



## The effect of mold release agents used in injection on environmental stress cracking behavior of polycarbonates

Mustafa Şengül<sup>1\*</sup>, Hacı Abdullah Taşdemir<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ASELSAN A.Ş., Communication & Information Technologies, 06200, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty Engineering, Istanbul Technical University, 34437, İstanbul, Türkiye

### Highlights:

- Investigation of environmental stress crack mechanism
- Environmental stress crack propagation tests and results in polycarbonate materials
- The effect of mold release agents on the environmental stress crack mechanism

### Keywords:

- Plastics failures,
- polycarbonate plastic,
- environmental stress cracking,
- mold release agents,
- plastic injection

### Article Info:

Research Article

Received: 04.06.2021

Accepted: 06.02.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.947761

### Correspondence:

Author: Mustafa Şengül

e-mail:

sengulm17@itu.edu.tr

phone: +90 507 027 8399

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, when plastic parts meet chemical agents such as molding release agents cause the Environmental Stress Cracking. In Figure A. There are results of the plastic parts after Three-point bending and The Environmental Stress Cracking Resistance tests. Cracks from Microscopic images and load decreasing levels are observed clearly.

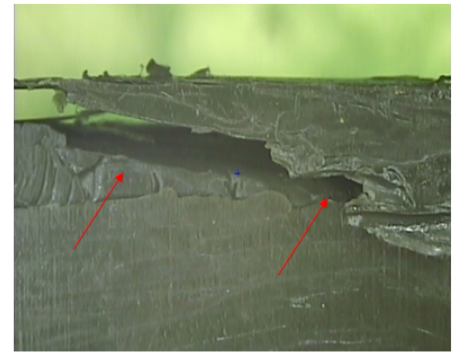
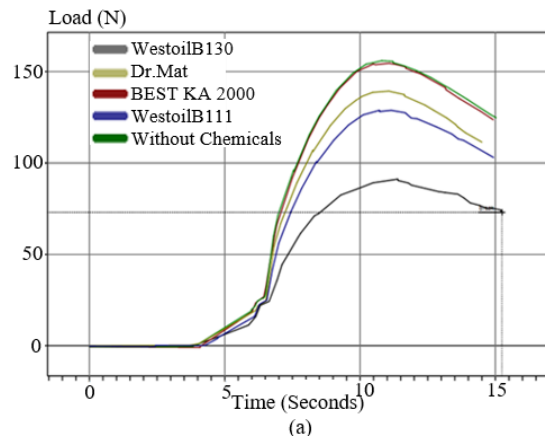


Figure A. a) Three-point bending test for 6013 with %1.5 strain b) Microscopic images of LEXAN 6013 surfaces with Westoil B130, and cracks are observed clearly

**Purpose:** In this study, the effect of mold release agent on the Environmental Stress Cracking (ESC) of plastics under injection molding application has been investigated for crack and craze initiation.

**Theory and Methods:** When plastic parts meet chemical agents and other main reasons for the plastic failure have Environmental Stress Cracking is stresses which is caused by a molding process as residual stresses and mechanical stresses have been questioned. Moreover, molding release agents which are selected for questioning that cause environmental stress cracking as a chemical agent. Observation depends on test equipment which is designed according to strain levels. Consequently, The Environmental Stress Cracking Resistance test results show that whether the different materials and chemical agents affect the test results or not.

**Results:** The test results are given which have Environmental Stress Cracking Resistance (ESCR), microscopic images, and three-point bending test results. It shows all polycarbonate resin types are affected by at least one molding release agents as a stress cracking agent. Environmental stress cracking is the main failure for plastic injection parts as the plastic killer and chemical agents such as mold release agent is a factor for increasing crazes grow more rapidly.

**Conclusion:** Materials are more effected with constant strain and chemical agents. Even the material by using molding release agents as chemical agents is passed the ESCR test, molding release agent defect the material, craze initiations, and surface pores and, decreasing maximum load that material takes. Molding release agents should not be used without considering all parameters, material types, and conditions.



## Enjeksiyon kalıplama yönteminde kullanılan kimyasal kalıp ayırıcıların polikarbonat malzemelerde çevresel gerilme çatlakları ilerlemesine etkisi

Mustafa Şengül<sup>1\*</sup>, Hacı Abdullah Taşdemir<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ASELSAN A.Ş., Haberleşme ve Bilgi Teknolojileri Sektör Başkanlığı, 06200, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 34437, İstanbul, Türkiye

### ÖNEÇİK A N L A R

- Çevresel gerilme çatlakları mekanizması incelenmesi
- Polikarbonat malzemelerde çevresel gerilme çatlakları ilerlemesi testleri ve sonuçları
- Kalıp ayırıcılarının çevresel gerilme çatlakları mekanizmasına etkisi

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi  
Geliş: 04.06.2021  
Kabul: 06.02.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.947761

### Anahtar Kelimeler:

Plastiklerde kırılma mekanizmaları, polikarbonat plastik, çevresel gerilme çatlakları, kalıp ayırıcıları, plastik enjeksiyon

### ÖZ

Polikarbonatlar, termoplastik malzemeler olarak metalik malzemelerle karşılaştırıldığında darbe direncinin yüksek olması, daha ekonomik, hafif ve uzun ömürlü oluşları nedeniyle birçok endüstri alanında yaygınlaşmıştır. Ancak bazı koşullar altında çatlak ilerlemesi ve çevresel gerilme çatlakları gibi kusurlar termoplastiklerde gözükmemektedir. Plastik parçalara uygulanan gerilmeler, üretim esnasında oluşan iç gerilmeler ve kimyasal kontaminasyon gibi çevresel etmenlerin birleşimi ile çevresel gerilme çatlakları oluşmaktadır. Bu konuda firmalar ve ilgili araştırma merkezleri üretilen malzemelerin çevresel gerilme çatlakları için çeşitli test metotları kullanmaktadır. Bunlara sabit gerilme tabanlı testler ekonomik açıdan daha çok tercih edilmektedir. Çeşitli çevresel durumlar altında tercih edilen plastik malzemenin davranışları ve mekanik, fiziksel özellikleri incelenerek proseslerde ilerlenmektedir. Bu çalışmada ise üretim alanında plastik enjeksiyon prosesinde, seri üretime bağlı olarak yoğun şekilde kullanılabilen kimyasal kalıp ayırıcılarının çevresel gerilme çatlaklarına bağlı olarak plastikler üzerindeki verdiği hasarlar, çeşitli testler ve incelemelerle gözlemlenmeye çalışılmıştır. Çeşitli polikarbonatların plastik enjeksiyonu sırasında sanayide yoğun şekilde kullanılan kalıp ayırıcıların kullanılması ile deneyler yapılmıştır. Test düzenekleri sabit gerilme ile tasarlanıp test parçalarında testler uygulanmış ve daha sonra mikroskop altında çatlak oluşumu ve kimyasal kontaminasyona bağlı yüzeysel kusurların incelenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca mekanik ve fiziksel özelliklerin değişik test koşulları altındaki durumları gözlemlenmiştir. Üç nokta eğme deneyleri ile malzemelere yüklenebilecek en yüksek değerlerdeki değişim karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

## The effect of mold release agents used in injection on environmental stress cracking behavior of polycarbonates

### H I G H L I G H T S

- Investigation of environmental stress crack mechanism
- Environmental stress crack propagation tests and results in polycarbonate materials
- The effect of mold release agents on the environmental stress crack mechanism

### Article Info

Research Article  
Received: 04.06.2021  
Accepted: 06.02.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.947761

### Keywords:

Plastics failures, polycarbonate plastic, environmental stress cracking, mold release agents, plastic injection

### ABSTRACT

In this study, the effect of mold release agent on the Environmental Stress Cracking (ESC), of plastics under injection molding application has been investigated for crack and craze initiation. Recently, polycarbonate which is used as a polymer in this study has attracted great attention due to its advantages such as high durability, impact resistance, and is more economical. During the plastic injection production process, plastics parts experience failure due to severe causes. ESC, which occurs when metallurgical, environmental, and mechanical conditions are combined. Furthermore, a plastic resin is degraded by a chemical agent in the presence of stress. So, the effects of the chemical agent and mechanical stresses cause cracking after some time. It has been determined how chemical agents' consequences critical plastic component failure. Moreover, contamination of chemical agents is an accelerating agent to plastic parts considering ESC mechanism. Molding release agents are selected for questioning as a chemical agent because they are used widely in the industries. Plastic parts that have different mechanical properties are manufactured while using different molding release agents, and craze initiation and propagation stages have been observed experimentally. Therefore, considering ESC, some chemical agents is a factor of increasing crazes to grow more rapidly.

## 1. Giriş (Introduction)

Yapılarında karbonat grubu bulunduran termoplastik polimerlere polikarbonatlar denilmektedir. Mühendislik ve endüstriyel uygulamalardaki kullanım alanları hızla artmakta olan polikarbonatlar, klasik mühendislik malzemesi olan metallerle karşılaştırıldıklarında yüksek dayanıklılıkları, yüksek darbe dirençleri, saydamlıkları, ultraviyole ışığa karşı dirençleri, yangına karşı dayanıklı olmaları, ekonomik olmaları, hafiflikleri ve uzun ömürlü olmaları ile öne çıkmaktadırlar [1]. Boyutsal kararlılıklarını ve çoğu mekanik özelliklerini 100°C'nin üzerinde veya 0°C'nin altında da gösterilmekte olan polikarbonatlar otomotiv uygulamaları, elektronik cihazlar, inşaat/yapı uygulamaları, optik /aydınlatma uygulamaları ve medikal aletlerin paketlemelerinde sıklıkla kullanılmaktadırlar [2]. Enjeksiyon kalıplama yöntemi ile kolaylıkla şekil verilebilen polikarbonatlar, termoform, ekstrüzyon ve şişirme kalıplama yöntemleri gibi üretim metodlarıyla da şekillendirile bilmektedirler [3].

Birçok üstün mekanik özelliklerine rağmen polikarbonat malzemeler bir sıvı veya buhar ortamına maruz kaldıklarında çok düşük bir mekanik çekme gerilmesi altında dahi olsalar kendiliğinden çatlayabilir veya kırılabilirler. Malzeme ömrünü önemli derecede azaltan bu olguya çevresel gerilme çatlaması (ÇGÇ) ismi verilmektedir. Kullanımda olan polikarbonat malzemelerde en sık görülen arızalanma nedeni, yaklaşık olarak %25 oranında, çevresel gerilme çatlaması olarak bilinmektedir. Polikarbonattan üretilen parçaların yüksek genişleme gerilmesi bölgelerine sıvı veya buharın difüzyonu neticesinde yerel olarak plastikleşmenin gerçekleşmesi çevresel kırılma çatlamasını meydana getiren temel mekanizma olarak bilinmektedir [4, 5]. ÇGÇ için ilk aşama sıvı veya buhar moleküllerinin polikarbonat yüzeye tutunması ve devamında da malzemenin iç bölgelerine difüzyonu olarak başlar. Polikarbonat içerisindeki boşluklar micro düzeyde gerilme yığılma bölgeleri oluştururlar. Dolayısıyla, malzemeye etki eden çok düşük bir miktardaki mekanik gerilme bu boşluk bölgelerinde micro düzeyde plastikleşmeye ve kılcal çatlakların oluşmasına neden olur. Oluşan kılcal çatlaklar zamanla yeni gerilme yığılma bölgeleri oluşturarak plastikleşmenin ilerlemesine ve derin çatlakların oluşmasına sebep olarak polikarbonat malzemelerin hasara uğrattırır [6].

Çevresel gerilme çatlaması yavaş ilerleyen kırılğan bir hasar türüdür [7]. Polikarbonat bir malzemenin çevresel gerilme çatlamasına uğraması için iki temel etken söz konusudur bunlardan biri çekme gerilmesi diğeri ise yüzey tarafından soğurulup iç taraflara doğru difüze olan sıvıdır. Bunların yanı sıra ÇGÇ mekanizması polikarbonatın mikro yapısına etki eden dış gerilme, difüze olan sıvının kimyasal yapısına, sıvının çözünürlük parametresine, maruz kalınan süreye, hammadde içerisindeki partikül boyutlarına ve ortam sıcaklığına bağlı karmaşık bir olgudur. ÇGÇ'ye sebep olan sıvının polikarbonata kimyasal olarak saldırıp kimyasal bozulmaya neden olmadığı, bunun yerine moleküler yapıya nüfuz ederek polimer zinciri bağlayan moleküller arası bağ kuvvetlerini engelleyerek moleküler çözülme hızlandırdığı bilinmektedir [7-9]. Gündelik hayatta sıklıkla kullandığımız deterjanlar, çeşitli yağlar, su, etanol, metanol, aseton, toluen, gıda kimyasalları ve yaygın ev temizlik maddeleri ÇGÇ mekanizmasını hızlandıran veya sebep olan sıvılar olarak adlandırılabilirler [10-12]. Polikarbonat parçaların maruz kaldıkları gerilmeler üretim esnasında oluşan iç gerilmeler, montaj esnasında oluşan gerilmeler ve kullanım sırasında maruz kalınan gerilmeler olarak sınıflandırılırlar [13, 14]. Arun Raman ve ekibi çok eksenli gerilme durumlarının ÇGÇ üzerindeki etkisini polikarbonat-oleik asit sistemini üzerinde çalışmışlardır. Yüksek gerilme altında yoğun çatlaklar topluluğunun oluştuğu, düşük gerilmelerde ise daha izole bir çatlak morfolojisinin gözlemlendiği rapor etmişlerdir. Ayrıca, tüm

stres durumları için, yönlendirilmiş numunelerin yönsüz muadillerine göre daha düşük gerilmelerde çatladıkları gözlemlenmiştir [15]. Polikarbonat parçaların ÇGÇ dayanımını artırmak için farklı yüzey kaplama işlemleri uygulanabilmektedir. Yan C. ve ekibi enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilen polikarbonat parçaları şeffaf silikon kaplayarak etanol ortamında üç nokta eğme testine tabi tutarak kaplamanın ÇGÇ davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışma neticesinde silikon kaplamanın polikarbonat parçaların ÇGÇ dayanımını artırdığı gözlemlenmiştir. Aynı çalışmada SiO<sub>2</sub> kaplamanın ise polikarbonat parçaların ÇGÇ dayanımını artırmada etkili olmadığı tespit edilmiştir [16]. Christian Hopmann ve ekibi polikarbonat parçaların iç yapısındaki moleküler yöneliminin, artık gerilmelerin ve kısa lif takviyesinin ÇGÇ davranışına etkisini su etkisi altında incelemişlerdir. Artık gerilmeler ve lif takviyesinin önemli bir etki gösterdiği ve ÇGÇ indükleyici ortama maruz kalan bir polikarbonat bileşenin ÇGÇ direncini iyileştirmek için kullanılabilceği rapor edilmiştir. Ek olarak, içsel artık gerilmelerin enjeksiyon kalıplama parametrelerinden etkilendiği ve bununda ÇGÇ dayanıklılığı üzerinde etkisinin olduğu gösterilmiştir [17].

Polikarbonat parçaların seri üretiminde enjeksiyon kalıplama metodu yoğun olarak kullanılmaktadır. Polikarbonat malzemeden üretilen telefon kalıplarının hasar analizi üzerine yaptığımız öncü çalışmamızda hasarın temel nedeninin üretimden kalan kimyasal ayırıcıların sebep olduğu çevresel gerilme çatlaması olduğu kanaatine varmıştık [18]. Hammadde ve üretilen parça miktarlarındaki artan çeşitlilik nedeni ile ortaya çıkacak onarımı yeniden işleme, geciken teslimatlar ve satış sonrası oluşan sorunların ortaya çıkması dış başarısızlık faktörleri olarak şirketler için büyük kalite maliyetlerine yol açabilmektedir [19]. Dolayısı ile bu çalışmada plastik enjeksiyon kalıplama prosesinde, seri üretime bağlı olarak yoğun şekilde kullanılabilen kimyasal kalıp ayırıcılarının polikarbonat parçaların çevresel gerilme çatlağı davranışına olan etkileri çeşitli testler ve incelemelerle gözlemlenmeye çalışılmıştır. Dört farklı polikarbonat reçineden 4 farklı kalıp ayırıcı kullanılarak test numuneleri üretilmiştir. Üretilen numunelere sabit gerilme testleri uygulanmış ve daha sonra mikroskop altında çatlak oluşumu ve kimyasal kontaminasyona bağlı yüzeyel kusurların incelenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca mekanik ve fiziksel özelliklerin değişik test koşulları altındaki durumları gözlemlenmiştir.

## 2. Deneysel Metot (Experimental Method)

### 2.1. Kullanılan Polikarbonat Reçineler Ve Kalıp Ayırıcılar (Polycarbonate Resins And Release Agents in Experiments)

Çalışmada kullanılan bütün polikarbonat reçineler SABIC üzerinden Lexan marka olarak temin edilmiştir. Bu çalışmada yapılacak olan testlerde LEXAN 9330, LEXAN 943A, LEXAN6013 ve LEXAN 503R olmak üzere dört farklı polikarbonat reçine çeşidi kullanılmıştır. Polikarbonat reçine çeşitleri birbirinden farklı mekanik ve fiziksel davranış barındırmaktadırlar. Üretimi yapılacak bütün test numuneleri için polikarbonatlar reçine hammadde şeklinde temin edilmiştir. LEXAN 9330 ismiyle tedarik edilen reçine özellikle yüksek işlenebilirlik için tasarlanmıştır ve opak Polikarbonat-Siloksan kopolimerine sahiptir. Ayrıca renk aralıklarında bromsuz, kloruz, alev geciktirici bir ürüne sahiptir. Diğer özellikler ultraviyole stabilize ve tutuşabilirlik dereceli fl / V-0 / 5VA şeklindedir. LEXAN 943A polikarbonat ise dolgusuzdur ve aynı zamanda orta akışlı ve darbeye karşı güçlendirilmiş plastik enjeksiyon için kalıplanabilir bir sınıf olarak tasarlanmıştır. Bu reçine de bromlu ve kloruzdur. Bu geciktiriciler, alev geciktirme sağlar ve tutuşturulabilirliği azaltır. Standart polikarbonatlara kıyasla daha fazla enjeksiyon kalıplama döngü sürelerine ve düşük sıcaklıkta süneklik sağlayacak yüksek işlenebilirliğe sahiptirler. LEXAN 943A reçine için geniş bir opak

renk yelpazesi mevcuttur. LEXAN 6013 reçinesi, normal polikarbonata kıyasla özellikle gelişmiş kimyasal dirençle birlikte yüksek darbe verimliliği gerektiren uygulamalar için tasarlanmıştır. LEXAN 503R, yüksek ısı direnci ve yüksek darbe direnci ile birlikte yüksek sertlik gerektiren çok çeşitli uygulamalar için özel olarak tasarlanmıştır. LEXAN 503R reçineleri orta viskoziteli, %10 cam takviyeli, Ultraviyole stabilizeli, alev geciktirici dereceye sahiptir. Kullanılan polikarbonat reçinelerin mekanik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir [20]. Çalışmada kullanılacak test numuneleri enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilmiştir. Enjeksiyon kalıplama yönteminde çok yaygın olarak kullanılan 4 farklı kalıp ayırıcı bu çalışmada ÇGÇ indükleyici çevresel etmen olarak kullanılmıştır. Bunlardan üçü silikon bazlı olup, biri silikon içermemektedir. Dört farklı kalıp ayırıcı çeşitleri DR. MAT, Westoil B130 (silikonsuz), Westoil B111, BEST KA 2000'dir. Tablo 2. 'de kalıp ayırıcılarının veri sayfalarına göre bileşik ve bileşik oranları yer almaktadır.

### 2.2. Numune Üretimi (Specimen Preparation)

Polikarbonat reçinelerden üretilen test numuneleri plastik enjeksiyon yöntemiyle Hastek BT 120 Enjeksiyon Makinesi ile üretilmiştir. Kalıplama işlemi sırasında numune boyutları için ASTM 8,50-inch çekme çubuğu ve ASTM D683 Standartları referans alınmıştır (Şekil 1). Üretim parametreleri Tablo 3'de görülmektedir ve bu değerler malzemelerin üretim sayfasına göre tavsiye edilen değerlerdir. İmalat sırasında her test numunesine göre kalıp ayırıcılar kullanılmıştır. Test numuneleri dört çeşit polikarbonat ve dört çeşit kalıp ayırıcı kombinasyonları ile üretimi gerçekleştirilmiştir.

### 2.3. Test Metotları (Test Methods)

Üretilen malzemelerin eğme dayanımı değişiminin incelenmesi için üç noktalı eğme deneyi kullanılmıştır [21]. Bu çalışmada da plastik enjeksiyon ile üretilen test numunelerinin üzerinde çevresel gerilme çatlağı dayanımı testi ve eğme dayanımının ölçülmesi için üç nokta eğme testi gerçekleştirilmiştir. Testler tekrarlanarak ortalama değerleri alınmıştır. Çevresel gerilme çatlağı dayanımı (ÇGÇD) testi için Şekil 2.'deki gibi bir düzeneğe tasarlanmış ve düzeneğin malzeme üzerine verdiği gerilme %1,5'dir ve kalıp açıklığı 7,83" olarak tasarlanmıştır. Test düzeneği yüksek hassasiyete sahip sac bükme makinesi ile üretilmiştir. Hasar oluşumunu hızlandırmak adına ÇGÇD testleri gerçekleştirilirken üretim esnasında kullanılan kalıp ayırıcı haricen de test numunelerinde stresin en yüksek olacağı düşünülen tepe bölgesine (Şekil 2'te kırmızı ile işaretlenmiş alanlara) uygulanmıştır. Kimyasal emilimin artması çevresel gerilme çatlağının oluşmasını hızlandırmaktadır. Her test öncesi kalıp ayırıcıları kimyasal etmen olarak numune malzemeler üzerinde kullanılmıştır ve kalıpla beraber gerilim verilerek 168 saat, 80°C tavlama işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 3). Son aşama olarak, tüm numuneler mikroskop altında kontrol edilmiş ve kırılma mekanizmasını analiz etmeye çalışılmıştır.

Üç nokta eğme testlerini ASTM D790'a göre yapılmıştır [22]. Test işlemi sırasında 70 mm'lik aparat açıklığı kullanılmıştır. Testler 5 kN kapasiteye sahip LLOYD LR5K Plus Makinesi ile gerçekleştirilmiştir. Test hızı olarak 1,0 mm/dk tercih edilmiştir ve %5 gerilme limiti konulmuştur. Üç nokta eğme testlerinde de her test

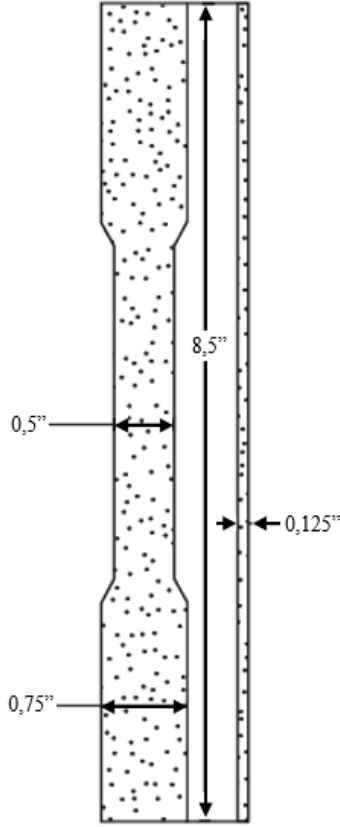
**Tablo 1.** LEXAN 9330,943A, 6013 ve 503R polikarbonat reçinelerin mekanik özellikleri.  
(Mechanical properties of LEXAN 9330,943A, 6013 and 503R polycarbonate resins)

Özellikler	Birim	Malzeme (LEXAN)				
		9330	943A	6013	503R	
Yoğunluk	ISO 1183	g / cm <sup>3</sup>	1,19	1,20	1,20	1,25
Akma Gerilimi	ISO 527	MPA	58,0	63,0	55,0	45,0
Kopma Stresi	ISO 527	MPA	61,0	65,0	60,0	60,0
Kopma Gerilimi	ISO 527	%	130	100	100	70
Modulus	ISO 527	MPA	2100	2350	2100	3300
Bükülme mukavemeti	ISO 178	MPA	85,0	90,0	80,0	95,0
Su soğurumu	ISO 62	%				
Doygunluğu, 23C			0,35	0,35	0,35	0,31
Denge 23C, %50 Bağlı Nem			0,15	0,15	0,15	0,13
Eriyik Hacim/Akış Hızı (MVR) (300°C / 1,2 kg)	ISO 1133	cm <sup>3</sup> /10 dak	10,0	9,00	5,00	8,00
Erime Akış Hızı (MFR)	ISO 1133	g / 10 dak	11,9	10,8	6.0	10

**Tablo 2.** Kalıp Ayırıcı Bileşikleri ve Oranları (Mold Release Agents' Compounds and Ratios)

	Bileşik	% w / w
Westoil B130 Bileşikleri ve Oranları	Modifiye Dimetil Polisiloksan	4-7
	Dikloro Floro Etan	88-91
	Karbondioksit	3-5
Dr. MAT Bileşikleri ve Oranları	Propan	30-50
	Bütan	1-10
	İzobütan	5-15
	Etil alkol	10-15
	Dimetil siloksan	30-45
Westoil B111 Bileşikleri ve Oranları	Polidimetilsiloksan	23-33
	Sıvılaştırılmış petrol gazı	67-77
BEST KA 2000 Bileşikleri ve Oranları	Diklorometan (Metilen Klorür)	60-80
	Propan	10-20
	Bütan	10-20
	İzobütan	10-20

öncesi kalıp ayırıcıları kimyasal etmen olarak numune malzemeler üzerinde kullanılmış ve 168 saat tavlama işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 4). İlgili eğme testlerinde 2 türlü numune hazırlanmış ve test edilmiştir. Numunelerin bir kısmı kalıp ayırıcı kullanılarak üretilmiş ve 168 saat, 80°C tavlama işlemine tabi tutulmuştur. Diğer kısmı ise kalıp ayırıcı kullanılarak üretilmiş ve 168 saat tavlama işlemine ardından ÇGÇD düzeneğinde 48 saat boyunca %1,5 gerinim verildikten sonra test edilmiştir. Test sonuçları ayrı şekilde toplanmıştır. Tüm numuneler aynı sıcaklıkta, 25°C ve nem seviyesi %39 civarında test edilmiştir.



Şekil 1. Numunelerin boyutları (Dimensions of samples)

### 3. Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi (Evaluation of Experiment Results)

#### 3.1. Çevresel Gerilme Çatlağı Dayanımı Sonuçları (Environmental Stress Crack Resistance Results)

Çevresel gerilme çatlağı dayanımı test sonuçları için test esnasında çatlak veya hasar oluşumu çıplak gözle bakılarak karar verilmiştir.

168 saatlik testlerden sonra numuneler çatlak oluşumlarına esas alınarak hasarlı veya hasarsız olarak tablo 4’de listelenmiştir. Genel olarak kalıp ayırıcı kullanılmadan üretilen tüm numunelerde çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir. Westoil B130, Dr. MAT ve Best KA 2000 ayırıcıları kullanılarak üretilen 4 farklı numunelerden üçünde hasar oluşumu gözlemlenmiştir. Westoil B111 kullanılarak üretilen 4 farklı polikarbonat numunelerden 2 tür numunenin hasara uğradığı görülmüştür. Diğer taraftan, LEXAN 943A numuneler diğer polikarbonatlarla karşılaştırıldığında çevresel stres çatlağına karşı en yüksek direnci göstermiştir. LEXAN 6013 numuneleri ise kalıp ayırıcı kullanılarak yapılan dört testin tamamında başarısız olarak bu testlerde en kötü sonuçları göstermiştir. LEXAN 9330 ve LEXAN 503R numuneleri ise dört farklı kalıp ayırıcıları ile yapılan testlerden üçünde hasara uğramışlardır. Çevresel gerilme çatlağı dayanımı testlerine göre, enjeksiyon kalıplamada kullanılan kalıp ayırıcı ajanların tamamının polikarbonat numunelere negatif etkide buldukları ve dayanımlarını etkilediği gözlemlenmiştir.

Çevresel gerilme çatlağı dayanımı testlerinden sonra, çatlak büyümesiyle ve numunedeki diğer kusurlarla ilgili bilgi almak için mikroskop incelemesi yapılmıştır. Numuneler, HEXAGON optiv Classic CMM mikroskobu ile 50 kat ve 200 kat arasında büyüme katsayısıyla incelenebilmektedir. Morfoloji analizi testlerde kullanılan polikarbonat malzemelerdeki kusurları iyice görebilmek adına yapılmaktadır. Numunelerin mikroskop görüntüleri, Şekil 2’de gösterilen maksimum gerilme ve sapma gösterdiği bölgelerden alınmıştır.

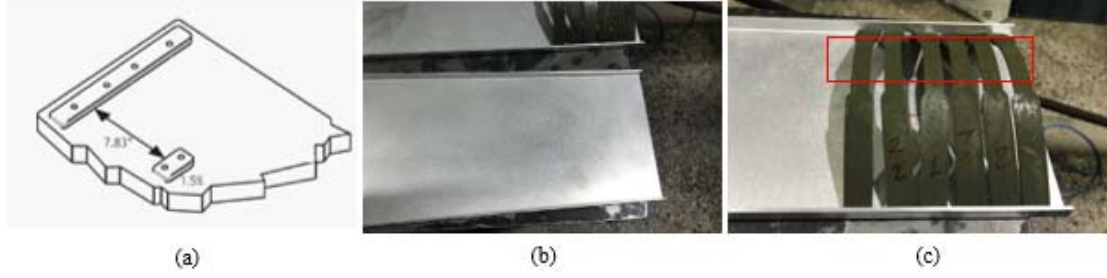
Herhangi bir kalıp ayırıcı kullanılmadan üretilen Polikarbonat numunelerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 5’te görülmektedir. Mikroskop, yüzeydeki kusurların varlığını belirlemek amacıyla 50 ile 200 kat arasında yakınlaştırmayı sağlamaktadır. Şekil 5a’ da görüldüğü gibi tüm görüntüler, numunelerin tam ortalarından alınmaktadır.

Şekil 6, LEXAN 9330’un kalıp ayırıcı ajanı olan farklı kimyasal ajanlarla yapılan testlerinin kırılma yüzeylerini göstermektedir. Şekil 6a’da görüldüğü gibi herhangi bir kimyasal ayırıcının kullanılmadığı test numunelerinde herhangi bir kusur belirtisi yoktur. Ancak bunun aksine, kalıplama esnasında Westoil B111, Dr.MAT, and BEST KA 2000 marka kalıp ayırıcılarının kullanıldığı Şekil 6b, 6d ve Şekil 6f’deki örneklerde çatlaklar gözlemlenmektedir. Ayrıca, Şekil 6c ve 6e’de Westoil B310 ve BEST KA 2000 ile test edilmiş olan numunelerde çatlak başlangıçları ve yüzey boşlukları görülmektedir.

Şekil 7, LEXAN 943A’nın kalıp ayırıcı ajanı olan farklı kimyasal ajanlarla yapılan testlerinin kırılma yüzeylerini göstermektedir. Şekil 7a’da görüldüğü gibi herhangi bir kimyasal madde ile bozulmayan test numunelerinde herhangi bir kusur belirtisi yoktur. Bunun yanı sıra, çatlaklar yalnızca Westoil B310 numunelerinde gözlemlenmektedir. Kalıplama sürecinde Westoil B111, Westoil B130, BEST KA 2000,

Tablo 3. Numunelerin İmalat Parametreleri (Manufacturing Parameters of Samples)

	LEXAN 9330	LEXAN 943A	LEXAN 6013	LEXAN 503R
Kurutma Sıcaklığı	120°C	120°C	120°C	120°C
Kuruma zamanı	4 h	2-4 h	2-4 h	2-4 h
Hazne Sıcaklığı	76°C	76°C	76°C	76°C
Arka Sıcaklık	280°C	260°C	280°C	280°C
Orta Sıcaklık	290°C	280°C	290°C	290°C
Ön Sıcaklık	300°C	300°C	300°C	300°C
Nozul Sıcaklığı	290°C	290°C	290°C	290°C
İşleme (Erime) Sıcaklığı.	300°C	300°C	300°C	300°C
Kalıp Sıcaklığı	80°C	80°C	100°C	100°C
Kalıp Isıtıcı Sıcaklığı	125°C	125°C	125°C	125°C
Enjeksiyon basıncı	6500 kPa	6500 kPa	6500 kPa	6500 kPa



**Şekil 2.** a) Çevresel gerilme çatlak dayanımı test düzeneği çizimi b) Numunesiz şekilde test düzeneği c) Numuneler monte edilmiş ve en fazla gerinime sahip bölgeler işaretlenmiş halde test düzeneği  
(a) Environmental stress crack strength test rig drawing b) Test rig without sample c) Test rig with samples mounted and areas of highest strain marked)

**Tablo 4.** Çevresel Gerilme Çatlak Dayanımı Test Sonuçları (Environmental Stress Crack Strength Test Results)

	Westoil B111	Westoil B130	BEST KA 2000	Dr.MAT	Ayrırcı kullanılmadan üretilen numuneler
LEXAN 9330	Hasarlı	Hasarsız	Hasarlı	Hasarlı	Hasarsız
LEXAN 6013	Hasarlı	Hasarlı	Hasarlı	Hasarlı	Hasarsız
LEXAN 503R	Hasarsız	Hasarlı	Hasarlı	Hasarlı	Hasarsız
LEXAN 943A	Hasarsız	Hasarlı	Hasarsız	Hasarsız	Hasarsız

ve Dr.MAT marka kalıplama ayraç ajanları kullanılmıştır. Ancak test edilen numunelerde kaplama çatlak başlangıçları ve yüzey boşlukları görülmektedir. Şekil 7b, 7c ve 7f yüzey boşlukları hakkında bilgi vermektedir.

Westoil B111 ve BEST KA 2000 ile test edilen numunelerde çatlak başlangıçları ve yüzey boşlukları Şekil 8b ve Şekil 8d'de görülebildiği şekilde oluşmaktadır.



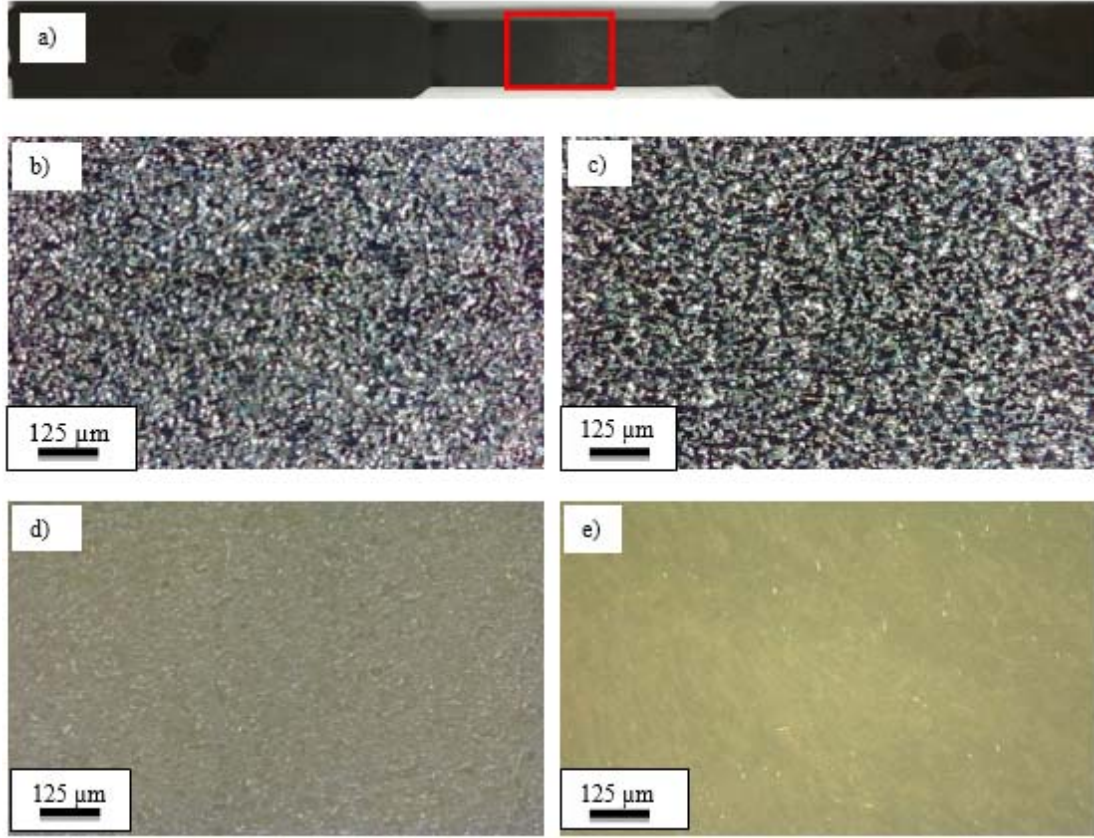
**Şekil 3.** Tavlama operasyonu (Annealing operation)

Şekil 8, LEXAN 6013'ün kalıp ayraç ajanı olan farklı kimyasal ajanlarla yapılan testlerinin kırılma yüzeylerini göstermektedir. Şekil 8a'da görüldüğü gibi herhangi bir kimyasal madde ile bozulmayan test numunelerinde herhangi bir kusur belirtisi yoktur. Diğer yandan, bunun haricindeki diğer tüm testlerde çatlaklar gözlenmektedir. Kalıplama sürecinde Westoil B111, Westoil B130, BEST KA 2000 ve Dr.MAT marka kalıplama ayraç ajanları kullanılmıştır. Tüm kalıp ayraç ajanları gözle görülebilen çatlaklara sebep olmaktadır. Ayrıca,



**Şekil 4.** LLOYD LR5K Plus üç nokta eğme test cihazı (LLOYD LR5K Plus three point bend test machine)

Şekil 9, LEXAN 503R'nin kalıp ayraç ajanı olan farklı kimyasal ajanlarla yapılan testlerinin kırılma yüzeylerini göstermektedir. Şekil 9a'da görüldüğü gibi herhangi bir kimyasal madde ile bozulmayan test numunelerinde herhangi bir kusur belirtisi yoktur. Çatlak oluşumu yalnızca kimyasal ajan kullanılmayan testlerde ve Westoil B111 kullanılan testlerde gözlenmemektedir. Kalıp ayraç ajanı olarak Westoil B130, BEST KA 2000, and Dr.MAT markasının kullanıldığı testlerde çatlaklar görünür hale gelmiştir ve testler başarısız olarak sonuçlanmıştır. Tüm kalıp ayraç ajanları test esnasında kusurlara yol açmıştır. Ek olarak, yüzey boşlukları oluşmasa bile çatlak



**Şekil 5.** Herhangi bir kalıp ayırıcı kullanılmadan üretilen numune yüzeyleri. (a) Örnek numune yüzeyi (b) LEXAN 9330 yüzeyi (c) LEXAN 943A yüzeyi (d) LEXAN 6013 yüzeyi (e) LEXAN 503R yüzeyi 'ne ait mikroskobik resimler  
(Sample surfaces produced without the use of any mold release agent. a) Sample surface b) LEXAN 9330 surface c) LEXAN 943A surface d) LEXAN 6013 surface e) Microscopic pictures of LEXAN 503R surface)

başlangıçları oluşmaktadır. Westoil B111, BEST KA 2000, ve Dr.MAT ile test edilen numunelerde Şekil 9b, 9d ve 9e'de de görüldüğü üzere çatlak başlangıçları oluşmaktadır.

### 3.2. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları (Three Point Bend Test Results)

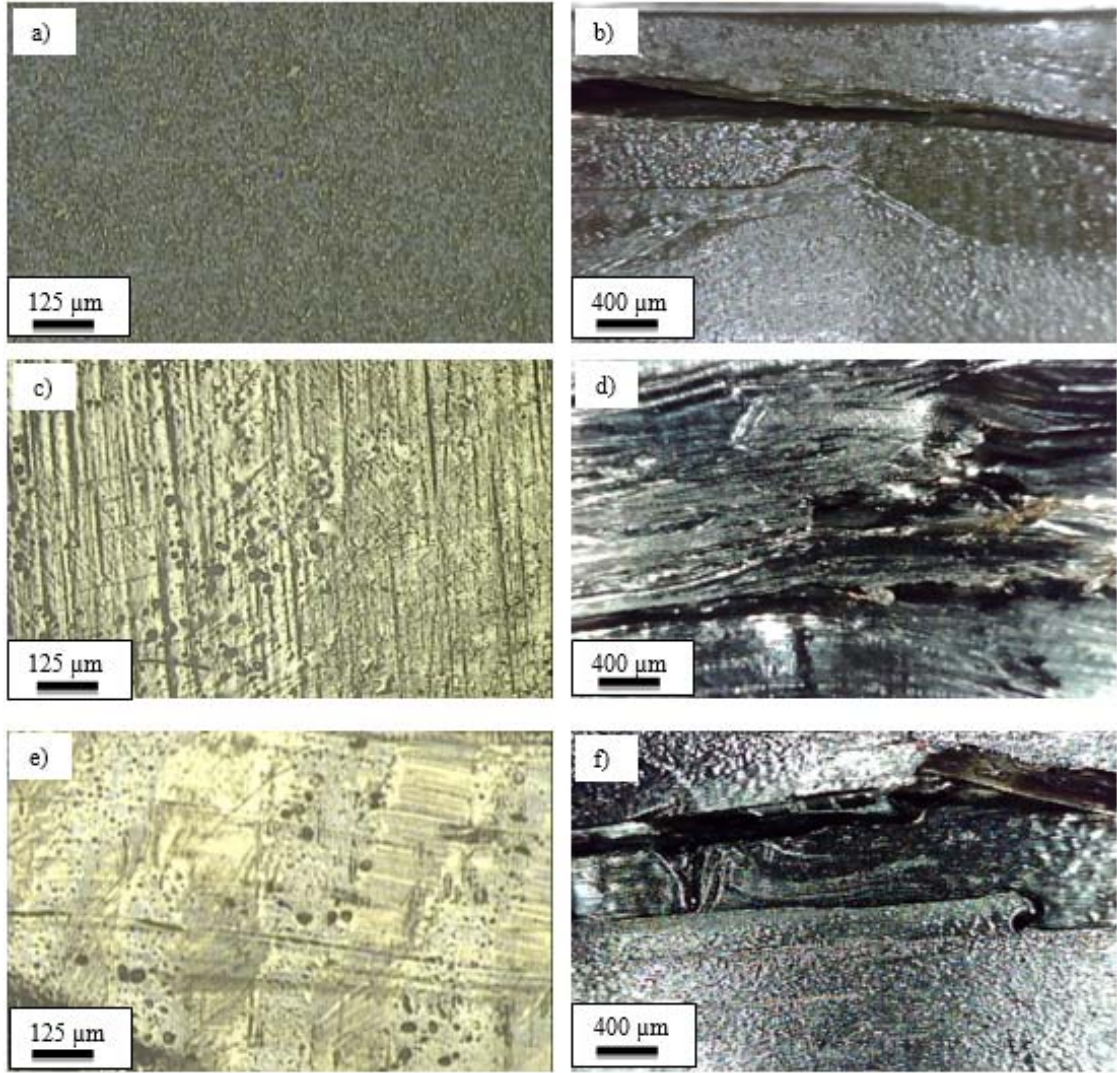
Üç noktalı eğme testi sonuçları iki kısımdan oluşmaktadır. Bunlardan ilk kısmı, ön gerilme işlemine tabi tutulmadan, imal edildiği gibi test prosesine devam edilmesi ile elde edilen üç nokta eğme testi sonuçlarıdır. Diğer numuneler ise kimyasal etkenlerin çevresel gerilim çatlağına etkisini araştırılması amacı ile 48 saat boyunca %1,5 gerinim uygulandıktan sonra test edilmiştir. Numunelerin test sonuçları maksimum yük ve kırılma noktası olarak gösterilmiştir. Bu verilerin değerleri tablolarda ve grafiklerde gösterilmiştir. LEXAN 503R polikarbonat malzemelerine ait ön gerilmeye maruz kalmayan test sonuçları Şekil 10 'da gösterilmiştir. Herhangi bir kalıp ayırıcı kullanılmadan üretilmiş LEXAN 503R için elde edilen maksimum yük verisi 185,6 N ve test sonuçlarından toplanan en düşük maksimum yük Westoil B130'ye ait ve 171,2 N'dur. Diğer sonuçlar Tablo 5'de gösterilmektedir. Benzer şekilde, maksimum değer olarak kopma yükü 148,8 N' ile herhangi bir kalıp ayırıcı kullanılmadan üretilen numunelere aittir.

Tablo 6'da, kimyasal etmen olarak farklı kalıp ayırıcı kullanılarak imalat işleminden sonra 48 saat boyunca %1,5 gerinim uygulanan numuneler hakkında veri vermektedir. Herhangi bir kalıp ayırıcı ile

üretilmeyen LEXAN 503R için sunulan maksimum yük verisi 182,6 N'dir ve BEST KA 2000 kalıp ayırıcı ile test sonuçlarından toplanan en düşük maksimum yük 165,1 N'dir. Aynı şekilde, herhangi bir kalıp ayırıcı ile üretim yapılmayan LEXAN 503R numuneler için maksimum kırılma yükü değeri 146,7 N ve en düşük değer BEST KA 2000 için 131,6 N'dir. İmalat işlemleri sırasında bir kalıp ayırıcı maddesi uygulandığında, herhangi bir kimyasal kalıp ayırıcı maddesinin kullanılmamasına kıyasla maksimum yük değeri değerlerinin azaldığı görülebilir. Tüm kalıp ayırıcı maddeleri karşılaştırılırken değerlerin düşmesi açıkça görülmektedir.

LEXAN 6013 numunelerine ait ön gerilmeye maruz kalmayan üç nokta eğme testi sonuçları tablo 7'de verilmiştir. LEXAN 6013 için herhangi bir kalıp ayırıcı ile üretim yapılmayan numunelere ait maksimum yük verisi 157,4 N ve Dr.MAT ile test sonuçlarından toplanan maksimum yükün minimum değeri 154,1N'dir. LEXAN 6013 numuneleri için testten önce uygulanan 48 saat süresince %1,5'lik gerinim uygulandıktan sonra elde edilen test numunesi sonuçları ise Tablo 8'de gösterilmektedir. Bu doğrultuda, Westoil B130 için 91,1N olan en düşük maksimum yük değerine kıyasla herhangi bir kalıp ayırıcı ile üretim yapılmayan numunelere için maksimum yük değeri 155,8 N'dir. Bu iki değer karşılaştırıldığında %41,5'in üzerinde maksimum yük değeri kaybı olduğu görülmektedir.

LEXAN 943A polikarbonat numunelere ait sonuçları Tablo 9'da gösterilmiş olup, herhangi bir kalıp ayırıcı ile üretim yapılmayan



**Şekil 6.** LEXAN 9330 Yüzeyi Mikroskobik Resimleri (a) Kimyasal ajanların kullanılmadığı numune (b) Westoil B111, yüzey çatlakları (c) Westoil B130, Yüzey boşlukları ve kaplama çatlakları (d) BEST KA 2000, yüzey çatlakları (e) BEST KA 2000, yüzey boşlukları (f) Dr.MAT, yüzey boşlukları (Microscopic Pictures of LEXAN 9330 Surface a) Sample without chemical agents b) Westoil B111, surface cracks c) Westoil B130, Surface voids and coating cracks d) BEST KA 2000, surface cracks e) BEST KA 2000, surface voids f) Dr.MAT, surface voids)

**Tablo 5.** Ön Gerilme İşlemine Tutulmayan Lexan 503R Numunelerinin Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları  
(Three Point Bend Test Results of Lexan 503R Specimens Not Prestressed)

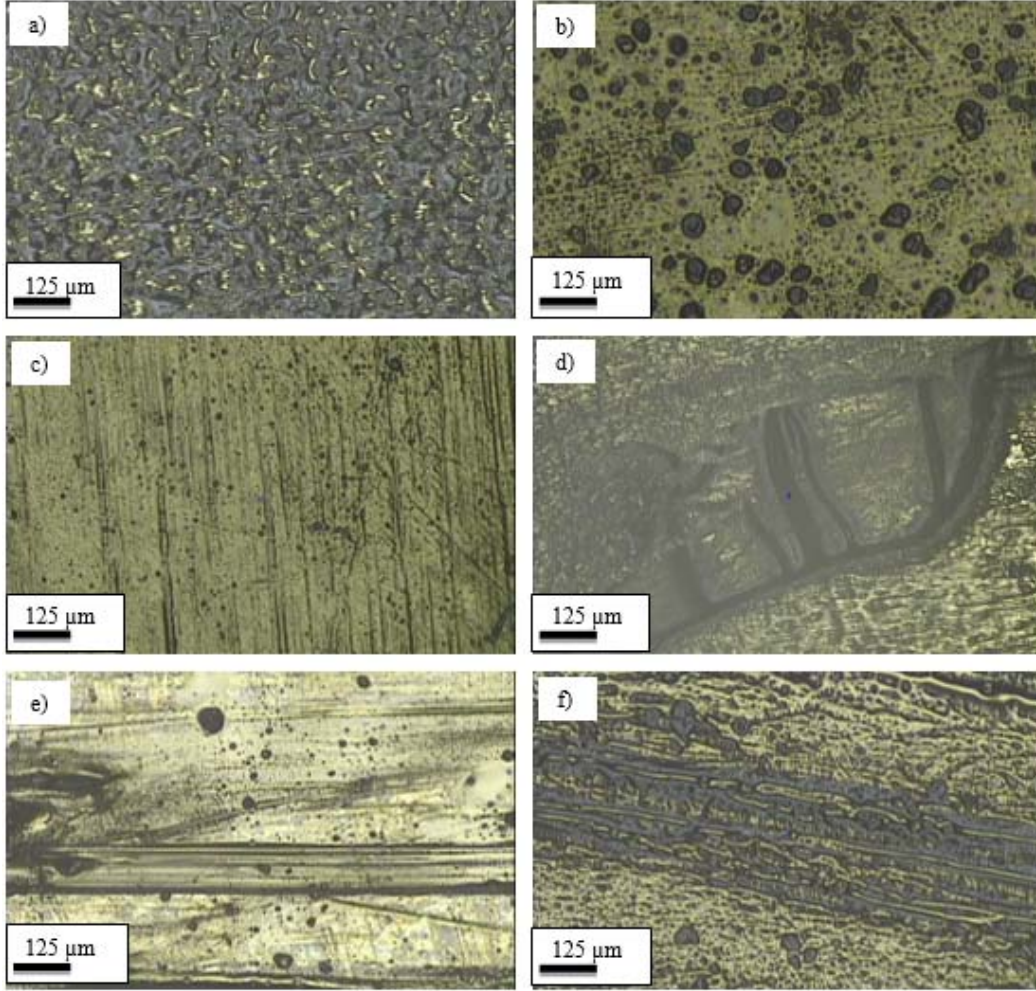
Kimyasal Etken Olarak Kalıp Ayrıcılar	Maksimum Yük Değeri (N)	Maks. Ulaşma zamanı Yük Değeri (s)	Kırılma Yüğü (N)	Kırılma Süresi (s)
Westoil B130	175,8	10,9	140,5	15,5
Dr. MAT	171,2	11,4	136,8	16,1
BEST KA 2000	184,6	11	148,2	15,3
Westoil B111	184,6	10,8	147,7	15,1
Kalıp Ayrıcı Kullanılmadan	185,6	11,1	148,8	15,1

numunelere için maksimum yük verisi 173,8N ve Westoil B130 numuneleri için test sonuçlarından toplanan maksimum yük için minimum değer 167,1N'dir. Aynı şekilde, herhangi bir kimyasal madde içermeyen LEXAN 943A için maksimum kırılma yükü değeri 139,2 N ve en düşük değer Westoil B130 için 133,5 N'dir. Öte yandan, LEXAN 943A numuneleri için diğer sonuçlar, testten önce uygulanan 48 saat süresince %1,5'lik gerinim ile elde edilen test numunesi sonuçlarını içeren veriler Tablo 10'da gösterilmektedir. Aynı şekilde,

Westoil B130 için 165,9N olan en düşük maksimum yük değerine kıyasla, herhangi bir kimyasal madde içermeyen maksimum yük değeri 171,9 N'dir. Farkın%3,5'in altında olduğu görülebilmektedir.

Ön gerilme işlemine tutulmayan LEXAN 9330 numunelerinin üç nokta eğme testi sonuçları Tablo 11'de gösterilmiş olup, herhangi bir kalıp ayırıcı ile üretim yapılmayan numunelere için maksimum yük verisi 150,3 N ve test sonuçlarından toplanan maksimum yükün





**Şekil 7.** LEXAN 943A Yüzeyi Mikroskopik Resimleri a) Kimyasal ajanların kullanılmadığı b-c) Westoil B111, Yüzey boşlukları ve kaplama çatlakları d) Westoil B130, yüzey çatlakları e) Dr.MAT, yüzey boşlukları ve kaplama çatlakları (Microscopic Pictures of LEXAN 943A Surface a) No chemical agents b-c) Westoil B111, Surface voids and coating cracks d) Westoil B130, surface cracks e) Dr.MAT, surface voids and coating cracks)

**Tablo 6.** LEXAN 503R Test Sonuç Verileri (%1,5 Gerinim Uygulanan Test Sonuçları)  
(LEXAN 503R Test Result Data (After Applying 1.5% Strain))

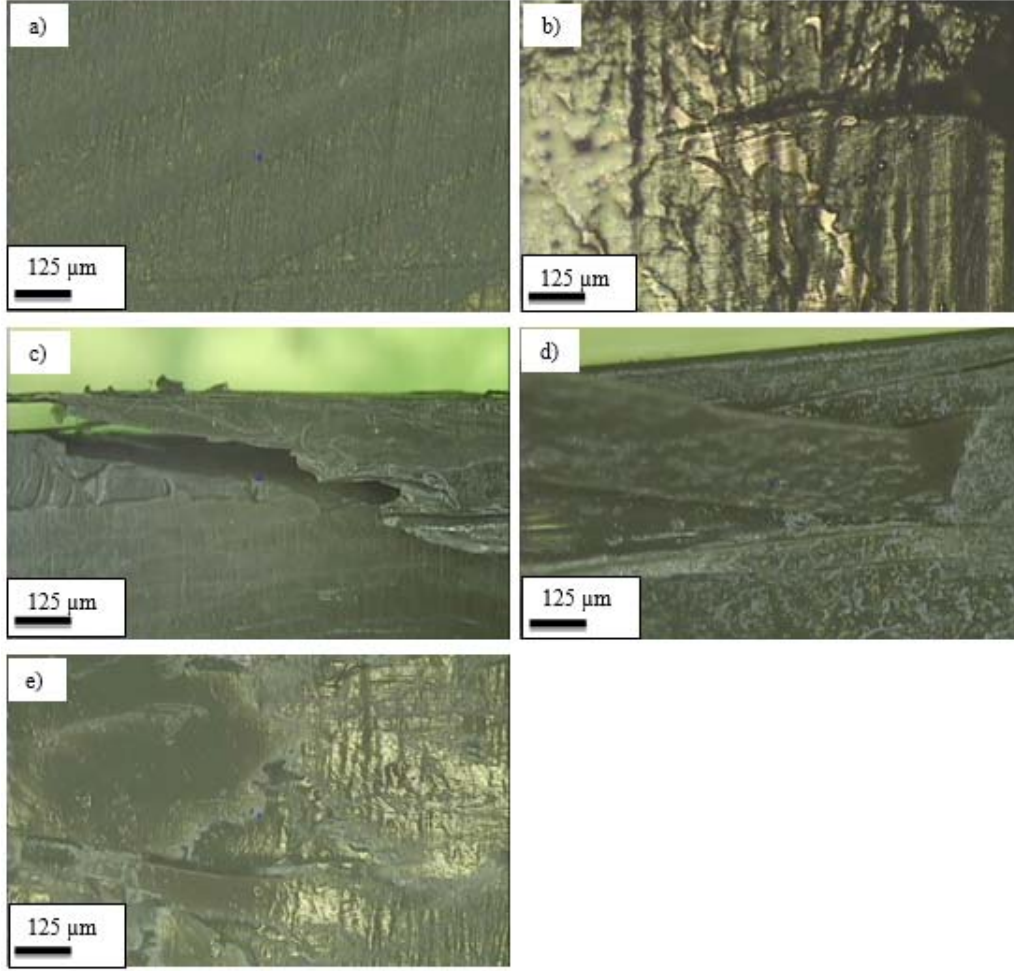
Kimyasal Etken Olarak Kalıp Ayırıcılar	Maksimum Yük Değeri (N)	Maks. Ulaşma zamanı Yük Değeri (s)	Kırılma Yükü (N)	Kırılma Süresi (s)
Westoil B130	182,4	10,6	146,1	14,5
Dr. MAT	174	10,8	139,6	14,8
BEST KA 2000	165,1	10,5	131,6	14,4
Westoil B111	180,7	10,6	144,7	14,6
Kalıp Ayırıcı Kullanılmadan	182,6	10,7	146,7	15

**Tablo 7.** Ön Gerilme İşlemine Tutulmayan LEXAN 6013 Numunelerinin Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları  
(Three Point Bending Test Results of LEXAN 6013 Samples Not Prestressed)

Kimyasal Etken Olarak Kalıp Ayırıcılar	Maksimum Yük Değeri (N)	Maks. Ulaşma zamanı Yük Değeri (s)	Kırılma Yükü (N)	Kırılma Süresi (s)
Westoil B130	155,9	11,3	125	15,4
Dr. MAT	154,1	11,3	123,9	15,4
BEST KA 2000	155,4	11,4	124,9	15,5
Westoil B111	155,8	11,3	123,7	15,5
Kalıp Ayırıcı Kullanılmadan	157,4	11,3	125,9	15,5

minimum değeri 136 N'dir ve Dr. MAT'a aittir. Aksine, LEXAN 9330 numuneleri için testten önce uygulanan 48 saat süresince %1,5'lik

gerinim ile elde edilen test numunesi sonuçlarını içeren veriler Tablo 12'de gösterilmektedir. Aynı şekilde, Dr.MAT için 113,9 N olan en



**Şekil 8.** LEXAN 6013 Yüzei Mikroskopik Görüntüleri a) Kimyasal ajanların kullanılmadığı b) Westoil B111, yüzey çatlakları ve kaplama çatlakları c) Westoil B130, yüzey çatlakları d) BEST KA 2000, yüzey ve kaplama çatlakları e) Dr.MAT, yüzey ve kaplama çatlakları (Microscopic Images of LEXAN 6013 Surface a) Chemical agents are not used b) Westoil B111, surface cracks and coating cracks c) Westoil B130, surface cracks d) BEST KA 2000, surface and coating cracks e) Dr.MAT, surface and coating cracks)

**Tablo 8.** LEXAN 6013 Test Sonuç Verileri (%1,5 Gerinim Uygulanan Test Sonuçları)  
(LEXAN 6013 Test Results Data (After Applying 1.5% Strain))

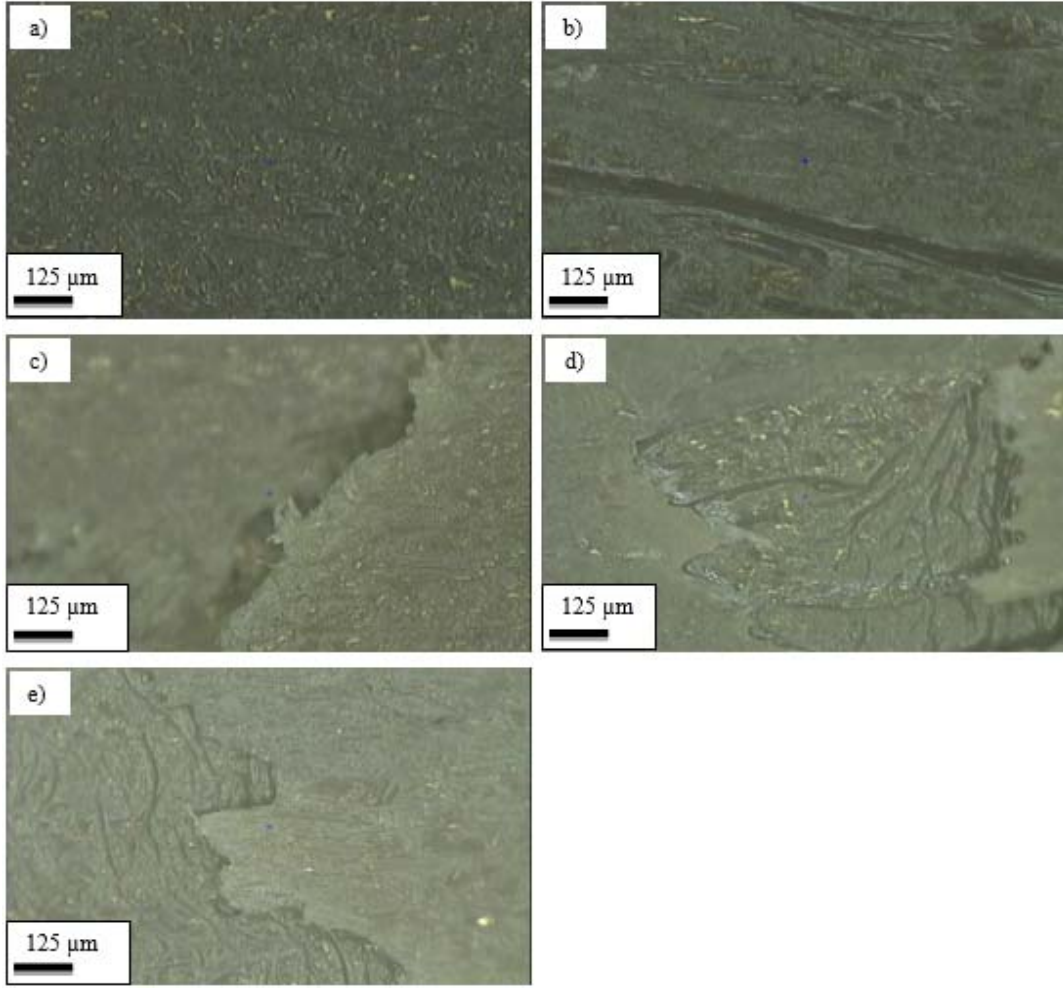
Kimyasal Etken Olarak Kalıp Ayırıcılar	Maksimum Yük Değeri (N)	Maks. Ulaşma zamanı Yük Değeri (s)	Kırılma Yükü (N)	Kırılma Süresi (s)
Westoil B130	91,1	11,4	72,9	15,3
Dr. MAT	138,9	11	111,6	14,6
BEST KA 2000	154,5	11,1	123,3	14,9
Westoil B111	129	11,1	102,9	14,9
Kalıp Ayırıcı Kullanılmadan	155,8	11,1	124,8	15

**Tablo 9.** Ön Gerilme İşlemine Tutulmayan LEXAN 943a Numunelerinin Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları  
(Three Point Bend Test Results of LEXAN 943a Samples Not Prestressed)

Kimyasal Etken Olarak Kalıp Ayırıcılar	Maksimum Yük Değeri (N)	Maks. Ulaşma zamanı Yük Değeri (s)	Kırılma Yükü (N)	Kırılma Süresi (s)
Westoil B130	167,1	11,4	133,5	15,5
Dr. MAT	169,1	11,6	135,1	15,5
BEST KA 2000	167,5	11,5	134,5	15,4
Westoil B111	167,6	11,7	134,2	15,5
Kalıp Ayırıcı Kullanılmadan	173,8	11,8	139,2	15,7

düşük maksimum yük değerine kıyasla herhangi bir kimyasal madde içermeyen maksimum yük değeri 153,2 N'dir. %25,6'nın üzerinde maksimum yük değeri kaybı olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak, tüm polikarbonat reçine türlerinin tüm test süreçlerinde başarısızlığa sahip olduğunu göstermektedir. Tüm polikarbonat reçine tiplerinin, çevresel stresle çatlama ajanı olarak en az bir kalıp ayırıcı



**Şekil 9.** LEXAN 503R Yüzeyi Mikroskobik Görüntüleri a) Kimyasal ajanların kullanılmadığı b) Westoil B111, kaplama çatlakları c) Westoil B130, yüzey çatlakları d) BEST KA 2000, yüzey ve kaplama çatlakları e) Dr.MAT, yüzey ve kaplama çatlakları  
(Microscopic Images of LEXAN 503R Surface a) Chemical agents are not used b) Westoil B111, coating cracks c) Westoil B130, surface cracks d) BEST KA 2000, surface and coating cracks e) Dr.MAT, surface and coating cracks)

**Tablo 10.** LEXAN 943A Test Sonuç Verileri (%1,5 Gerinim Uygulanan Test Sonuçları)  
(LEXAN 943A Test Results Data (After applying 1.5% Strain))

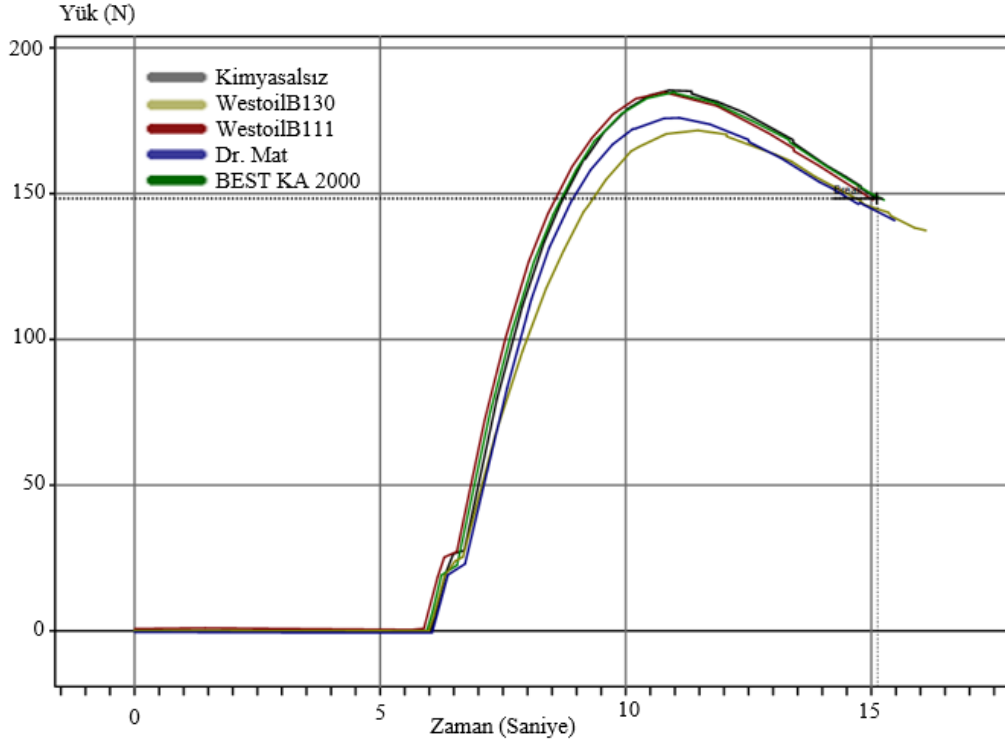
Kimyasal Etken Olarak Kalıp Ayırıcılar	Maksimum Yük Değeri (N)	Maks. Ulaşma zamanı Yük Değeri (s)	Kırılma Yüğü (N)	Kırılma Süresi (s)
Westoil B130	165,9	11,2	133,1	15
Dr. MAT	170,8	11,2	136,4	14,7
BEST KA 2000	171,6	11,4	137,8	15,3
Westoil B111	171,1	11,3	136,9	15,2
Kalıp Ayırıcı Kullanılmadan	171,9	11,1	137,8	14,6

**Tablo 11.** Ön Gerilme İşlemine Tutulmayan LEXAN 9330 Numunelerinin Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları  
(Three Point Bend Test Results of LEXAN 9330 Specimens Not Prestressed)

Kimyasal Etken Olarak Kalıp Ayırıcılar	Maksimum Yük Değeri (N)	Maks. Ulaşma zamanı Yük Değeri (s)	Kırılma Yüğü (N)	Kırılma Süresi (s)
Westoil B130	139,2	11,6	111,9	15,6
Dr. MAT	136	11,6	109,1	15,6
BEST KA 2000	140,2	11,5	112,1	16
Westoil B111	137,7	11,6	110,7	15,5
Kalıp Ayırıcı Kullanılmadan	150,3	11,3	120,3	15,7

ajandan etkilendiğini göstermektedir. Bununla birlikte, üç nokta eğme testlerinde herhangi bir kimyasal madde olmadan test edilen polikarbonat reçine numunelerinin daha başarılı sonuçlar gösterdiği

görülmüştür. Bunun nedeni, sünek bir polimere sabit dış gerilme uygulanması koşuluyla proseslerin sonunda statik yorgunluk gelişir. Bununla birlikte, polikarbonatlar, gerilim çatlağı ile beraber testlerden



Şekil 10. Ön gerilme işlemine tutulmayan LEXAN 503R numunelerinin üç nokta eğme testi eğrileri (Three-point bending test curves of non-prestressing LEXAN 503R specimens)

Tablo 12. LEXAN 9330 Test Sonuçları Verileri (%1,5 Gerilim Uygulanan Test Sonuçları) (LEXAN 9330 Test Results Data (1.5% Strain Applied Test Results))

Kimyasal Etken Olarak Kalıp Ayırıcılar	Maksimum Yük Değeri (N)	Maks. Ulaşma zamanı Yük Değeri (s)	Kırılma Yükü (N)	Kırılma Süresi (s)
Westoil B130	148,4	11	118,3	15
Dr. MAT	113,9	11,3	91,5	15,8
BEST KA 2000	122,1	10,8	97,5	14
Westoil B111	146,3	11,1	117,2	15,3
Kalıp Ayırıcı Kullanılmadan	153,2	11,1	122,7	15,1

başarısız olurken, gevrek kırılma olarak çevresel stres çatlamasıyla karşılaşır. Bu noktada, sünek-kırılgan geçiş önem kazanmakta ve ayrıca gerilme konsantrasyonu nedeniyle yüzey gözenekleri ve mikro çatlak başlangıcı olarak ortaya çıkar. Bu kusurlar, ayrıca kırılma mekanizmaları gevrek kırılma davranışı anlamına gelmektedir. Çatlak başlangıcı ve yüzey gözenekleri, çatlak ve kırılmanın başlangıç adımı olarak nitelendirilebilir. Kimyasal ajanların varlığı çatlak başlangıcını hızlandırır, sonuç olarak havadaki çevresel stres çatlamasından ziyade çatlama süresini kısaltır [18].

Mikroskop altında alınan görüntüden elde edilen diğer sonuçlar, numuneler çatlamasa bile başka kusurların da olacağını göstermektedir. Bir kimyasalın plastik reçine üzerindeki kirlenmesi ve gerilme konsantrasyonu nedeniyle yüzey gözenekleri ve mikro çatlak başlangıcı olarak ortaya çıkar. Bu kusurlar, ayrıca kırılma mekanizmaları gevrek kırılma davranışı anlamına gelmektedir. Çatlak başlangıcı ve yüzey gözenekleri, çatlak ve kırılmanın başlangıç adımı olarak nitelendirilebilir. Kimyasal ajanların varlığı çatlak başlangıcını hızlandırır, sonuç olarak havadaki çevresel stres çatlamasından ziyade çatlama süresini kısaltır [18].

#### 4. Sonuçlar (Conclusions)

Enjeksiyon kalıplama yöntemi polikarbonat malzemelerin seri üretiminde en yaygın kullanılan imalat yöntemi olup üretilen parçanın kalıptan kolayca ayrılması için kalıp yüzeyine kalıp ayırıcı kimyasalların sürülmesi sıklıkla tercih edilen bir uygulamadır. Diğer taraftan, plastiklerde çevresel gerilme çatlaması zamana bağlı olarak

gelişen bir hasar tipi olması nedeniyle müşteri teslimatlarından sonra ortaya çıkabilecek malzeme hasarlarının daha önce de bahsedildiği gibi ortaya çıkacak onarım, yeniden işleme, teslim edilen ürünleri geri çağırma ve müşteri memnuniyetsizliği gibi dış başarısızlık faktörlerinin ve bu nedenlerle oluşacak kalite maliyetlerinin önlenmesi şirketler için kritik öneme sahiptir [19]. Ayrıca, polikarbonat malzemelerin çevresel gerilme çatlaması nedeniyle hasara uğraması da çok yaygın gözlenen bir durumdur. İmalat sürecinde polikarbonat ile üretilmiş malzemelerin yüzeyinde kalacak kimyasal kalıp ayırıcı zamanla malzemenin içerisine nüfuz ederek oluşturduğu ek hidrostatik basınç etkisi ile lokal düşük yoğunluklu mikro düzeyde gerilim alanları oluşturmaktadır. Ayrıca kalıp ayırıcıları gibi kimyasal stres ajanları polimer zincirlerini bağlayan moleküller arası kuvvetlere de böylelikle müdahale etmiş olmaktadır. Çapraz ve yan bağ yapısına zarar vererek malzemenin dayanabileceğinden daha düşük bir çekme gerilmesi altında çevresel gerilme çatlaması hasarına neden olmaktadır. Bu hasar kimyasalın yüzeyde kontaminasyonu sonrası belirtilen mekanizmalarla moleküller çözülme hızlanır ve oluşturduğu sırt çatlakları oluşmaya başlar ve bu çatlaklar ilerleyerek parçada hasar oluşturur. Bu durum moleküler malzemenin dayanabileceğinden daha düşük bir çekme gerilmesi altında çevresel gerilme çatlaması hasarına neden olmaktadır. Polikarbonatların amorf yapısından dolayı kimyasal

gerilim ajanlarına dayanımı göreceli az olduğu için oluşan çatlaklarda etkisi yüksektir. Piyasada yaygın olarak kullanılan kalıp ayırıcı kimyasalların dört farklı polikarbonat malzemenin dayanımına etkisini incelediğimiz bu çalışmada şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- Deneyde kullanılan polikarbonat reçine tiplerinin, çevresel stresle çatlama ajanı olarak en az bir kalıp ayırıcı ajandan etkilendiğini ve testlerden başarısız olduğu tespit edilmiştir. Kimyasal kalıp ayırıcı kullanılarak üretilen ve test edilen numunelerden mikroskop altında elde edilen görüntülerde sır çatlaklarının ve çatlak ilerlemeleri açık şekilde görülmüştür.
- Üç nokta eğme testlerinde herhangi bir kimyasal madde olmadan test edilen polikarbonat reçine numunelerinin daha başarılı sonuçlar gösterdiği görülmüştür. Diğer yandan, kimyasal kalıp ayırıcı ile üretilen numunelerin üç nokta eğme testlerinde en yüksek taşıyan yük değerlerinde dramatik düşüşler görülmüştür.
- Genel olarak kalıp ayırıcı kimyasal kullanılmadan imal edilen polikarbonat numunelerin kalıp ayırıcı kullanılarak imal edilen numunelerden daha dayanıklı olduğu gözlemlenmiştir.
- Kalıp ayırıcı kimyasalların polikarbonat malzemelerin çevresel gerilme çatlamaına neden olduğu, sünek-kırılgan geçişi süresini kısalttığı, moleküler ayrışmayla çatlak oluşumunu ve ilerlemesini hızlandırdığı tespit edilmiştir.

Enjeksiyon kalıplama ile üretilecek olan polikarbonat malzemelerin imalat sürecinde kalıp ayırıcı kimyasalların kullanımı önerilmemektedir, eğer kullanılacaksa da kimyasal ayırıcının polikarbonat malzeme üzerindeki çevresel gerilme çatlamaı direnci ve dayanımı testleri ile derinlemesine incelenmeli, ayrıca FTIR (Fourier Dönüştürümlü Kızılötesi Spektrometresi), CLSM (Konfokal Lazer Tarama Mikroskobu), DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre), Raman spektroskopisi ve TGA (Termogravimetrik Analiz) gibi test yaklaşımları ile iyi analiz edilmelidir. Kullanılan polikarbonat malzemeye göre uygun olan kimyasal kalıp ayırıcı test sonuçlarının parça tasarımı uygunluğuna göre seçilmelidir.

#### Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışmanın yürütülmesinde her türlü desteklerinden dolayı ASELSAN'a, üretim sırasındaki hem bilgi birikimlerini hem de üretim hattını kullanmamıza izin veren EMGE Elektro Mekanik Gereçler Endüstrisi'ne, kalıp tasarımı, üretimi ve teknik konulardaki desteklerinden dolayı Kerem Güngör'e teşekkür ederim.

#### Kaynaklar (References)

1. Kyriacos, D. Polycarbonates. In: Brydson's Plastics Materials. Butterworth-Heinemann, 457-485, 2017.
2. Brunelle, Daniel J., Advances in polycarbonates: An overview, 1-5, 2005.
3. Bendler, J. T., ed. Handbook of polycarbonate science and technology. CRC press, Florida, A.B.D., 1999.
4. Robeson, L. M. Environmental stress cracking: A review. Polymer Engineering & Science, 53 (3), 453-467, 2013.
5. Environmental Stress Crack Resistance. LyondellBasell. <https://www.lyondellbasell.com/globalassets/documents/polymers-technical-literature/tech-topic-environmental-stress-crack-resistance.pdf>. Erişim tarihi Mayıs 23, 2021.
6. Jansen, J. The plastics killer. Advanced Materials and Processes, 50-53, 2004.
7. Yayla P., Şahin Ş., Kılavuz İ., Poliolefin malzemelerde çevresel gerilme çatlak ilerlemesi. Proceedings of 8th International Fracture Conference, İstanbul-Türkiye, 259-268, 7-9 Eylül, 2007.
8. Wright, David. Failure of plastics and rubber products: causes, effects and case studies involving degradation. iSmithers Rapra Publishing, 2001.
9. Kasım H., Demir B., Mechanical and electrical characterization of elastomer-based pressure sensors containing graphene filler material under cycled load, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 37 (1), 407-422, 2021.
10. Zhang, Yi., Measurement of Environmental Stress Cracking Resistance of Polyethylene Pipe: A Review. In: ASME 2019 Asia Pacific Pipeline Conference. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2019.
11. Al-Saidi, Lutfi F.; Mortensen, K., Almdal, K., Environmental stress cracking resistance. Behaviour of polycarbonate in different chemicals by determination of the time-dependence of stress at constant strains. Polymer Degradation and Stability, 82 (3), 451-461, 2003.
12. Nielsen, T. B., Hansen, C. M., Surface wetting and the prediction of environmental stress cracking (ESC) in polymers. Polymer degradation and stability, 89 (3), 513-516, 2005.
13. Ferreira, M. M., Lins, V. de F. C., Failure in automobile headlight lenses. Engineering failure analysis, 104, 844-855, 2019.
14. Andena, L., et al. Determination of environmental stress cracking resistance of polymers: Effects of loading history and testing configuration. Engineering Fracture Mechanics, 101, 33-46, 2013.
15. Raman, A., Farris, R. J., Lesser, A. J., Effect of stress state and polymer morphology on environmental stress cracking in polycarbonate. Journal of applied polymer science, 88 (2), 550-564, 2003.
16. Yan, C., Improvement of environmental stress cracking resistance of polycarbonate by silicone coating. Polymer Testing, 60, 6-11, 2017.
17. Hopmann, C., Influencing the environmental stress cracking resistance of amorphous thermoplastic parts by the example of polycarbonate and water. Polymer Engineering & Science, 59 (1), 361-366, 2019.
18. Şengül, M. ve Taşdemir H.A., The Evidence Of Mold Releasing Agent For Environmental Stress Cracking of Polycarbonates, IMSTEC 5. International Conference on Material Science and Technology, Cappadocia/TURKEY. 166-170, 16-18 Ekim, 2020.
19. Doğruyol Z., Güner S., Examining the impact of product variety on design, supply, and production processes using system dynamics approach, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 36 (3), 1185-1198, 2021.
20. SABIC- Polycarbonate (PC). SABIC- Polycarbonate (PC), <https://www.sabic.com/en/products/polymers/polycarbonate-pc>. Erişim tarihi Mayıs 23, 2021.
21. Bel T., Arslan C., Baydoğan N., Production of PMMA/microsphere/montmorillonite nanocomposite, PMMA /microsphere / halloysite nanocomposite by atom transfer radical polymerization technique and comparison of mechanical properties, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (2), 687-700, 2019.
22. ASTM D790-17 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, in, ASTM International, West Conshohoken, PA, 2017.

