

C. Soyarslan
Atılım Üniversitesi, Üretim
Mühendisliği Bölümü, 06836,
Ankara, Türkiye
Orta Doğu Teknik Üniversitesi,
İnşaat Mühendisliği Bölümü,
06531, Ankara, Türkiye

A.E. Tekkaya
Atılım Üniversitesi, Üretim
Mühendisliği Bölümü, 06836,
Ankara, Türkiye
Dortmund Üniversitesi, Metal
Şekillendirme Teknolojisi ve
Hafif Yapılar Enstitüsü, 44227,
Dortmund, Almanya

U. Akyüz
Orta Doğu Teknik Üniversitesi,
İnşaat Mühendisliği Bölümü,
06531, Ankara, Türkiye

Soğuk Dövmede Sürekli Ortamlar Hasar Mekaniği (SOHM)

Uygulamaları:

Bölüm II-Ekstrüzyonda v-şeklindeki Merkezi Kırık Oluşumunun Önlenmesi

Çalışmanın bu kısmında, soğuk ileriye çubuk akıtma işleminde görülen merkezi kırıkların, uygun işlem parametrelerinin belirlenmesi ile önlenmesine yönelik, SOHM'ne dayanan sayısal çalışmalara yer verilmiştir. Kırık kapanma katsayısı, pekleşme üstel fonksiyon katsayısı, sürtünme, kalıp açısı ve alan indirim oranı, uygulanan ters basınç değeri gibi parametrelerin merkezi hasar birikimine tesiri, kapsamlı bir biçimde incelenmiştir. Gösterilmiştir ki, kalıp açısı-alan indirim oranı uzayını tarayan bir grup sayısal analizle, işlemin hatasız gerçekleşeceği sınır geometri değerlerinin ekonomik olarak temini mümkündür. Önerilen sayısal yöntemin çekici yönlerinden biri de, farklı işlem koşullarını aynı sistematik içerisinde kapsayabilecek genellikte olmasıdır. Buna örnek olarak işlem tasarımına eklenen ters basınç uygulamalarının hasar birikimine etkisi sayısal olarak modellenmiş, uygun karşı basınç değerlerinde iç kırıkların engellenebileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İleriye çubuk akıtma, Sürekli Ortamlar Hasar Mekaniği, Sonlu elemanlar, V-şeklindeki Kırıklar

1. GİRİŞ

Ekstrüzyonda v-şeklindeki merkezi kırıklara ait oluşum mekanizması, bu çalışmanın birinci kısmında, sürekli ortamlar hasar mekaniği yaklaşımı ile çözümlenmiş ve geliştirilen matematiksel model 100Cr6 çeliğinin tek basamaklı ekstrüzyonunda meydana gelen iç çatlakların benzetiminde başarı ile kullanılmıştır. Çalışmanın ikinci kısmını teşkil eden bu makalede, ekstrüzyonda v-şeklindeki merkezi kırıkların önlenmesine yönelik sayısal çalışmalara yer verilmiştir. Çalışmanın temel motivasyonunu, halihazırda üretim sektöründe pratik bir araç olarak kullanılan ve Zimerman ve Avitzur'un, [1,2], çalışmalarına dayanan, alan indirgeme oranı ve konik kalıp açısı düzleminde ifade edilen kırıksız ekstrüzyon eğrilerinin yetersizliği oluşturmaktadır. Bu eğriler işlevsel de olsalar, çözümlenmeleri üst sınır teoremine dayanmakta ve farklı işlem parametrelerindeki olası değişiklikleri göz ardı etmektedirler. Oysa ki, halihazırdaki çalışmanın merkezini teşkil eden sürekli ortamlar hasar mekaniği kullanılarak, transfer edilebilir uygun malzeme parametrelerinin teminini takiben, gerçekleştirilecek sayısal çözümlenmelerle birçok parametrenin işlem

üzerindeki etkisi ekonomik ve güvenilir olarak incelenebilir. Etkisi incelenecek parametreler, alan indirme oranı, $[1 - (d_0 / d_1)^2]$, kalıp açısı, α , kalıp-işlem parçası arayüzü sürtünmesi, işlem sıcaklığı, malzeme sünekliği ile sınırlı kalmamakta, konik kalıp harici kalıpların kullanımı ve iş parçası ucuna ters basınç uygulamaları gibi işlem varyantlarının merkezi hasar birikimine tesirleri de aynı sistematik içerisinde kolaylıkla çözümlenebilmektedir.

Çalışmanın takip eden bölümünde, malzeme sünekliği, kırık kapanma katsayısı gibi malzeme parametrelerinin yanı sıra iş parçası-kalıp sürtünmesinin hasar dağılımı ve kırık oluşumuna etkisi incelenmiştir. Ayrıca, alan indirme oranı-konik kalıp açısı düzleminde kırıklı ve kırıksız alanları ayıran, Avitzur ve Zimerman eğrilerine benzer bir eğrinin sayısal olarak temin edilmesine yer verilmiştir. Takip eden bölümde, işlem tasarımının, geometri değiştirilmeksizin, ters basınç uygulaması ile, merkezi hasar birikimini azaltacak ve merkezi kırıkların oluşumunu engelleyecek şekilde geliştirilebileceğine dair sayısal bulgular

sunulmuştur. Son olarak, sonuç bölümünde çalışma ve değerlendirmeler özetlenmiştir.

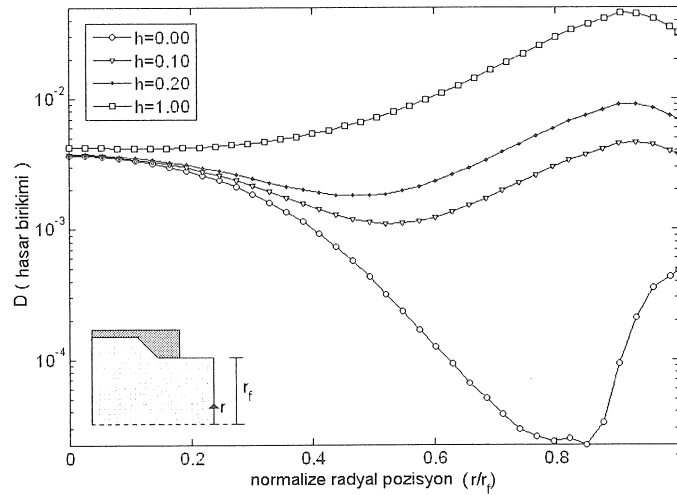
Uygulamaların bütününde sunulan benzetimlerde kullanılan malzeme parametreleri, işlem geometrisi ve sonlu elemanlar modeline ait detaylar, aksi belirtilmedikçe, bu çalışmanın ilk kısmını teşkil eden makaledekilerle aynıdır.

2. FARKLI İŞLEM PARAMETRELERİNİN HASARA ETKİSİ

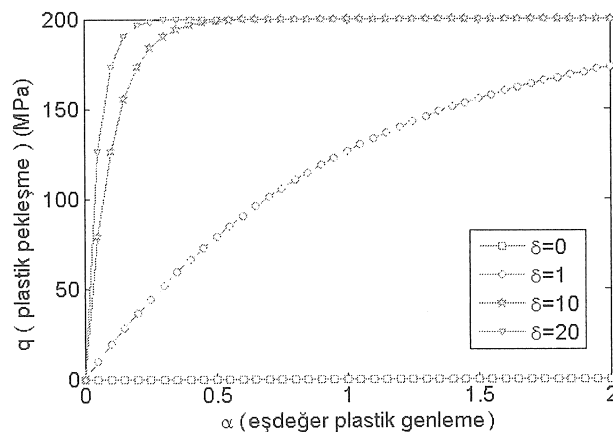
İlk olarak, kırık kapanma parametresinin hasar birikimine olan etkisini ölçmek adına 0.4 mm'lik elemanlardan oluşan bir ağ için sürtünmesiz yüzey koşullarında $h = 0$, $h = 0.1$, $h = 0.2$ ve $h = 1$ için bir grup analiz yapılmıştır. Elde edilen hasar birikimlerinin durağan değerlerine ait radyal dağılım eğrileri logaritmik eksenle Şekil 1'de verilmektedir. Bu benzetimlerde, hasar parametresi, $a = 0.003$, olarak kullanılmıştır, ki bir önceki

analiz değerlerine göre hasar birikimleri oldukça aşağı çekilmiştir. İleriye çubuk akıtmada, kırık kapanma parametresinin etkisinin baskınlığı burada açığa çıkmaktadır. Kırık kapanma parametresinin 0 alındığı koşulda merkezi hasar değeri baskın gelirken, bu değer 1 olduğu durumda yüzey hasar birikimi daha yüksektir. Oluşabilecek muhtelif kırık bölgeleri açısından değerlendirildiğinde, bu iki koşulun sırası ile merkezi ve yüzeysel kırıklara tekabül edeceği açıktır.

Malzemenin pekleşme trendinin hasar oluşumuna etkisini gözlemek adına, izotrop pekleşmeli plastisite fonksiyonu için kısmen basitleştirilmiş, doğrusal pekleşmesiz bir üssel doyma fonksiyonu varsayılmıştır. Akma gerilmesi 750 MPa ve doyma gerilmesi ise 950 MPa olarak alınmıştır. Farklı doyma üssel parametreleri, farklı hızlarda plastik pekleşme sağlamaktadır ve kullanılan parametrelere karşı oluşan pekleşme eğrileri Şekil 2'de verilmektedir.



Şekil 1: Kırık kapanma parametresinin radyal hasar dağılımına etkisi, $\mu = 0$.

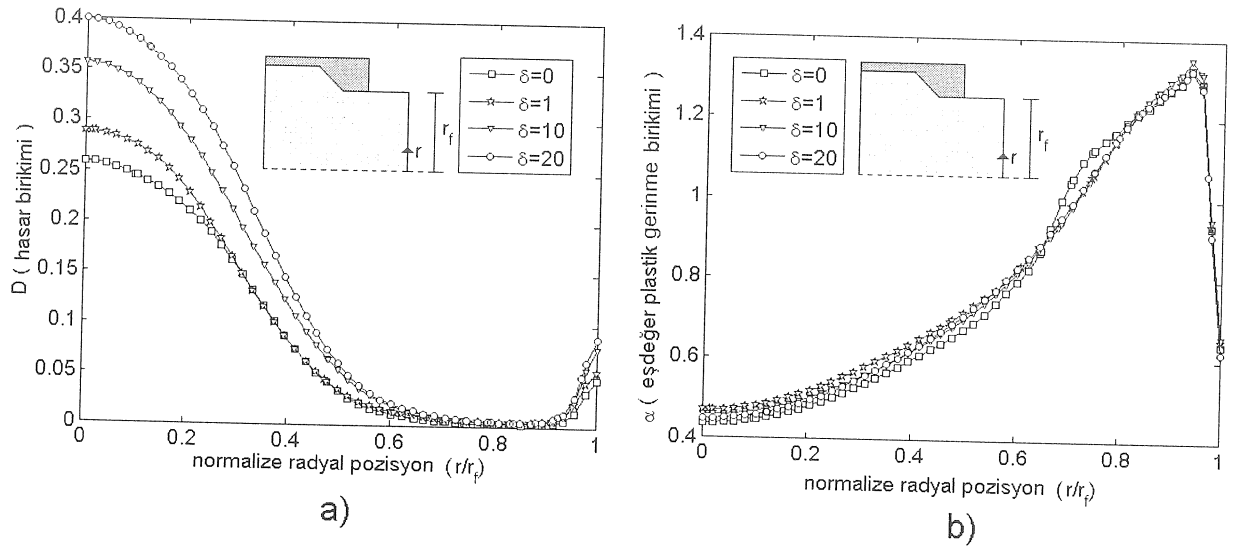


Şekil 2: Farklı malzeme parametreleri için pekleşme dağılımları.

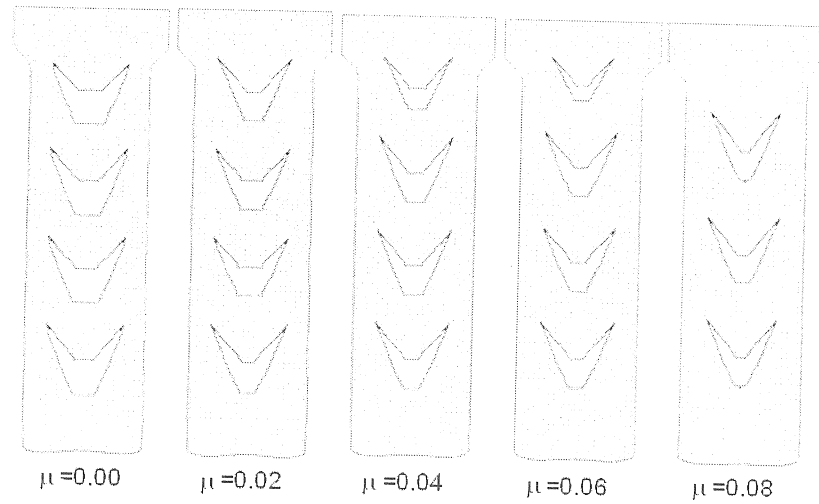
Bu pekleşme eğrileri için, sürtünmesiz koşullarda elde edilen, Şekil 3.a ve b'de verilen radyal hasar ve eşdeğer plastik gerinme dağılımları incelendiğinde görülmektedir ki, durağan eşdeğer plastik gerinme değerleri arasındaki fark az da olsa, hasar birikimleri arasında ciddi farklar mevcuttur. Buna göre hızla doyma gerilmesine ulaşan malzemelerde merkezi hasar birikimi daha fazla olmaktadır. Bunun nedeni yüzey ve merkezde meydana gelen akma ve akmaya direnme koşulları ile oluşan gerilme dağılımlarıdır.

İş parçası-kalıp arası sürtünme ilişkisinin hasar birikimine ve kırık morfolojisine etkisini

incelemek adına $\mu = 0$, $\mu = 0.02$, $\mu = 0.04$, $\mu = 0.06$ ve $\mu = 0.08$ için bir grup analiz yapılmıştır. Sonuçta elde edilen kırık dağılımları Şekil 4'te verilmektedir. Görüldüğü gibi düşük sürtünme değerlerinde daha sık ve geniş kırıklar elde edilirken, yüksek sürtünme değerlerinde hem daha seyrek hem de daha küçük kırıklar oluşmaktadır. Bunun nedeni hasar birikiminin sürtünme ile birlikte kısmen de olsa merkezden yüzeye taşınması ve merkezi etkinliğinin azalmasıdır.



Şekil 3: Farklı pekleşme katsayıları için radyal dahili değişken dağılımları, a) hasar, b) eşdeğer plastik gerinme, $\mu = 0$.



Şekil 4: Farklı sürtünme katsayıları için elde edilmiş kırık morfolojileri.

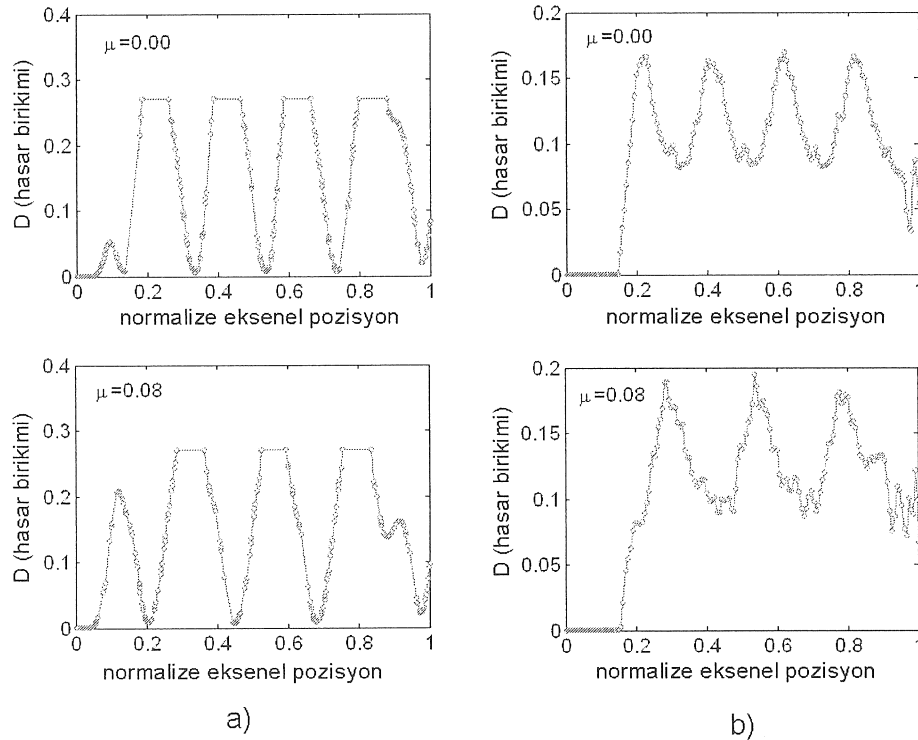
Kırık dağılımları verilen iki uç sürtünme durumu için eksen boyunca oluşan merkezi ve yüzeyel hasar dağılımları sırası ile Şekil 5.a ve b'de verilmektedir. Görüldüğü gibi merkezi hasar değerleri kırık oluşumunda esas alınan kritik hasar değeri olan $D_{cr} = 0.27$ değeri ile sınırlıdır ve hasar dağılımı dalgali bir yapıya sahiptir. Serbest kırık yüzeyinde kritik hasar değerine ulaşan merkezi hasar birikimi bir sonraki kırık oluşumuna kadar, önce azalmakta ve sonra uygun mekanik alanların sağlanması ile tekrar artmaktadır. Şekil 5.b'de verilen yüzey hasar birikimlerine bakıldığında, bu birikimlerde de dalgalanma frekansının kırık frekansı ile örtüştüğü ve sürtünmeli koşullarda yüzeydeki birikimin sürtünmesiz koşullara nazaran daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Buna göre sürtünme ile merkezi hasar birikiminin bir kısmı yüzeye taşınmakta, bu da kırık frekansını etkilemektedir.

İşlem geometrilerinin hasar birikimi ve kırık oluşumuna etkisini araştırmak adına, malzeme parametreleri aynı kalmak koşulu ile bir grup kalıp açısı ve alan indirgeme oranı için benzetimler gerçekleştirilmiştir. Buna göre Şekil 6.a'da da gösterildiği gibi, minimum merkezi hasarın sağlandığı en güvenli kombinasyon, düşük kalıp açıları ile yüksek alan indirimlerinin kullanıldığı kombinasyon olarak görülmektedir. Gözlenmektedir ki, kırık oluşturan benzetimler, yüksek alan indirimi ile yüksek kalıp açıları arasında gerçekleşmektedir.

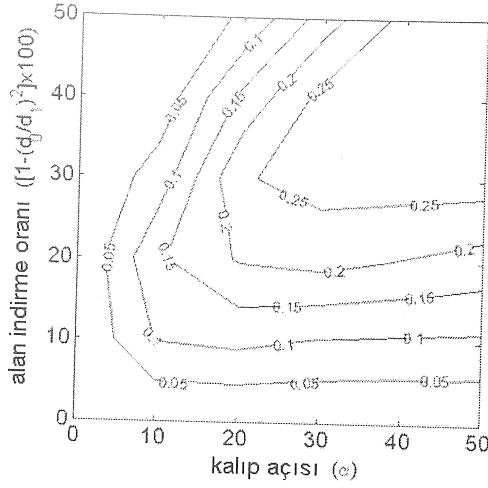
Değilmelidir ki, bu benzetimler sürtünmesiz koşullarda gerçekleştirilmiştir.

3. EKSTRUZYONDA TERS BASINÇ UYGULAMASININ HASARA ETKİSİ

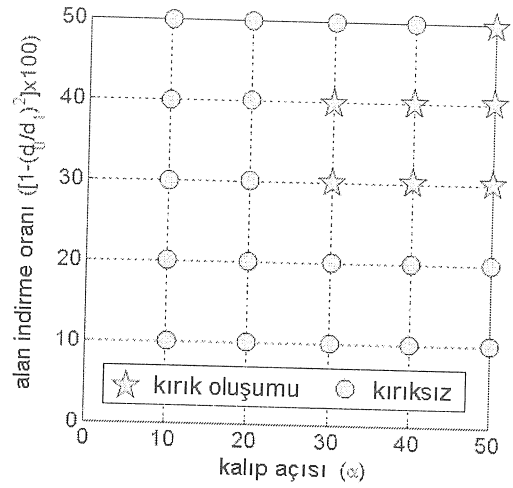
Çalışmanın birinci kısmında da gösterildiği gibi, ekstrüzyon işleminde kırıkların önlenmesinde temel amaç plastik şekillendirme bölgesinde oluşan hidrostatik gerilmelerin basma yönünde kalmasını sağlamak olduğundan, bunun sağlanması adına işlem parçasının kalıba sürülen ön ucundan ters basınç uygulanabilir. Wagener ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, uygulanan ters basıncın, merkezi hidrostatik gerilme değerlerini kabul edilebilir sınırlarda tutarak malzeme şekillenebilirliğini artırdığını göstermiştir, öyle ki bu uygulama sayesinde, oldukça gevrek davrandığı bilinen SiC parçalı ve alüminyum alaşımlı matrise sahip MMC'lerin bile, düşük karbonlu çelikler gibi, oldukça rahat şekillenebildiği gözlenmiştir, [3, 4, 5]. Ayrıca uygulanan ters basınç sayesinde, kalıp çıkış bölgesinde oluşan artık gerilmeler azalmakta ve daha homojen plastik gerilmeler elde edilmektedir. Bu avantajlarına rağmen ters basınç uygulaması çeşitli sınırlamalara tabidir. Bu sınırlamaların başında ters basıncın ileri zımba kuvveti ihtiyacını artırması nedeni ile uygulanabilir zımba kuvveti, zımba ve kalıp dayanımları gelmektedir.



Şekil 5: Farklı sürtünme katsayıları için elde edilmiş aksel hasar dağılımları, a) merkez, b) yüzey.



a)



b)

Şekil 6: a) Maksimum merkezi hasarı gösteren eş-hasar eğrileri, b) Kırıklı ve kırksız benzetim dağılımları, $\mu = 0$.

Bu motivasyonla, Wagener'in deneysel olarak incelediği ters basınçla hasar önlenmesi için sayısal bir çözümün ne önerdiği incelenmiştir. Şekil 7'de görüldüğü gibi, ters basınç etkisi, basit bir yaklaşımla, işlem parçasının uç kısmının yüzeyine, zımba kuvvetinin aksi yönünde basınç uygulaması ile modellenmiştir ve bir grup benzetim gerçekleştirilmiştir.

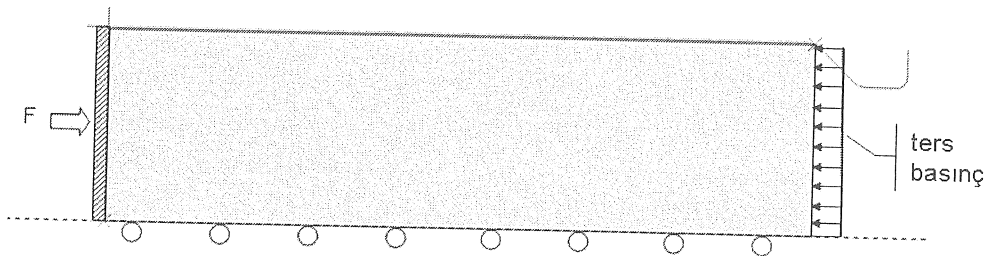
Şekil 8'de sürtünmeli ve sürtünmesiz koşullarda farklı ters basınç değerleri için ölçülen radyal hasar değerleri verilmektedir. Beklendiği gibi, ters basınç uygulaması ile birlikte merkezi ve yüzeyel hasar birikiminde hatırı sayılır bir azalma gözlemlenmiştir. Görülmektedir ki sürtünmeli koşullarda merkez hasar değeri daha düşük olmakta, yüzeyde ise sürtünmesiz koşullara nazaran bir artış gerçekleşmektedir. Bu, Şekil 5'te verilmekte olan eksen boyunca merkez ve yüzeyde oluşan hasar dağılımları ile uyumlu bir bulgudur.

Şekil 9'da, bir grup karşı basınç değeri için, sürtünmesiz koşullarda oluşturulmuş benzetim sonuçları gösterilmektedir. Benzetimler göstermektedir ki, karşı basıncın yükselen

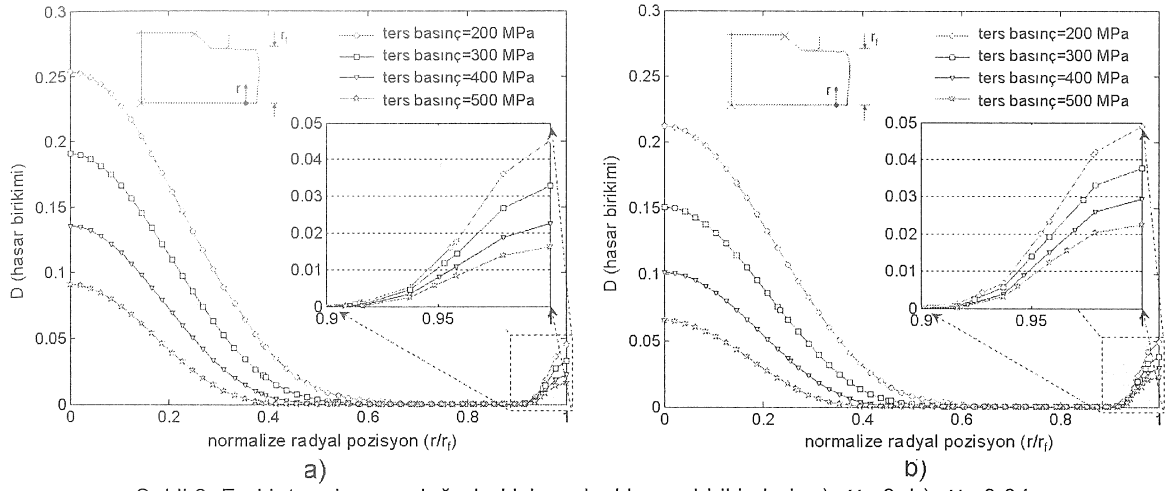
değerlerinde oluşan kırıklarda gözle görülebilir bir azalma ve nihayetinde tamamen yok olma gözlemlenmektedir.

Daha önce de belirtildiği gibi, kırık oluşumunun engellenmesi her ne kadar karşı basınç ile mümkün görülsede, karşı basınç uygulaması çeşitli kısıtlamalara tabidir. Bu kısıtlamaların başında zımba ile uygulanabilecek kuvvet gelmektedir. Takdir edilir ki karşı basınç sisteminin zımba kuvveti talebinde artışa neden olur. Bu artışı gözlemlemek adına, Şekil 10'da verilen, farklı ters basınç değerleri için, sürtünmesiz koşullarda elde edilen zımba kuvveti-normalize işlem zamanı eğrileri oluşturulmuştur. Beklendiği gibi kırksız bir analizin sağlanması adına ters basınç uygulaması, zımba kuvveti talebini yaklaşık olarak %30 artırmıştır. Şekil 9'da dikkat çeken bir unsur da, kırıkların küçülmesi ve nihayet yok olması ile eğrilerde oluşan dalgalanmalara ait genliklerin de sönümlenmesidir.

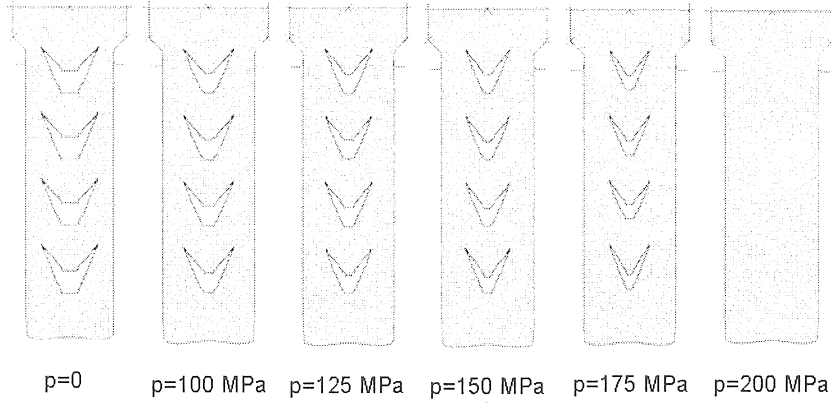
Dikkat edilmesi gereken bir husus da, zımba kuvvetindeki artışın getirdiği ek gerilmelerin kalıp ve zımba dayanımlarını aşmaması gerekliliğidir.



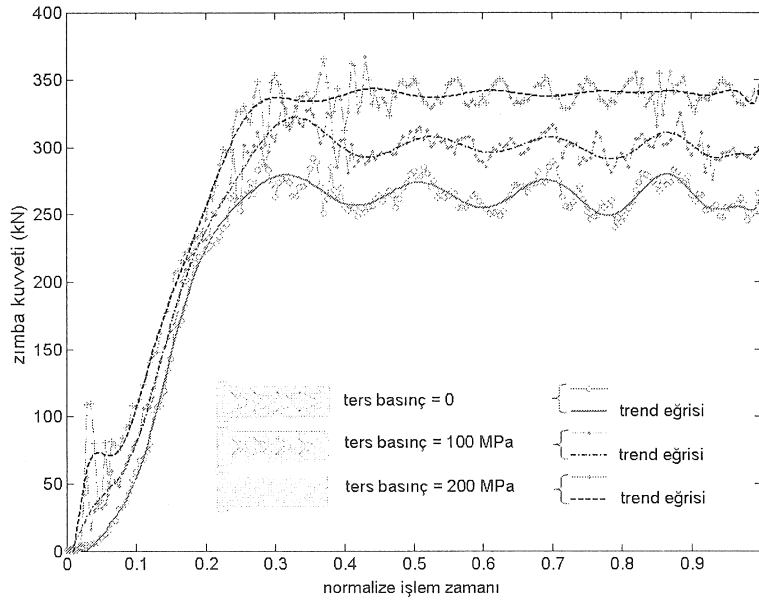
Şekil 7: Ekstrüzyonda ters basınç uygulamasının modellenmesi.



Şekil 8: Farklı ters basınç değerleri için radyal hasar birikimleri, a) $\mu=0$, b) $\mu=0.04$.



Şekil 9: Farklı ters basınç değerleri için elde edilmiş kırık morfolojileri, $\mu=0$.

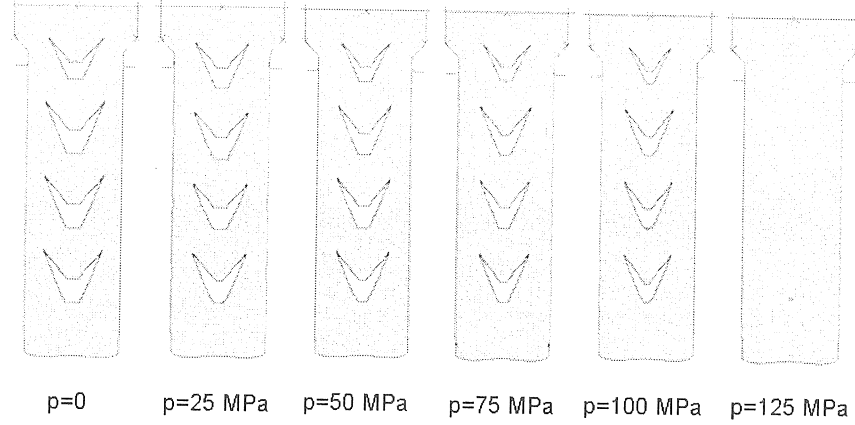


Şekil 10: Farklı ters basınç değerleri için elde edilmiş zımba kuvveti-normalize işlem zamanı eğrileri, $\mu=0$.

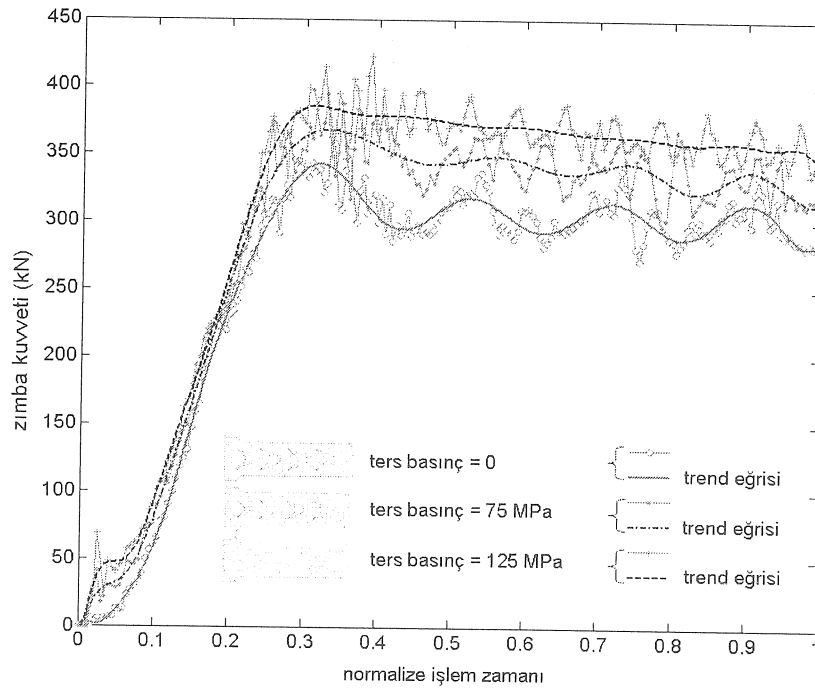
Aynı benzetimlerin, Şekil 11'de verilen, sürtünmeli koşullarda gerçekleştirilenleri incelenirse, kırık sağaltımının çok daha düşük karşı basınç değerlerinde gerçekleştiği gözlenir. Bu durum, hem sürtünmenin önceden açıklanmış merkezi hasarı azaltan yapısı ile, hem de sürtünme ile oluşan ek karşı basınç oluşumu ile açıklanabilir.

Şekil 12'de farklı ters basınç değerleri için, sürtünmeli koşullarda elde edilen zımba kuvveti-

normalize işlem zamanı eğrileri oluşturulmuştur. Sürtünmesiz koşullar için Şekil 10'da verilen eğrilerin aksine, ekstrüzyon işlemi boyunca, sürtünen yüzeyde meydana gelen azalma ile zamanla zımba kuvveti talebi düşmektedir. Yine de ters basınç uygulaması zımba kuvveti talebini artırmıştır. Şekil 9'da gözlemlendiği gibi, kırıkların küçülmesi ve nihayet yok olması ile eğrilerde oluşan dalgalanmalara ait genlikler sönümlenmektedir.



Şekil 11: Farklı ters basınç değerleri için elde edilmiş kırık morfolojileri, $\mu = 0.04$.



Şekil 12: Farklı ters basınç değerleri için elde edilmiş zımba kuvveti-normalize işlem zamanı eğrileri, $\mu = 0.04$.

4. SONUÇ

İleriye çubuk akıtma işleminde oluşan merkezi hasar birikimi, kırık oluşumu, ve çeşitli işlem parametrelerinin bu oluşumlara etkisi üzerine kapsamlı bir çalışma sunulmuştur. Bir malzeme parametresi olarak belirlenen kırık kapanma parametresinin, hasarın merkezi ya da yüzeysel karakteri üzerinde son derece etkin olduğu gösterilmiştir. Seçilen işlem geometrisi için, hızlı doyma gerilmesine erişen malzemelerde, ekstrüzyonda merkezi hasar birikimlerinin yavaş erişenlere nazaran daha fazla olduğu gözlenmiştir. Gösterilmiştir ki merkezi hasar birikimi sürtünmenin artırımı ve karşı basınç uygulaması ile azaltılabilmektedir. Alan indirme oranı-kalıp açısı düzleminde yapılacak tekrarlı analizler vasıtası ile çeşitli malzemeler için literatürde görülenlere benzer kırıksız numune temin eğrileri çizilebilir. Elde edilen eğrilerde, alan indiriminin çok olup kalıp açısının az olduğu durumlar en az merkezi hasar birikimi görülen durumlar olarak belirlenmiştir. Görülmektedir ki, önerilen sayısal yöntem, farklı işlem koşullarını aynı sistematik içerisinde kapsayabilecek genelliktir.

CONTINUUM DAMAGE MECHANICS (CDM) APPLICATIONS IN COLD FORMING: PART II-PREVENTING CHEVRON CRACK FORMATION IN EXTRUSION

In this part of the manuscript, numerical studies based on CDM for prevention of central crack formations seen in cold forward extrusion with selection of appropriate process parameters. An in depth investigation of the effect of certain parameters such as, crack closure parameter, hardening exponent, friction, die angle, area reduction ratio and applied counter-pressure, on central damage accumulation is conducted. It is shown that, with a set of numerical analysis scanning the die angle-area reduction ratio space, economical production of the limiting values for the geometries for a defect-free product is possible. Another tempting part of the proposed numerical method is its generality to cover different process conditions in a single systematic. As an example, the effect of the counter pressure added to the process design, on the damage accumulation is numerically modeled and it is shown cracks can be suppressed under proper counter pressure values.

Keywords: Forward extrusion, Continuum Damage Mechanics, Finite Elements, Chevron cracks

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, MISAG JULICH 04 kodu ile, TÜBİTAK ile Almanya Jülich Araştırma Merkezi Arasındaki İşbirliği Çerçevesinde Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar bu desteğe teşekkür ederler.

KAYNAKÇA

1. Avitzur, B.: *Analysis of central bursting defects in extrusion and wire drawing*, J. Mech. Phys. Solids, 1968, 90, 79-91.
2. Zimerman, Z., Avitzur, B.: *Analysis of central bursting defects in extrusion and wire drawing*, 1970, J. Eng. Ind. 90, 135-145.
3. Wagener, H. W., Haats, J., Wolf, J.: *Increase of workability of brittle materials by cold extrusion*. *Journal of Materials Processing Technology*, 32, 1992, pp. 451-460.
4. Wagener, H. W., Wolf, J.: *Cold forging of MMCs of aluminium alloy matrix*. *Journal of Materials Processing Technology*, 37, 1993, pp. 253-265.
5. Wagener, H. W., Haats, J.: *Crack prevention and increase of workability of brittle materials by cold extrusion*, in: *Material Processing Defects*, Elsevier Science B. V., 1995, pp. 373-385.