

AISI 304 PASLANMAZ SAC MALZEME BÜKME İŞLEMİ İÇİN K-FAKTÖRÜNÜN BELİRLENMESİ

Yılmaz Küçük^{1*}, Eren Arif Işık²

¹ Bartın Üniversitesi, Müh. Mim. ve Tasarım Fak., Makine Mühendisliği Bölümü, 74100, BARTIN

² Bartın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 74100, BARTIN

Öz

Bu çalışmanın amacı otomotiv ve savunma sanayinde sıklıkla uygulanan sac levha büküm işlemlerinde önemli bir rol oynayan k-faktörünün belirlenmesidir. Söz konusu k-faktörü, parçanın bükümden önce lazer kesimde hangi boyda kesileceğini hesaplamada kullanılmakta olup, dolayısıyla tolerans aralığında büküm işleminin gerçekleştirilebilmesi için doğru belirlenmesi gerekmektedir. Literatürde, AISI 304 paslanmaz çelik sac malzemelerin kalınlığa bağlı k-faktörü ile ilgili kısıtlı bilgi bulunmaktadır. Bu çalışmada, belirtilen sac malzemenin 4 mm kalınlığa kadar büküm işlemlerinde kullanılması gereken k-faktörü değerleri belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: AISI 304, sac levha, bükme, k-faktörü.

DETERMINATION OF THE K-FACTOR FOR BENDING OF AISI 304 SHEET MATERIAL

Extended Abstract

The aim of this study is to determine the k-factor, which plays an important role in sheet metal bending processes, which are frequently applied in the automotive and defense industries. The mentioned k-factor is used to calculate the length to be cut in laser cutting before bending, so it must be determined correctly in order to perform the bending process within the tolerance range. Some equations are used to find the k-factor. However, these equations are theoretical and have differences with real twists. This may sometimes not be a problem for parts with only one twist. But problems are encountered with multiple twists. Because the length of the sheet metal after laser cutting cannot be extended again. Cutting operations are not precise and increase labor costs. It also causes loss of time. Although there are some exceptions, the k-factors of all sheet materials are expected to be different. Each company should first determine the materials it uses and determine their k-factors through experimental studies. Designs must be made according to the k-factors found. The wear on the dies and the usage time of the twisting machine should not be ignored. Abrasions are a factor that prevents accurate and precise bending. For this reason, maintenance work on the dies and twisting machine must be carried out regularly. In the literature, there is very limited information about the thickness-dependent k-factor of AISI 304 stainless steel sheet materials. Generally, studies have been carried out on calculating the amount of springback in bending and accordingly the required bending forces, comparing the k-factors found using different upper and lower molds, and calculating the k-factor using software programs such as C++. In this study, the values of k-factor that should be used in bending processes of the specified sheet material up to 4 mm thickness were determined.

Key Words: AISI 304, sheet metal, bending, k-factor.

1. Giriş

Otomotiv ve savunma sanayilerinde üretim aşamasında sıklıkla sac metal bükme işlemleri yapılmakta olup, bu işlemlerin önemli bir bölümü hidrolik abkant preslerle gerçekleştirilmektedir. Bu malzemeler alt ve üst kalıp arasında sıkıştırılarak istenen geometrik model elde edilmektedir. Bükümler malzemenin cinsine, kalınlığına ve büküm boyuna göre farklılık gösterebilmektedir. Bu farklılıklar sırasıyla şunlardır: Diğerine oranla sert olan malzeme bükme için daha fazla kuvvet gerekir. Malzeme kalınlığı arttıkça büyük kalıpların kullanılması

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author):

Yılmaz KÜÇÜK; Bartın University, Faculty of Engineering, Architecture and Design, Department of Mechanical Engineering, Email: ykucuk@bartin.edu.tr
74100, Bartın-Turkey.

Geliş (Received) : 09.10.2023

Kabul (Accepted) : 08.12.2023

Basım (Published) : 31.12.2023

gerekir. Büküm boyu alt kanal kalıp açıklığından büyük olması gerekir. Farklı yarı mamul tedarikçilerinden temin edilen malzemelerin mekanik özellikleri farklılık gösterebilmektedir.

Malzemelerin mekanik özellikleri ve fiziksel özellikleri, doğrudan sacların şekillendirilme işlemlerini etkiler. Bunu belirleyen mekanik özellikler; akma dayanımı ve çekme dayanımı, yüzde elastik ve yüzde kesit daralması, kopma uzaması, gerinim hızı hassasiyeti, deformasyon sertleşme üssü gibi değerler gösterilebilirler. Üretici firmalar tarafından verilen malzemenin ortalama mekanik özellikleri ile malzemenin gerçek mekanik özellikleri arasında %10-15 civarında farklılık görülebilmektedir (Aydemir, 2017). Bu durum, yapılacak bükümü doğrudan etkileyen bir etkidir. Bükümden önce lazer kesime gönderilen sac açınımı üzerinde tekrar değişiklik yapılması zordur. Parçanın açınım boyunun doğru hesaplanmadığı durumda telafisi imkânsız hatalı hurda ürün çıkmakta veya ek maliyetler getirecek işlemler gerekeceği gibi buna rağmen istenen sonucun elde edilemediği de görülebilmektedir.

Östenitik paslanmaz çelikler ağırlıkça %8-25 Ni ile %12-25 Cr içerirler ve en yaygın kullanılan Cr-Fe-Ni bileşeni alaşımlarıdır. Özellikle 304 L tipi paslanmaz çelikler şekillendirilebilirliği ve korozyona karşı direnci nedeniyle yaygın olarak kullanılırlar (Karakaş vd. 2014). 304L paslanmaz çeliği yüksek Cr içeriği nedeniyle oda sıcaklığında çok iyi korozyon direncine, yüksek oksidasyon direncine ve üstün mekanik özelliklere sahiptir. 304L paslanmaz çeliği nükleer reaktör bileşenleri, kimyasal işleme ekipmanları ve petrol endüstrisi gibi alanlarla kullanılırlar (Pasebani vd. 2019).

Sac metal endüstrisinde üretim aşamasında gerçekleştirilen bükme işlemleri sıklıkla kullanılan bir yöntem olması nedeniyle gerek Ar-Ge ve gerekse akademik araştırmaların da konusu olmaya devam etmektedir. Araştırmalar doğru ve uygun bir büküm için sac açınım boyu hesabının bilinmesi gerektiğini vurgulamıştır. Sac metal bükümünde ancak k-faktörünün doğru bilinmesiyle ve uygulanmasıyla doğru sonuca ulaşıldığı görülmüştür.

Kovacevic vd. (2001) çalışmasında sonlu elemanlar yöntemiyle ANSYS programını kullanarak ve deneysel incelemeye dayalı lazerli sac bükme simülasyonu gerçekleştirmişlerdir. Simülasyon yardımıyla bükülme açısı, gerilim-gerinim dağılımı, artık gerilim ve sıcaklık parametre girişlerini sağlamışlardır. Lazer ışınımı sırasında aşırı hızlı ısıtma ve soğutma prosesi ile bükülme etkisinin oluştuğunu bildirmişlerdir. Lazer ışınımı sırasında sac levhayı başarılı bir şekilde bükülebileceğini, sac levhanın mikro yapısına zararlı bir etkisinin olmadığını ve paslanmaz çelik bir sac levhada çatlak veya gözenek oluşturmadığını vurgulamışlardır.

Işıktaş (2011) çalışmasında V bükme kalıplarında DKP ve Paslanmaz malzemelerinden 1, 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki sac levhaları kullanarak bunların geri esneme değerlerini incelemiştir. Kalıp ve malzeme değişkenlerine göre geri esnemenin değiştiğini bildirmiştir. Malzeme kalınlığındaki artışın geri esnemeyi azalttığını tespit etmiştir. Bükme açısının artmasıyla geri esneme değerinin azaldığını belirtmiştir. Üst kalıp radyusunun büyümesiyle geri esnemenin arttığını belirtmiştir.

Dilipak vd. (2013) çalışmasında 4 mm kalınlığındaki S235JR çeliğini kullanarak 90° lik kalıplarda V bükümünü gerçekleştirmiştir. 5 farklı radyusa sahip zımba kullanılarak yapılan büküm işlemlerinde üst kalıbı, sac levhanın üstünde 30 saniye bekletilerek ve bekletmeden hemen bükülecek şekilde uygulamışlardır. Numuneleri temperlenmiş, normalize edilmiş ve ısı işlem görmemiş olmak üzere üç farklı şekilde hazırlamışlardır. Çalışma sonucu olarak üst kalıp yarıçapı arttıkça ileri esneme miktarının da azaldığını bildirmişlerdir.

Uslu (2014) çalışmasında 1 mm, 1,5 mm ve 2 mm kalınlığındaki DP800, DP600, DC01, DC04 ve DC05 sac malzemeleri 60°, 90° ve 120° kalıp açıları ile bükerek geri yaylanma davranışlarını incelemiştir. Geri yaylanmanın, kalıp ve malzeme parametrelerine göre değiştiğini tespit etmiştir. Akma mukavemeti düşük sac malzemelerde geri yaylanmanın daha az oluştuğunu ve yüksek mukavemete sahip sac malzemelerde geri yaylanmanın daha fazla oluştuğunu belirtmiştir. Ayrıca malzeme kalınlığının artmasıyla geri yaylanmanın azaldığını tespit etmiştir.

Hekim (2016) çalışmasında V büküm kalıbında Al1050 H14 sac malzemesinin sıkıştırma kuvvetlerini ve hadde yönüne bağlı olacak şekilde geri yaylanma davranışını incelemiştir. Numune olarak 150x50 mm ebatlarında 3 mm sac kullanmışlardır. Sıkıştırma kuvveti arttıkça geri yaylanmanın azaldığını bildirmiştir. Geri yaylanmanın en az olduğu yön 45° hadde yönünde olduğunu ve geri yaylanmanın en fazla olduğu yön 90° hadde yönünde olduğunu belirtmiştir.

Aydemir (2017) çalışmasında Hardox 400 ve AISI 304L malzemelerinin mekanik özelliğine bağlı olacak şekilde bükme kuvvetleri miktarlarını incelemiştir. Bükme deneylerinden önce malzemelere çekme deneyi uygulayarak

mekanik özelliklerini belirlemiştir. Bu değerleri firmaların teorik olarak verdiği değerler ile kıyaslamış ve söz konusu malzemelerin mekanik özelliklerinde tedarikçi firmaya göre farklılıklar oluştuğunu göstermiştir. Bu farklılıkların da sac malzemelerin büküm kuvvetlerini etkilediği belirtilmiştir. Herhangi bir tasarım yapılırken teorik değerlerin kullanılmaması ve deneysel sonuçlarla elde edilen değerlerin kullanılması gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca bu çalışmada malzemelerin deney numunelerinde boyun artmasıyla bükme kuvvetindeki artış grafiğinin lineer ilerlemediği görülmüştür. Bunun da hataların ortaya çıkmasına neden olduğunu belirtmiştir. Hardox 400 numuneleri ile yapılan bükme deneylerinde bükme boyuna bağlı olarak %5 daha fazla bükme kuvvetleri ile karşılaşırken, AISI 304L numuneleri ile yapılan deneylerde %10 daha fazla bükme kuvvetlerinin okunduğunu belirtmiştir.

Bozkurt (2018) çalışmasında 1 , 2 , 3 ve 4 mm sac kalınlığı aralığındaki EN10130 DC01 çeliğin (1.0330 soğuk haddelenmiş düşük karbonlu çelik) açınım boyu hesabının doğru yapılması için C++ yazılımı kullanarak program yazmıştır. Bu programa sac kalınlığının, büküm sayısının ve üst kalıbın radyusunun girilerek açınımın otomatik olarak hesaplandığını bildirmiştir. Ayrıca bükme kavis yarıçapının, sac malzemenin cinsine ve kalınlığa göre değiştiğini vurgulamıştır. Kullanılan üst kalıp ucu radyus değeri ile bükülecek parçanın iç bükümündeki radyusun aynı değerde olması gerektiği belirtilmiştir. Alt kalıpların malzeme kalınlıkça büyüdüğünü ama üst kalıbın 0,5 mm' den 15 mm' e kadar aynısının kullanıldığını, bu durumun çizilen ve tasarlanan üç boyutlu parça ile yapılan büküm arasında ölçüm farkına neden olduğunu ifade etmiştir.

Malyer & Kayral (2018) 1 mm kalınlığında AA6061 alüminyum alaşımının geri esneme özelliklerini araştırmışlardır. Numunelerinin bir bölümüne mikrodalga fırında, diğer bölümüne ise geleneksel fırında yaşlandırma işlemi uygulanmış ve sonrasında bükme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Isıtma oranının, malzemenin mekanik özelliklerine baskın etkisi olduğunu ve dolayısı ile mikrodalga fırında yaşlandırılarak bükülen numunelerde geri esnemenin daha az olduğunu belirtmişlerdir.

Şekerci vd. (2018) çalışmalarında bükme işlemini yüzey alanında değişimin çok az ya da hiç olmadığı, doğrusal eksen etrafında gerçekleşen metalin plastik şekil değişimi olarak ifade etmişlerdir. Bükmenin düzgün bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için düzgün hızın ve açıklığın olması gerektiğini vurgulamışlardır. Bükme işleminin en önemli faktörlerini; metali kırmadan verilebilecek en küçük bükme çapının belirlenmesi, metalin sertliğinin bilinmesi ve kalınlığının belirlenmesi olarak belirtmişlerdir. Ayrıca bükülen malzemenin kesitinde oluşan değişimlerin genel olarak, malzemenin kalitesine, malzemenin kalınlığına, büküm açısına, büküm yarıçapına ve büküm kuvvetlerine bağlı olduğuna vurgu yapmışlardır.

Lu vd. (2018) çalışmalarında SMAT yönteminin paslanmaz çelik saclar üzerinde üç noktalı bükmede güçlendirici etkisini deneylerle incelemiş ve analiz etmişlerdir. Numunelerin bükülmesiyle desteklenen çalışmada oluklu şekil ve SMAT yöntemi birleşiminin bükülme sertliği, mukavemet ve sertleşme açısından önemli artış sağladığını belirtmişlerdir.

Pekince (2019) çalışmasında 3, 4, 5, 6 ve 8 mm kalınlıklarında St37-2, St52-3, DKP ve HRP sac malzemeleri, açınımaları 100 mm olacak şekilde işlemiş ve oluşan bu sacları tam ortasından 90° olacak şekilde bükümüştür. Aynı kalınlığa sahip ve aynı alt kalıpla bükülen farklı malzemelerin k-faktörünün farklı olduğunu gözlemlemişlerdir. St37-2 malzemesinin farklı kalınlıklarında ve aynı alt kalıpla bükümü sonucunda k-faktörünün değişiklik gösterdiğini belirtmişlerdir. Alt kalıpların değişken olmasının malzemenin radyus değerini değiştirdiğini ve k-faktörünü değiştirdiğini bildirmişlerdir. Ayrıca malzeme kalınlığı arttıkça k-faktörünün arttığını vurgulamışlardır.

Basmacı & Sayın (2019) 1 ve 2 mm kalınlıktaki Bakır sac numunelerini V bükme kalıbı tasarlayarak 60°, 90° ve 120° açılarında 2 ve 4 mm bükme radyuslu kalıplarda bükmüşlerdir. Kalıp açısı ve levha kalınlığı arttıkça geri esneme miktarının azaldığını ve bükme radyusu arttıkça geri esnemenin arttığını gözlemlemişlerdir. Kalıp açısının artışı sonucu geri yaylanmanın azalmasının büküm işlemi sonrasında sac numunenin dış yüzeydeki şekil değişikliğine uğrayan bölgelerdeki uzama miktarı azalışından dolayı olduğuna vurgu yapmışlardır. Geri yaylanmanın azaltılmasının bükme radyusunun azaltılmasıyla elde edileceğini bildirmişlerdir.

Doğdu (2021) çalışmasında tüm mühendislik malzemelerinin k-faktörünün 0,27 - 0,5 arasında kabul gördüğünü bildirmiştir. K-faktörünü belirleyen unsurların en önemlisinin sac malzeme büküm iç yarıçap değeri olduğunu vurgulamıştır. Alüminyum sac malzemelerinde k-faktörünü belirlemek için yumuşak ve orta sert olarak değerlendirmek gerektiğini belirtmiştir. Ayrıca, söz konusu çalışmada k-faktörü değerinin 0,5' ten büyük olamayacağı bunun sebebi olarak da plastik şekil değişimi için sac malzemeye büküm işlemi ile basma gerilmesine maruz bırakılmak olduğu belirtilmiştir. Büküm işlemi sırasında asıl gerilmelerin sacın iç yüzeyinde oluşan basma

gerilmeleri olduğu ifade edilmiştir. Sacın dış yüzeyinde oluşan gerilmelerin ise çekme gerilmeleri olduğu ve asıl gerilme olmadığı vurgulanmıştır. Çekme gerilmelerinin sacın iç kısmında oluşan basma gerilmelerine tepki olarak oluştuğu ve böylece sac üzerinde oluşan basma gerilmelerinin her zaman çekme gerilmelerinden büyük veya eşit olması gerektiği bildirmiştir.

Çerçi (2021) çalışmasında bükme esnasında, sac malzemenin dış yüzeyinde çekme kuvveti etkisiyle uzama, iç kısımlarında ise basma kuvveti etkisiyle kısalma gerçekleştiğini belirtmiştir. K-faktörünü, büküm sabitini hesaplama yöntemi olarak malzeme kalınlığına olan mesafenin malzemenin kalınlığına oranı olarak açıklamıştır.

Al-Wahab & Baştürk (2021) çalışmasında 0,5, 0,7 ve 0,8 mm kalınlığındaki alüminyum numuneleri dikdörtgen, dairesel ve üçgen kalıplar kullanarak ve yağlayıcı da ekleyip bükerek geri esneme etkilerini incelemiştir. Sac kalınlığı artışının geri esnemeyi azalttığını bildirmişlerdir ve yağlayıcı türünün geri esnemeyi etkilemediğini vurgulamışlardır.

Küçükduvan (2022) çalışmasında sac levhaların birçok mekanik özelliğinin sacı şekillendirmede etkili olduğunu belirtmiştir. Sacın kalınlığının, akma gerilmesinin ve haddeleme yönünün bükme işlemini doğrudan etkilediğini açıklamıştır. Ayrıca bükülecek sac malzemenin akma gerilmesinin büyük olmasının daha yüksek bükme kuvvetini gerektirdiğini bildirmiştir.

Literatür çalışmaları incelendiğinde, çalışmaların genelde bükümde geri esneme miktarlarının hesaplanması ve buna bağlı olarak gerekli bükme kuvvetleri, farklı alt ve üst kalıplar kullanılarak bulunan k-faktörlerinin karşılaştırması, C++ gibi yazılım programları kullanılarak k-faktörünü hesaplama üzerine yapıldığı görülmüştür. Bu çalışmada savunma sanayi üretimleri başta olmak üzere pek çok alanda sıklıkla kullanıldığından dolayı 0,8 mm, 1 mm, 1,5 mm, 2 mm, 2,5 mm, 3 mm ve 4 mm AISI 304 kalite paslanmaz sac malzemeleri kullanılarak yapılan bükme işlemleri sonrasında doğru sonucu veren k-faktörlerinin hesaplanması yapılmıştır. Bu çalışma ile abkant pres kullanarak büküm işlemi yapan her firma kendi k-faktörlerini hassas bir şekilde hesaplayıp kullanabileceklerdir.

2. Materyal ve Yöntem

Çalışma kapsamında AISI 304 kalite paslanmaz malzemesi 0,8 mm, 1 mm, 1,5 mm, 2 mm, 2,5 mm, 3 mm ve 4 mm kalınlığında tedarik edilmiştir. Solidworks programı kullanılarak üç farklı k-faktörü ile her kalınlık için üç farklı sac açınımları oluşturulmuştur. Bu k-faktörleri 0,275, 0,35 ve 0,425 değerleridir. Bu değerler k-faktörünün 0,200 ve 0,500 arasında olması beklendiği için 0,075 birim artırılarak seçilmiştir. Tedarik edilen sac numuneler 90° açı yapacak şekilde bükülmüştür. Malzemeler, bükümden önce ve sonra detaylı olarak incelenmiştir. Oluşan bükümlere göre doğru bükümler için dördüncü bir açınımına gerek duyulmamış ve aynı k-faktörü değeri ile doğrulama bükümleri gerçekleştirilmiştir. Fakat tolerans dışı kalan bükümler için dördüncü bir öngörü k-faktörü belirlenmiştir. Belirlenen bu k-faktörlerine göre her kalınlık için bir adet daha malzeme tedarik edilerek yine 90° açı yapacak şekilde bükülmüştür. Tüm sonuçlar göz önüne alındıktan sonra doğrusal interpolasyon hesaplaması ile yeni bir k-faktörüne ulaşılmış ve bükme işlemi tekrarlanmış ve doğrulama bükümleri yapılmıştır.

Çalışmada, AISI 304 kalite paslanmaz sac malzemesinin belirtilen her bir kalınlık için en uygun k-faktörü belirlenmiştir. Bükümden sonrası yükseklik ve genişlik değerleri 50x50 olması istenmiştir. Tüm bükümler için ortaya çıkan sonuçlar ise tablo haline getirilmiştir.

SolidWorks programında parçalar oluşturularak, 0,275, 0,35 ve 0,425 k-faktörü değerleri ile açınımları alınmıştır. Oluşan açınımlar Tablo.1' de belirtilmiştir.

Tablo.1.Farklı kalınlıklara göre 50x50 mm olması istenen tasarımın değişen k-faktörlerine göre oluşan açınımlar boyaları.

Malzeme Kalınlığı	k: 0,275	k: 0,35	k: 0,425
0,8 mm	98,4 mm	98,5 mm	98,59 mm
1 mm	98 mm	98,12 mm	98,24 mm
1,5 mm	97 mm	97,18 mm	97,36 mm
2 mm	96,01 mm	96,24 mm	95,48 mm
2,5 mm	95,01 mm	95,3 mm	95,6 mm
3 mm	94,01 mm	94,36 mm	94,72 mm

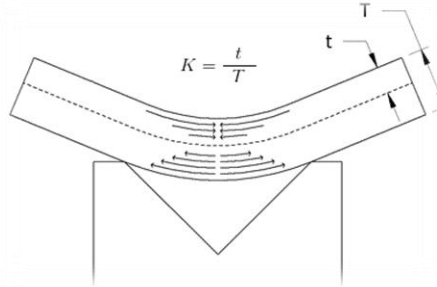
4 mm	92,01 mm	92,48 mm	92,95 mm
------	----------	----------	----------

2.1. K-Faktörü

K-faktörü üretilmesi istenen parçanın bükümden sonra doğru ebatlara gelmesini sağlayan değer olarak açıklanabilir. Uygun büküm için gerekli olan; açınım sacın, alt ve üst kalıplar ile bükülmesi için doğru ebatlarda olmasıdır. Bu açınımı etkileyen ise büküm iznidir. Büküm iznini ise k-faktörü etkiler. K-faktörü sac levha parçasının kalınlığına göre levhanın nötr ekseninin konumunu temsil eden bir orandır. Sac levha büküldükten sonra merkez çizgisinde kayma meydana gelir ve nötr eksen oluşur. Nötr eksen bükme işleminden kaynaklanan çekme-basma deformasyonu etkisinin oluşmadığı kabul edilen sanal eksen olarak ifade edilebilir. Özetle k-faktörünün sayısal ifadesi bükme işlemi sonrası nötr eksen mesafesinin malzeme kalınlığına oranıdır.

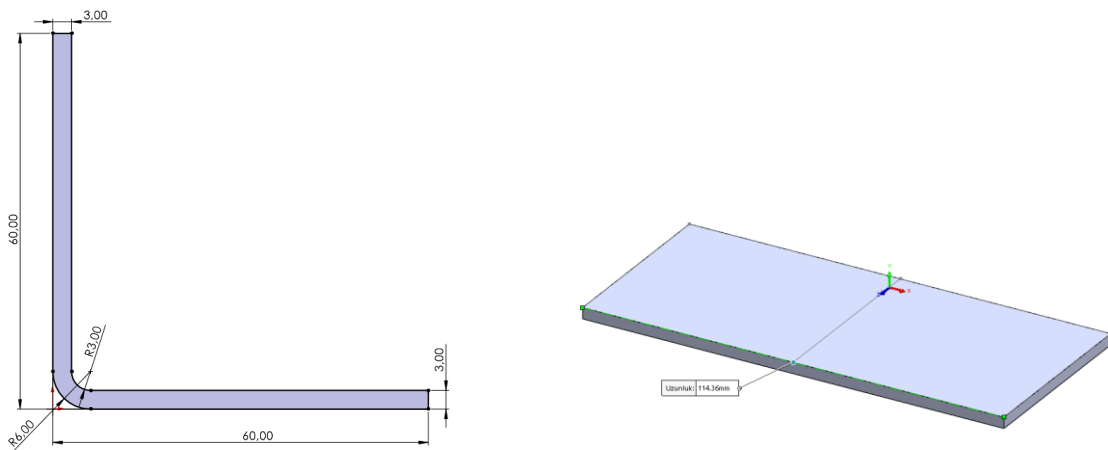
Sac metal bükümleri, k-faktörünün en fazla kullanıldığı üretim alanıdır. K-faktörünün kullanılan tüm malzemelerde ve tüm kalınlıklarda bilinmesi, tasarım biriminin hata toleransını en aza indirdiği bilinmektedir.

K-faktörü değeri için genellikle varsayımlar kullanılmaktadır. Bu varsayımlar kullanılan malzeme sertliğine veya büküm ucu yarıçapına göre değişmektedir. Matematiksel olarak olması gereken değeri ise 0 ile 0,5 değerleri arasındadır. Bu değişikliğin ana sebepleri, malzeme kalınlığının değişmesi ve sac malzemedeki nötr eksenin yeri gibi değerlerin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. K-faktörü matematiksel olarak t / T oranı ile açıklanabilir.



Şekil.1. k-faktörü oranının sac metal üzerinde gösterimi (Bozkurt, 2018).

K-faktörü için bir örnek vermemiz gerekirse genişliği fark etmeksizin 60 mm yüksekliğinde ve 60 mm uzunluğunda 3 mm bir parçayı tasarlayalım. Büküm için kullandığımız k-faktörü olarak da 0,35 değerini girerek açınım oluşturulursa uzunluğu 114,36 mm olarak görülür. Eğer 0,5 değeri girilirse bu değer 115,07 mm olduğu görülür. Sonuç olarak farklı k-faktörü değerleri ile farklı sac açınım değerlerinin oluştuğu görülmektedir.



Şekil.2. 3 mm kalınlığında 60 mm yüksekliğinde ve 60 mm uzunluğunda SolidWorks programı kullanılarak oluşturulmuş bir parça tasarımı ve K-faktörü 0,35 olarak girildiğinde parçanın açınım boyu uzunluğu.

K-faktörünün sac açınımında matematiksel olarak kullanılması ise aşağıdaki gibidir (Bozkurt,2018).

$$BA = \frac{2 \times \pi \times \alpha (R + K \times T)}{360} \quad (1)$$

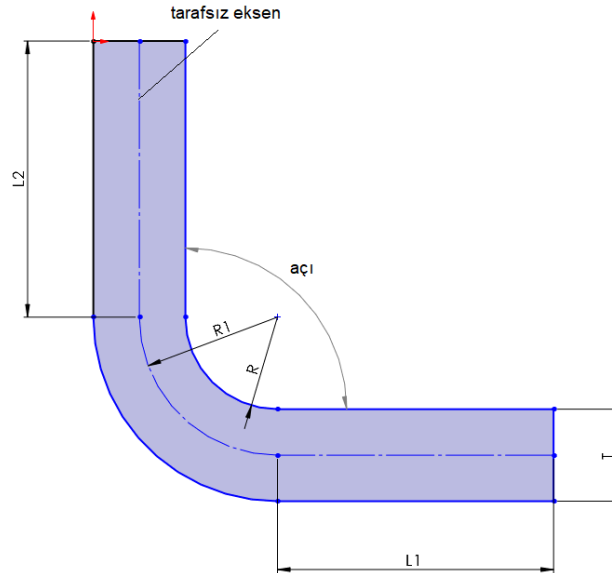
Burada kullanılan değerler şu şekilde açıklanmaktadır;

BA = büküm izni, α = büküm açısı, R = büküm yarıçapı (iç büküm yüzeyi) , K = k-faktörü ve T = sac kalınlığı (mm).

2.2. Açınım Boyu Hesabı

Büküm işlemi için, tasarlanan açınım boyunun bulunması gereklidir. Özellikle savunma sanayisindeki hassas işlerin sürdürülebilmesi için bu nokta çok önemlidir. SolidWorks, Inventor gibi tasarım yapılabilen programlar ile bükümlü parçanın açınımı alınabilmektedir.

Bükülen parçanın bükmeden önceki hali olan açınımının bulunması için bükülen kısım veya kısımların tarafsız eksen üzerinde tam boyu hesaplanabilmektedir. Bu hesabın yapılabilmesi için aşağıdaki şekilde belirtilen sac malzemesini, kalınlığı, bükmenin yarıçapı ve bükme açısını bilmemiz gereklidir.



Şekil.3. Açınım boyu bulmak için gerekli olan bilgiler.

Bükme için gerekli açınımın bulunmasında uygulanan yarıçap Tablo 2'deki gibi hesaplanabilir. (Bozkurt, 2018).

Tablo.2. Bükme ucu değerleri ile K değeri bağlantısı.

Bükme Ucu Değerleri	K Değeri	Bükme Kavis Yarıçapı (mm)
Yarıçap, sac kalınlığı ile aynıysa	$K = 0,33 \times T$	$R1 = R + 0,33 \times T$
Yarıçap, sac kalınlığının 2 ile 4 katı arasındaysa	$K = 0,42 \times T$	$R1 = R + 0,42 \times T$
Yarıçap, sac kalınlığının 4 katından fazlaysa	$K = 0,5 \times T$	$R1 = R + 0,5 \times T$

Bu formüllerle kullanılan elemanların açıklamaları ise şu şekildedir;

R = Büküm ucu yarıçapı , R1 = Tarafsız eksen büküm kavis yarıçapı ve T = Sac malzemesinin kalınlığı (mm), K = K-Faktörü.

2.3. AISI 304 Kalite Paslanmaz Malzemesinin Özellikleri

AISI 304 çeliği yüksek mukavemete sahip olup, dünyada en fazla kullanılan paslanmaz çelik türüdür. Çok iyi şekil verilebilme ve kaynaklanabilme özelliklerine sahiptir. 900°C civarında ısı bulunan bir ortamda oksidasyon

dayanımları gayet iyidir. Ancak nemli ve su bulunan 400 – 850°C arası ortamlarda korozyon dayanımları düşmektedir.

Sağlık alanında sıklıkla karşılaştığımız AISI 304 çeliği; tencere, tava, kaşık, bıçak, çatal gibi mutfakta kullanılan araçlarda karşımıza çıkmaktadır. Bunun yanında dış cephe kaplamaları, ısı dönüştürücüleri, cıvata, pul, somun ve tij gibi bağlantı elemanlarında kullanılmaktadırlar. AISI 304 kalite paslanmaz çeliğin kimyasal özellikleri Tablo.3'te ve mekanik özellikleri Tablo.4'te verilmiştir.

Tablo.3.AISI 304 kalite paslanmaz alaşımının kimyasal özellikleri (Şahin, 2013).

Elementler	Karbon (C)	Manganez (Mn)	Fosfor (P)	Kükürt (S)	Silisyum (Si)	Krom (Cr)	Nikel (Ni)
Kütlece (%)	0,08	2,0	0,045	0,030	1,0	18,0 – 20,0	8,0 – 10,5

Tablo.4.AISI 304 kalite paslanmaz alaşımının mekanik özellikleri (Şahin, 2013).

Malzeme	Kopma Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Uzama	Sertlik
AISI 304	600	310	60	170

2.3. Abkant Büküm Makinesi

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen büküm işlemlerinde hidrolik abkant pres kullanılmıştır. Makinenin özellikleri üretici firma tarafından şu şekilde verilmiştir. Baykal ürünü APHS 31200 modelidir. Genişlik ölçüsü 3800 mm, derinlik ölçüsü 1850 mm, yükseklik ölçüsü 2800 mm dir. Makine ağırlığı 10000 kg dır. Baskı gücü 200 kN dur. Büküm uzunluğu 3100 mm ve dört eksenlidir. Bükülen maksimum malzeme kalınlığı 10 mm dir. Dayama mesafesi olarak X ekseninde 1000 mm, R ekseninde 160 mm dir. Maksimum hareket hızı X ekseninde 350 mm/s, R ekseninde 240 mm/s ve Z ekseninde 1000 mm/s dir. Pozisyon hassasiyeti X ekseninde $\pm 0,03$ mm, R ekseninde $\pm 0,05$ mm ve Z ekseninde $\pm 0,05$ mm dir.



Resim.1. Bükümlerin gerçekleştirildiği hidrolik abkant pres.

2.5. Kullanılan Kalıplar

2.5.1. Kullanılan Alt Kalıplar

Bükme işlemlerinde kullanılan alt kalıplar sac malzemenin kalınlığına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Alt kalıplar CK45 malzemeden üretilmiştir ve sertlik değerleri 51/54 HRC dir.

Tablo.5.AISI 304 kalite paslanmaz sacının bükümde kullanılan alt kalıplar.

Malzeme Kalınlığı	Kullanılan Alt Kalıplar
0,8 mm	V10
1 mm	V10
1,5 mm	V12
2 mm	V12
2,5 mm	V12
3 mm	V20
4 mm	V20

2.5.2. Kullanılan Üst Kalıp

Büküm çalışmalarının tümü 3,3 mm uç radyüslü üst kalıpla gerçekleştirilmiştir. Kullanılan üst kalıp CK45 malzemedene üretilmiştir ve sertlik değeri 51/54 HRC dir. Tablo.6' da CK45 çeliğinin kimyasal kompozisyonu verilmiştir.

Tablo.6. CK 45 çeliğinin kimyasal kompozisyonu (ağırlık yüzdesi) (Akıncıoğlu vd. 2021).

Demir (Fe)	Karbon (C)	Silisyum (Si)	Manganez (Mn)	Krom (Cr)	Nikel (Ni)	Fosfor (P)	Kükürt (S)
Diğer	0,47	0,29	0,71	0,18	0,03	0,02	0,04

2.6. Doğrusal İnterpolasyonun Uygulanışı

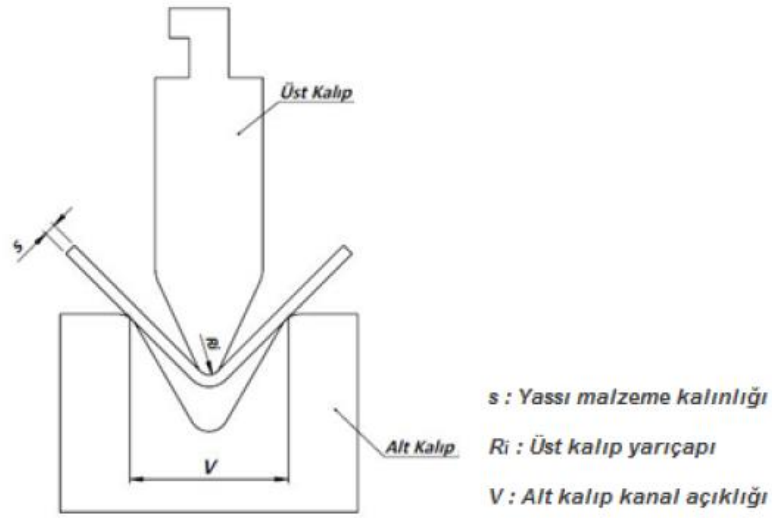
Doğrusal (Lineer) interpolasyon, lineer polinomların kullanılması sayesinde, elde edilen verilerin bilinen noktalardan yeni veri üretilmesine yarayan bir eğri uydurma metodudur. Bilinen iki nokta arasındaki lineer interpolasyon denklemi şu şekilde uygulanabilmektedir;

$$\frac{\text{ilk değişken} - \text{son değişken}}{\text{ara değişken} - \text{son değişken}} = \frac{\text{ilk değer} - \text{son değer}}{\text{ara değer} - \text{son değer}}$$

Burada ilk değişken ve son değişken hangi k-faktörleri arasında ise o değerleri alır. İlk değer ve son değer ise bu iki k-faktörüne göre bükülen sacın büküm sonrası boyunun değerleridir. Ara değer birimi sonuca ulaşmak istediğimiz büküm boyu uzunluğu olan 50 mm değeridir. Ara değişken ise istediğimiz k-faktörüdür.

2.7. Sac Metal Büküm Deneyleri

Bükme deneyleri gerçekleştirilirken savunma sanayinde sıklıkla kullanılan malzemeler esas alınmıştır. Deney numuneleri Tablo.1' de verilen değerlere göre AISI 304 kalite paslanmaz malzeme olarak 4 mm kalınlığa kadar toplam 3 adet olacak şekilde tedarik edilmiştir. Üç farklı k-faktöründen birinde tolerans değerlerine göre uygun bir büküm oluşmuşsa dördüncü olarak doğrulayıcı bir büküm daha yapılmıştır. Eğer üç farklı değerde de uygun bir büküm oluşmamışsa, büküm sonucu değerlerine göre tablodan tahminde bulunarak yeni bir k-faktörü değeri ile açınım alınmıştır. Bu açınım göre numune tedarik edilmiştir. Buna ek olarak ortaya çıkan tüm sonuçların üzerine doğrusal interpolasyon hesaplaması uygulanmış ve en yakın k-faktörünün bulunması hedeflenmiştir. Tahmin edilerek ortaya çıkan k-faktörü değerleri ile doğrusal interpolasyon hesaplamaları sonucu ortaya çıkan k değerleri karşılaştırılmıştır. Deneyler V bükme kalıbında ve kuru ortamda yapılmıştır (Şekil.4).



Şekil.4.Hidrolik abkant preste yapılan bükme işleminin şematik gösterimi.

3. Bulgular

0,275 , 0,35 ve 0,425 k-faktörü kullanılarak oluşan açınım boyutları ile birer adet AISI 304 kalite paslanmaz malzemesi bükümleri gerçekleştirilmiştir. Bu bükümler sonrasında uygun olmayan bükümler için tahmin edilerek öngörülen bir k-faktörü ile açınım alınmış ve bir büküm daha gerçekleştirilmiştir. Bu tahmin, 50 mm değeri hangi aralıkta bekleniyorsa o değerler arasında seçilmiştir. Tüm sonuçlar üzerine doğrusal interpolasyon hesaplaması yapılarak ortaya yeni bir k-faktörü çıkarılmıştır. Bu değerler ile doğrulama bükümü için üçer açınım daha tedarik edilmiştir. Buna göre gerçekleştirilen tüm büküm numunelerin ölçüsünün istenen $50,00 \pm 0,02$ mm aralığında olduğu doğrulanmıştır.

Tablo.7. Üç farklı k-faktörüne göre büküm sonuçları, tahmin edilen k-faktörüne göre büküm sonuçları ve doğrusal interpolasyon hesaplamaları sonucu ortaya çıkan k-faktörü.

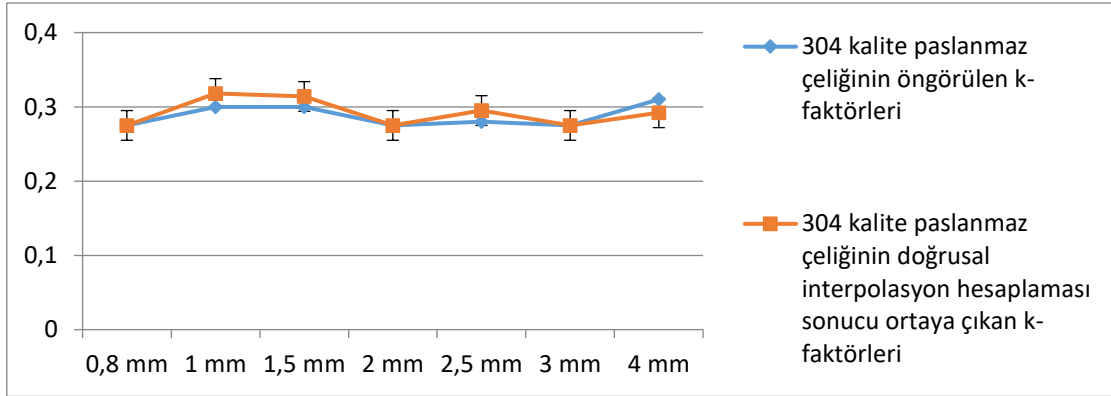
AISI 304 kalite paslanmaz	k: 0,275	k: 0,35	k: 0,425	Tahmin Edilen k	İnterpolasyon ile k
0,8 mm	50,00	50,11	50,19	0,275 = 50,00	0,275
1 mm	49,96	50,03	50,10	0,300 = 49,97	0,318
1,5 mm	49,89	50,10	50,18	0,300 = 49,95	0,314
2 mm	50,00	50,24	50,43	0,275 = 50,00	0,275
2,5 mm	49,97	50,08	50,25	0,280 = 49,98	0,295
3 mm	50,00	50,15	50,32	0,275 = 50,00	0,275
4 mm	49,97	50,10	50,24	0,310 = 50,05	0,292

Tahmin edilen k değeri ile doğrusal interpolasyon hesaplaması ile bulunan k değerlerinin yakın değerler olduğu görülmektedir. Bu durum, AISI 304 malzemeleri için tahmin edilmiş k-faktörlerinin doğru büküm için gerekli olan k-faktörlerine yakın olduğunu göstermektedir. Doğrusal interpolasyon hesaplamasının yapılması hassas bükümlerin gerçekleştirilmesi için gerekli bir çalışmadır. Buradaki hedef, numune bükümlerle doğru ve uygun k-faktörünün aralığını belirlemek ve o aralık için matematiksel yaklaşımda bulunarak sonuca ulaşmaktır. 1,5 mm AISI 304 kalite paslanmaz bükümünü ele alırsak ;

$$\frac{50,10-49,89}{50-49,89} = \frac{0,35-0,275}{x-0,275} \quad (2)$$

denkleminde x değerinin 0,314 olduğu hesaplanmıştır. Buradan çıkan sonuç, 1,5 mm AISI 304 kalite paslanmaz çeliğinin firma bünyesinde doğru k-faktörünün 0,314 olduğudur. Tüm kalınlıktaki numuneler için hesaplamalar aynı şekilde yapılmıştır.

Pekince (2019) yaptığı çalışmada st37-2 bükümleri yaparak bunların k-faktörlerini belirlemiştir. 2 mm için 0,6 , 3 mm için 0,53 , 4 mm için 0,28 , 5 mm için 0,31 ve 6 mm için 0,41 k-faktörü bulunduğunu bildirmiştir. Bulduğu k-faktörlerinin yukarıda oluşturmuş olduğum Tablo.7 ile pek yakın değerlerde olmamasının başlıca nedenleri olarak farklı malzeme cinsi ve kullanılan farklı alt kalıplar olarak gösterilebilir. Pekince çalışmasında 2 mm için V16, 3 mm için V26, 4 mm için V35 alt kalıbını kullanırken benim yapmış olduğum çalışmada AISI 304 kalite paslanmaz çeliği bükümlerinde; 2 mm için V12, 3 mm için V20 ve 4 mm için V20 alt kalıbı kullanılmıştır. Dolayısıyla aynı kalınlıklarda k-faktörü tablosu iki çalışmada farklı alt kalıplar kullanılarak oluşturulmuştur. K-faktörü değerlerinin birbirine yakın olmaması bu nedenle açıklanabilir.

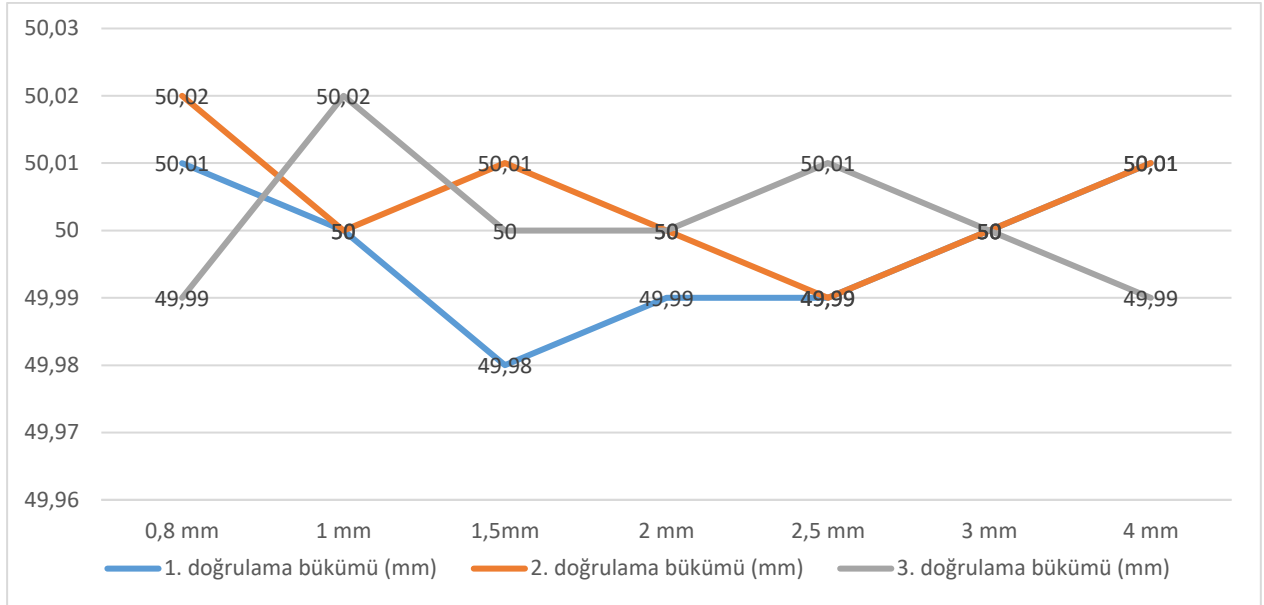


Şekil.5. AISI 304 kalite paslanmaz çeliğinin öngörülen k-faktörleri ve doğrusal interpolasyon hesaplaması sonucu ortaya çıkan k-faktörleri karşılaştırılması.



Şekil.6. 1,5 mm AISI 304 kalite paslanmaz çeliğinin verilen k-faktörlerine göre bükümleri.

AISI 304 kalite paslanmaz çeliğin istenen 50,00 mm ölçüsü 0,8 mm, 2 mm ve 3 mm kalınlıklarında 0,275 k-faktörü değerinde yani başta belirlenen değerlerde bulunduğu için üç adet doğrulama bükümü bu değerlerden gerçekleştirilmiştir. Diğer doğrulama bükümleri ise doğrusal interpolasyon sonucu ortaya çıkan k-faktörleri kullanılarak alınmıştır. Tüm doğrulama bükümleri üçer adet gerçekleştirilip sonuçlar aşağıdaki şekilde gösterilmiştir (Şekil.7). Şekil incelendiğinde tüm bükümlerin 49,98 mm ve 50,02 mm değerleri arasında olduğu görülmektedir. ISO 2768 tolerans tablosuna göre 30 mm ve 120 mm arası bükümlerin f (fine) sınıfı $\pm 0,15$ mm dir. Yapılan bükümlerin bu sınıfa uyması bükümlerin hassas olduğunu göstermektedir.



Şekil.7. AISI 304 kalite paslanmaz çeliğin doğrulama bükümleri sonucu ortaya çıkan değerleri.

4. Sonuçlar

Çalışmalar için öncelikle üç farklı k-faktörü kullanılmıştır. Alınan büküm sonuçlarına göre tahmin edilerek yeni bir k-faktörü belirlenmiş ve açınımı alınarak bükülmüştür. Bunlarla beraber doğrusal interpolasyon hesaplaması kullanılarak bir k-faktörü daha belirlenmiş ve bükülmüştür. Ayrıca doğrusal interpolasyon hesaplaması ile bulunan k-faktörlerinin açınımları için üç adet doğrulama bükümü gerçekleştirilmiştir.

Her büküm makinesinin hassasiyeti farklıdır. Kullanılan alt ve üst kalıbın zamanla aşınmalarını da göz önüne alırsak yapılan çalışmalar sadece firma bünyesinde doğruluk gösterebileceği bilinmelidir. Aynı kalıplar ve aynı büküm makinesi kullanılsa bile, firmalar bakımlarını aynı periyotta yapmayabilir ve kalıp aşınmaları tamamen aynı olmayacağı için k-faktörleri de birbirinden farklı olması beklenmektedir.

Yapılan çalışmadan çıkarılacak sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- Malzemenin açınımı için gerekli olan k-faktörü, kalınlığa bağlı olarak değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir. AISI 304 kalite paslanmaz çeliği için 0,8 mm den 4 mm e kadar bulunan k-faktörü değerleri ortalama 0,275 ile 0,320 değerleri arasında olduğu görülmüştür.
- 0,8 mm, 2 mm ve 3 mm AISI 304 kalite paslanmaz sacının bükümlerinde 0,275 k-faktöründe büküm uzunluğu 50,00 mm olarak ölçülmüştür. Üçer açınım daha alınarak doğrulama bükümü yapılmıştır. Tüm numuneler $50,00 \pm 0,02$ mm aralığında ölçülmüştür.
- 1 mm, 1,5 mm 2,5 mm ve 4 mm AISI 304 kalite paslanmaz sacının bükümlerinde istenen sonuç olan 50,00 mm değeri için k-faktörü değerlerinin 0,275 ve 0,35 değerleri arasında olduğu ve 0,425 değerinden uzak olduğu gözlemlenmiştir.
- Doğrusal interpolasyon hesaplaması ile bulunan k-faktörleriyle üçer adet doğrulama bükümleri $50,00 \pm 0,02$ mm aralığında ölçülmüşlerdir.

Kaynaklar

1. **Akıncıoğlu, S., Öner, G., Yandayan, T. (2021).** CNC işleme merkezlerinde hataların iş esaslı yaklaşımla düzeltilmesi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi 9 (2021);92-103.
2. **Al-Wahab, D. A. & Baştürk, S. (2021).** Experimental investigation of drawbead effect on springback in profile of double circular, rectangular and triangular bending sheet metal forming processes. AURUM Journal of Engineering Systems and Architecture, 5(1), 51-64.
3. **Aydemir, F. (2017).** Abkant preslerde büküm parametrelerinin tespiti. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye.
4. **Basmacı, G. & Sayın, L. (2019).** Bakır sac levhaların "V" bükme yöntemi ile şekillendirilmesiyle oluşan geri esneme miktarının deneysel olarak incelenmesi. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi 11:3 (2019);147-154.
5. **Bozkurt, C. (2018).** Sac büküm işleminde açınım boyu problemlerinin azaltılmasına yönelik araştırma. Yüksek Lisans Tezi, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Bolu, Türkiye.
6. **Çerçi, E. (2021).** Makara ile sac şekillendirme sistemi ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye.
7. **Dilipak, H., Ozdemir, M., Sarıkaya, M. (2013).** Effects of material properties and punch tip radius on spring-forward in 90° V bending processes. Journal of Iron and Steel Research, International, 20;64-69.
8. **Doğdu, M. (2021).** Saclarda değişken faktörlerin doğal frekansa etkisinin karşılaştırılması olarak sonlu elemanlar metoduyla incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye.
9. **Hekim, E. (2014).** Sac bükmede geri yaylanmanın sonlu eleman yöntemi ile incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Hitit Üniversitesi, Çorum, Türkiye.
10. **Işıktaş, A. (2011).** Farklı kalınlıklardaki dkp ve paslanmaz sacların farklı açılarda yapılan V - bükme işlemindeki geri yaylanmalarının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, Türkiye.
11. **Karakaş, M. S., Günen, A., Karakaş, Kurt, B., Çalık, A. (2014).** Corrosion behavior of borided AISI 304 austenitic stainless steel. Anti-Corrosion Methods and Materials, 61(2), 112-119.
12. **Kovacevic, R., Hu, Z., Labudovic, M., Wang, H., (2001).** Computer simulation and experimental investigation of sheet metal bending using laser beam scanning. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 41(4), 589-607.
13. **Küçükdoğan, R. (2022).** Servo caka makinesinin tasarımı ve yapısal optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya, Türkiye.
14. **Lu, J., Mai, S. P., Wen, C. S. (2018).** Surface-modified steel sheets and corrugated panels in three-point bending. International Journal of Mechanical Sciences, 142-143, 10-20.
15. **Malyer, E. & Kayral, S. (2018).** Isıl işlemin AA6061 alüminyum alaşımı sac metal malzemenin şekillendirilmesine etkilerinin incelenmesi. DÜMF Mühendislik Dergisi 9:2 (2018); 741-751.
16. **Pasebani, S., Ghayoor, M., Lee, K., He, Y., Chang, C., Paul, B. K. (2019).** Selective laser melting of 304L stainless steel: role of volumetric energy density on the microstructure, Texture and Mechanical Properties. Additive Manufacturing, 101011.
17. **Pekince, D. (2019).** Sac metal bükümlerinde "k" faktörünün mukavemetsel olarak incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye.
18. **Şekerçi, E.M., Meşeci, E.Y., Düzkaya, E., Örs, D. (2018).** Sac metal şekillendirme ve uygulamaları. Bitirme Çalışması, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.
19. **Şahin, Ç.Ö. (2013).** Sac levhaların V-bükme sonucu geri yaylanma davranışlarının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
20. **Uslu, E. (2014).** Sac malzemelerin bükülmesinde geri yaylanma davranışının araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye.