

Kenar dalga ortalaması yaklaşımının kontrolü olarak kenar ucunun oluşan dalgalı kenar nedeni ile yeni uzunluğu bilgisayar kontrollü koordinat ölçme makinası ile taramadan geçirilmek sureti ile ölçülmüş ve Tablo 1'de en sağdaki sütunda sunulmuştur. Elde edilen kenar dalga ortalaması ve kenar ucu uzama sonuçları karşılaştırıldığında Şekil 5'te sunulmakta olan etki ve etkileşimlerle çok yakın sonuçlar ve iki veri seti arasında yüksek korelasyon elde edilmiştir. Ancak etkileşimler açısından ortalama değerler olması nedeniyle kenar dalga ortalaması yaklaşımı benimsenmiştir.

Tablo üzerinden yapılabilecek ikinci incelemede taban alandaki en yüksek düşey düzlemde eğilme değerleri ile yapılan birebir hesaplamada ise korelasyon değeri 0.24 olarak hesaplanmıştır. Halmos tarafından da özetlendiği şekliyle kenar dalgalanması ile düşey düzlemde eğilme arasında bir korelasyon olması beklenmelidir. Ancak, Nallapati tarafından aktarılan, son iki makara seti arasında açı farkının çok yüksek

olması halinde bu farkın ilave düşey düzlemde eğilmeye sebep olması suretiyle sönümlenme yapabileceği ile paralel olarak bu çalışmada söz konusu nedenle korelasyon gözlenmesini engellemiş olduğu düşünülmektedir. Bir grup olarak ilk dört deney ve son dört deney düşey eğilme değerleri incelendiğinde Nallapati tarafından derlenmiş önerme ile uyumdan bahsedilebilir (Halmos, 2006; Nallapati, 1996).

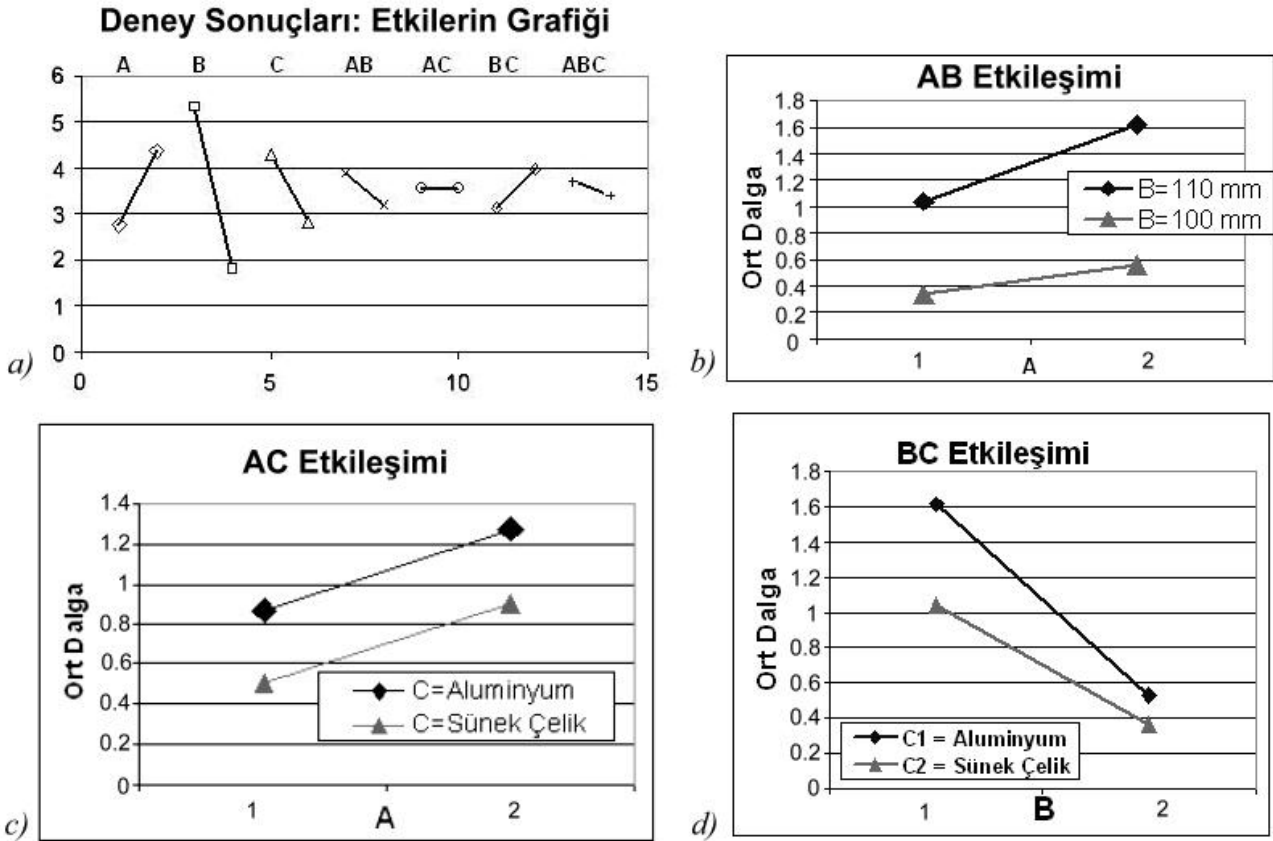
Makara dizilişi, sac malzeme kenar yüksekliği ve malzeme cinsi arasındaki etkileşim Şirvancı (1997) tarafından aktarılan Taguçi yaklaşımını temel alan L8 tam eşleştirmeli deney tasarım metodu ile incelenmiş ve Şekil 5'te sunulmakta olan etkileşimler ve etki büyüklükleri elde edilmiştir. Şekil 5a'da kenar yüksekliğinin (B) makaralı bükme işleminde en büyük etkiye sahip değişken olduğu görülmektedir. Malzeme etkisi ve makara seti arasındaki etkiler ise kenar yüksekliğini takip etmekte ve birbirine yakın etkiler olarak görülmektedir. Son olarak makara dizili-

şi, kenar yüksekliği ve malzeme cinsi arasında AB (Şekil 5b) ve BC (Şekil 5d) etkileşimleri gözlenmektedir. Grafikteki paralellik ise A ve C değişkenleri arasında bir etkileşim olmadığına işaret etmektedir.

Şekil 5b'de gösterilen AB etkileşiminde A1 makara dizilişi ile kenar yüksekliğinin ortalama kenar dalgasına etkisi azaltılmaktadır. Şekil 5d'de gösterilen BC etkileşiminde ise kenar yüksekliğinin azaltılması ile her iki malzeme ile düşük kenar dalgalanmaları elde edilmiştir.

AB etkileşimi günümüz teknolojisinde değişken kesitli profillerin makaralı bükme işlemi ile üretilmesi açısından önemli bulunmuştur. Makara sayısının artırılması ve açılı farkının azaltılması ile kenar yüksekliğinin artmasının yarattığı yüzey bozuklukları azalmaktadır.

BC etkileşimi değerlendirildiğinde ise, kenar yüksekliğinin, BC etkileşimi dikkate alınarak,



Şekil 5. Kenar dalgalanmaları için a) tüm etkilerin grafiği, b) AB etkileşimi, c) AC etkileşimi, d) BC etkileşimi

tasarım aşamasında dikkatli belirlenmesi ile, daha düşük kaliteli sac rulolarda malzeme mekanik özelliklerinin homojen olmamasından kaynaklanan hallerde dahi kenar dalgalanma etkisi önlenir.

Sonuçlar

İnce sacların makaralı bükme işleminde, makara dizilişi, kenar yüksekliği ve malzeme değişkenlerinin kenar dalgalanma kusuruna olan etkilerinin ve değişkenlerin aralarındaki etkileşimlerin daha iyi anlaşılabilmesi için Taguçi yaklaşımı ile L8 tam eşleştirmeli deney yöntemi kullanılarak yapılan bu çalışma sınırları içinde elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

1. Kenar yüksekliği ürün kalitesine etkisi en büyük olan değişkendir. Etki değeri yaklaşık olarak 3.5 birim (diğer iki etkiden de yaklaşık iki kat büyüklükte) olarak hesaplanmıştır. İşleme doğrudan etkisi olan makara dizilişindeki değişiklikte 1.6 birim ve malzemede alüminyum yerine sünek çelik kullanılmasının yarattığı olumlu etki ise 1.5 birim olarak tespit edilmiştir.
2. Kenar yüksekliği ve malzeme cinsi arasında önemli bir etkileşim gözlenmiştir. Etki değeri yaklaşık olarak 0.8 birim olarak elde edilmiştir. Kenar yüksekliği kısa (12 mm) olduğu zaman her iki malzeme ile de kenar dalgalanmaları yaklaşık %50 ila %70 oranlarında azalmış ve belirgin şekilde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.
3. Makara sayısı/dizilişi ve kenar yüksekliği arasında önemli bir etkileşim gözlenmiştir. Etki değeri yaklaşık olarak 0.7 birim olarak elde edilmiştir. Açık farkının çıkış makara setinde 15° azalması ve ilave makara seti eklenmesi ile kenar dalgalanmaları %30 ila %47 oranlarında azalmıştır.
4. Elde edilen sonuçlarda makara sayısı/dizilişi ile malzeme cinsi arasında etkileşim gözlenmemiştir.
5. Kombinasyon olarak A1 (0°-15°-30°-45°-85°) B2 (kısa kenar yüksekliği: 12 mm) ve C2 (sünek çelik) ile kenar dalgalanmasının en aza indiril-

mesi (dalga ortalaması 0.29 ± 0.12 elde edilmiştir) açısından en iyi sonuç elde edilmiştir.

6. Kenar dalgalanmaları ile düşey düzlemde eğilme arasında düşük bir korelasyon (0.23) elde edilmesinin çıkış makarasında 40° ve 55° olarak açı farkının yarattığı ilave eğilme nedeni ile sönümlendiği düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma için makaralı bükme tezgahlarının kullanımına izin verip, deneyler için yeni makara üreterek destek veren EFS Makina Ltd. (İvedik OGB/Ankara) şirketine teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- Bhattacharyya, D., Smith, P. D., Yee, C. H. ve Collins, I. F., (1984). The prediction of deformation length in cold roll-forming, *Journal of Mechanical Working Technology*, **9**, 181-191.
- Bhattacharyya, D. ve Smith, P. D., (1984). The development of longitudinal strain in cold roll forming and its influence on product straightness, *Advanced Technology of Plasticity*, **I**, 422-427.
- Bhattacharyya, D., Maltby, T. C., Martin, T. A. ve Panton, S.M., (1990). Prediction of strain development while roll forming fundamental sections, *Advanced Technology of Plasticity*, **II**, 871-876.
- Halmos, G., (2006). *Roll-Forming Handbook*, Taylor & Francis, Florida.
- Nallapati, S. R., (1996). CAD for roll forming process, *Doktora Tezi*, West Virginia University, Morgantown, West Virginia.
- Ona, H., Jimma, T. ve Kozono, H., (1984). A computer aided design system for cold roll forming, *Advanced Technology of Plasticity*, **I**, 508-513.
- Senanayake, R. S., Cole, I. M. ve Thiruvarudchelvan, S., (1994). The application of computational and experimental techniques to metal deformation in cold roll forming, *Journal of Materials Processing Technology*, **45**, 155-160.
- Sweeney, K. ve Grunewald, U., (2003). The application of roll-forming for automotive structural parts, *Journal of Materials Processing Technology*, **132**, 9-15.
- Şirvancı, M., (1997). *Kalite için deney tasarımı "Taguçi yaklaşımı"*, Literatür Yayıncılık, İstanbul.