

ULTRA YÜKSEK MOLEKÜLER AĞIRLIKLİ POLİETİLENİN MATKAPLA DELİNMESİNDE ÇAPAK OLUŞUMUNUN TAGUCHİ YAKLAŞIMI İLE İNCELENMESİ

Mihriğül Altan

Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü

Tel: 0-212 383 28 95 meksi@yildiz.edu.tr İstanbul/TÜRKİYE

Özet

Mühendislik plastiklerinden ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE), aşınmaya karşı direnci ve gerilme çatlağına karşı gösterdiği dayanımından ötürü birçok farklı alanda kullanılabilir. Ultra moleküler ağırlıklı polietilenin plastik enjeksiyon gibi kalıpta şekillendirilmesi mümkün değildir. Karmaşık geometri ve dar toleranslı UHMWPE parça imalatında talaşlı şekillendirme yöntemleri uygulanmaktadır. Bu çalışmada, UHMWPE plakaların farklı kesme hızı (30, 40, 50 m/dak), ilerleme (0.006, 0.0125, 0.025 mm/dev) ve takımlarla delinmesinde oluşan çapaklar incelenmiş ve çapak yüksekliğinin azaltılması için Taguchi yaklaşımı kullanılmıştır. Deneysel tasarım aşamasında Taguchi' nin L9 ortogonal dizisi seçilmiştir. Kontrol edilebilir faktörler kesme hızı, ilerleme ve takım olmuştur. Deneysel çalışmada, kaplamasız HSS ve TiN kaplamalı HSS, TiCN kaplamalı HSS olmak üzere üç farklı HSS esaslı spiral matkap kullanılmıştır. Parametrelerin etkinliğinin belirlenmesi için çoklu regresyon analizi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre ilerlemenin ve takımın çapak oluşumu üzerine oldukça etkili olduğu görülmüştür. Özellikle ilerlemenin yüksek değerlerde seçilmesi ve HSS takımın kaplamasız olması çapak yüksekliğini azaltmıştır. Öte yandan, kesme hızının çapak yüksekliği üzerinde çok etkili olmadığı ancak ilerleme ile beraber değerlendirildiğinde, yüksek kesme hızlarında küçük ilerleme seçildiğinde çapak oluşumunun arttığı saptanmıştır.

Anahtar kelimeler: Matkapla delme, çapak oluşumu, UHMWPE, Taguchi

1. Giriş

Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) termoplastik bir malzeme olmasına rağmen yüksek viskozitesinden ötürü plastik enjeksiyon gibi kalıpta şekillendirilme prosesleri ile parça imalatı gerçekleştirilememektedir [1]. Öte yandan, UHMWPE yüksek aşınma direnci, düşük sürtünme özellikleri ve gerilme çatlağına dayanımdan ötürü otomotiv, biyomedikal gibi farklı alanlarda ve çeşitli makina elemanları olarak da kullanılmaktadır [1-3]. Bu uygulama alanları için dar toleransa sahip ve karmaşık geometri UHMWPE parça eldesinde talaşlı imalat yöntemleri kullanılabilir [4]. Özellikle matkapla delik delme, çoklu parçalı ürünlerin montajında sıklıkla kullanılmaktadır

Plastik malzemelerin talaşlı şekillendirme prosesleri ile işlenmesinde talaşlı şekillendirilebilirlik, metal ürünlerde olduğu gibi oluşan kesme kuvvetleri, takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü gibi faktörler dikkate alınarak belirlenir [5]. Bunların ötesinde, çapak oluşumu da talaşlı işlenebilirliğinde etkinliği olan bir faktördür. Çapak, kesilen parçanın kenarında malzemenin plastik deformasyonuna bağlı olarak oluşur [6-7]. Çapak oluşumu parçanın kalitesi üzerinde olumsuz bir faktör olmasının yanı sıra, metal parçaları için montaj esnasında el yaralanmalarına kadar çeşitli problemlere yol açmaktadır [8]. Bunların dışında, ürünün kullanım aşamasında da birtakım sorunlar çıkabilmektedir. Örneğin, belirli bir hızla sahip bir akışkanı veya gazı taşıyan bir tasarımda var olan çapak, akış hızını olumsuz etkileyecektir [9]. Plastikler için el yaralanması gibi bir problemle karşılaşılmasa da boyutsal olarak büyük olan çapaklar diğer benzer sorunları yaratabilmektedir. Ayrıca, çapakların talaşlı işleme prosesinden sonra temizlenmesi hem maliyet hem de zaman açısından istenmemektedir. Çapakların giderilmesinin en

maliyetsiz ve kolay yolu, talaşlı işlem esnasında azaltılmasıdır. Bunun için de uygun kesme parametreleri ve doğru seçilmiş takımlar gerekmektedir [9-12].

Plastiklerin talaşlı işlenmesinde, polimerin visko-elastik davranışından ötürü kesme parametreleri ile kesme şartları arasındaki ilişkiyi tam anlamıyla belirleyebilmek zordur [13]. Plastiklerin talaşlı işlenmesinde parçada gözlemlenen yüzey pürüzlülüğü ve çapak oluşumu malzemenin plastik deformasyonu ile ilgili olup, malzemenin özelliklerinden camsı geçiş sıcaklığı (Tg), ergime sıcaklığı, viskozitesi ve relaksasyonu ile doğrudan ilgilidir [14]. Araştırmacılar [15], amorf polimerlerin talaşlı işlenmesinde camsı geçiş sıcaklığının oldukça önemli olduğunu belirtmişlerdir. Carr ve Feger [16], farklı Tg sıcaklığına ve moleküler ağırlığına sahip takımlarla çalışmış ve elde ettikleri sonuçları zaman-sıcaklık superpozisyon esasına göre yorumlamışlardır. Sonuç olarak, polimerlerin talaşlı işlenmesinde açığa çıkan ısı ile sürünme ve toparlanma davranışları, oluşan çapak miktarlarını veya yüzey pürüzlülüğü etkilemektedir.

Birçok araştırmacı çapak oluşumunu metaller için incelemiştir [6-12]. Mühendislik plastiklerinin endüstriyel uygulamalarda yaygın bir şekilde talaşlı şekillendirme prosesleri ile işlenmesine karşın, plastiklerin talaşlı işlenmesinde çapak oluşumu üzerine bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada, ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilenin spiral matkapla delinmesinde oluşan çapak oluşumu incelenmiştir. Taguchi metoduna göre deneysel tasarımı yapılan çalışmada, kaplanmış ve kaplanmamış HSS takımlarla, farklı kesme hızı, ilerleme değerlerinde çalışılmış ve ideal kesme parametreleri bulunarak çapak yüksekliği minimize edilmiştir.

2. Deneysel Çalışma

2.1 Malzeme ve Deney Düzenegi

Deneysel çalışmada ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen, Ulpolen 1000 (Polikim A.Ş.) kullanılmış olup, özellikleri Tablo 1' de verilmiştir. Ram ekstrüzyon yöntemi ile imal edilmiş olan UHMWPE bloklar, 50 x 50 x 3 mm boyutlarında plakalar halinde kesilmiştir. Kesilen plakalara Benchman VMC- 4000 CNC freze tezgahında delik delinmiştir.

Delik delme işleminde, 8 mm çapında yüksek hız çeliği (HSS) esaslı üç farklı spiral matkap kullanılmıştır. Takımlar, yüzeyi TiN kaplı, TiCN kaplı ve kaplamasız yüksek hız çeliğidir. HSS esaslı takımların kimyasal yapısı Çizelge 2' de verilmiştir.

Çizelge 1 Deneysel çalışmada kullanılan ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilenin özellikleri

Özellik	Ulpolen 1000 (UHMWPE)
Yoğunluk (g/cm ³)	0.94
Moleküler Ağırlık (g/mol)	>4,000,000
Çekme Dayanımı (kg/cm ²)	250
Uzama (%)	>300
Darbe dayanımı (Kj/m ²) (Charpy)	>210
Sertlik (Shore D)	60-68
Ergime sıcaklığı (°C)	130-138
Isıl genleşme katsayısı (°C ⁻¹)	2x10 ⁻⁴

Çizelge 2 HSS takımların kimyasal yapısı (%)

C	Cr	Mo	W	V
0.90	4.1	5.0	6.5	1.8

Delik delme işleminden sonra her bir delikte gözlemlenen çapak yüksekliği optik mikroskop ile ölçülmüştür. Delik etrafında sabit olmayan çapak yüksekliği gözlemlendiği için 10 farklı noktadan alınan ölçümün ortalaması alınmış ve ortalama çapak yüksekliği bulunmuştur.

2.2 Deneysel Tasarım

Taguchi' nin Deneysel Tasarımı, optimizasyon problemlerinin çözümünde başarılı bir metot olarak ortaya çıkmaktadır. Bu metotta, üründe ve proseste değişkenliği oluşturan ve kontrol edilebilen faktörlerin düzeylerinin en uygun kombinasyonunu seçilerek, ürün ve prosesteki değişkenliği en aza indirmeye çalışılmaktadır [17-18]. Taguchi yönteminde, elde edilen deney sonuçları sinyal/gürültü (S/N) oranına çevrilerek değerlendirilir. Sinyal gürültü oranı, herhangi bir deney çıktısını sinyal olarak kabul ederken, proseste kontrol edilemeyen faktörleri gürültü olarak tanımlar. Buradaki amaç, gürültü faktörlerini mümkün olduğu kadar küçük tutarak S/N oranını maksimize etmektir. Sinyal/ gürültü oranı, beklenen hedefin türüne göre üçe ayrılarak tanımlanmaktadır; küçük değer iyi, büyük değer iyi, nominal değer iyi olarak kalite değerinin hedeflendiği değere göre farklı şekillerde belirlenmektedir. [17].

Yapılan bu çalışmada, delik delme işleminde farklı kesme hızları ve farklı ilerleme değerleri seçilmiştir. Değişen takım tipi de kontrol edilebilen faktörler içinde yer almıştır. Deneysel çalışmada kullanılan faktörlerin seviyeleri Çizelge 3' te verilmiştir. Bu çalışma için Taguchi' nin L9 ortogonal dizisi (OA) seçilmiştir. L9 ortogonal dizisinde 3. kolona kesme hızı ile ilerlemenin etkileşimi atanmıştır (Çizelge 4).

Çizelge 3 Faktörlerin seviyeleri

Faktörler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 2
<u>A</u> , Kesme hızı [m/dak]	30	40	50
<u>B</u> , İlerleme [mm/dev]	0.006	0.0125	0.025
<u>C</u> , Takım tipi, HSS	Kaplanmamış	TiN Kaplı	TiCN Kaplı

Çizelge 4 L9 OA dizi

No	Kesme hızı [m/dak] <u>A</u>	İlerleme [mm/dev] <u>B</u>	Kesme hızı x İlerleme <u>A x B</u>	Takım tipi <u>C</u>
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Kalite karakteristiği olarak çapak yüksekliği esas alınmıştır. Sinyal/Gürültü oranı fonksiyon olarak kullanıldığında, minimum çapak yüksekliği için en küçük değer en iyi kalite karakteristiği seçilmiştir. S/N' nin hesaplanmasında kullanılan Denklem (1)' e göre n deney seti sayısı, yi ise her deney setine karşılık gelen çapak yüksekliğidir. Denklem 1' e göre her bir deney setine karşılık gelen S/N oranı Çizelge 5' te verilmiştir.

$$S / N = -10 \log \left[\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (1)$$

Tablo 5. S/N oranları

No	Kesme hızı [m/dak]	İlerleme [mm/dev]	Takım tipi (HSS)	Ortalama Çapak yüksekliği [mm]	S/N [dB]
	<u>A</u>	<u>B</u>	<u>C</u>		
1	30	0.006	Kaplamasız	0.184	14.704
2	30	0.0125	TiN Kaplı	0.340	9.370
3	30	0.025	TiCN Kaplı	0.260	11.701
4	40	0.006	TiCN Kaplı	0.800	1.938
5	40	0.0125	Kaplamasız	0.100	20.000
6	40	0.025	TiN Kaplı	0.256	11.835
7	50	0.006	TiN Kaplı	0.760	2.384
8	50	0.0125	TiCN Kaplı	0.290	10.752
9	50	0.025	Kaplamasız	0.099	20.079

3. Sonuçlar ve Tartışma

Çapak, delik delme işleminde plastik olarak deforme olmuş malzeme olup, delik çıkışı ve/veya girişinde gözlemlenir. Çapaklar görsel kusur olmanın yanı sıra, montaj aşamasında da sorun yaratabilmektedir. Delik delme sonrası çapakların temizlenmesi hem maliyet hem de zaman kaybı nedeniyle istenmez. Bu sebeple, delik delme işlemi esnasında çapakları minimize etmek en uygun yöntemdir. Bu çalışmada, farklı kesme hızı ve ilerleme değerleri denenmiş ve aynı zamanda kaplamalı ve kaplamasız HSS takımlar kullanılmıştır. Parametrelerin etkinliğinin belirlenmesi amacıyla ve parametreler ile çapak yüksekliği arasındaki korelasyonu elde edebilmek için çoklu regresyon analizi uygulanmıştır. Çizelge 6' da verilen regresyon sonuçlarına göre kesme hızının p-değeri 0.4336 olduğu için ve bu değer 0.10' dan büyük olduğu için, kesme hızının çapak yüksekliği üzerinde %90 güvenilirlikte etkinliği olmadığı görülmüştür. En etkili faktörün ilerlemenin ve takımın olduğu saptanmıştır.

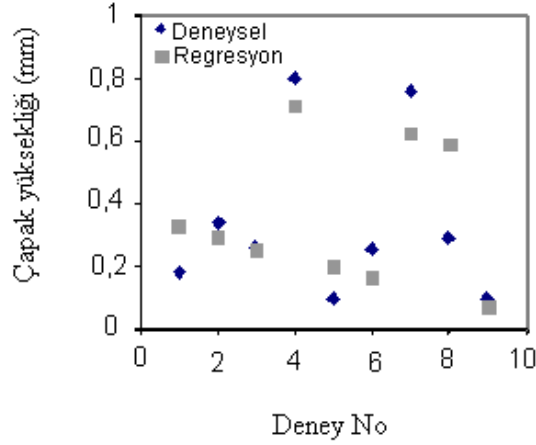
Çizelge 6 Çapak yüksekliği ile kontrol edilebilen parametreler için çoklu regresyon analizi sonuçları

Parametre	Tahmin	Standard Hata	T- test	P-değeri
Sabit	0.275533	0.254494	1.08267	0.3284
Kesme hızı (m/dak)	0.06085	0.0715066	0.833074	0.4336
İlerleme (mm/dev)	-0.18815	0.0715066	-2.57589	0.0465
Takım tipi	0.16115	0.0715066	2.25364	0.0739

Çoklu regresyon analizinden elde edilmiş model Denklem 2' de verilmiştir. Denklemde v kesme hızını, f ilerlemeyi ve t ise takımını ifade etmektedir. f(x) ise çapak yüksekliğini ifade etmektedir

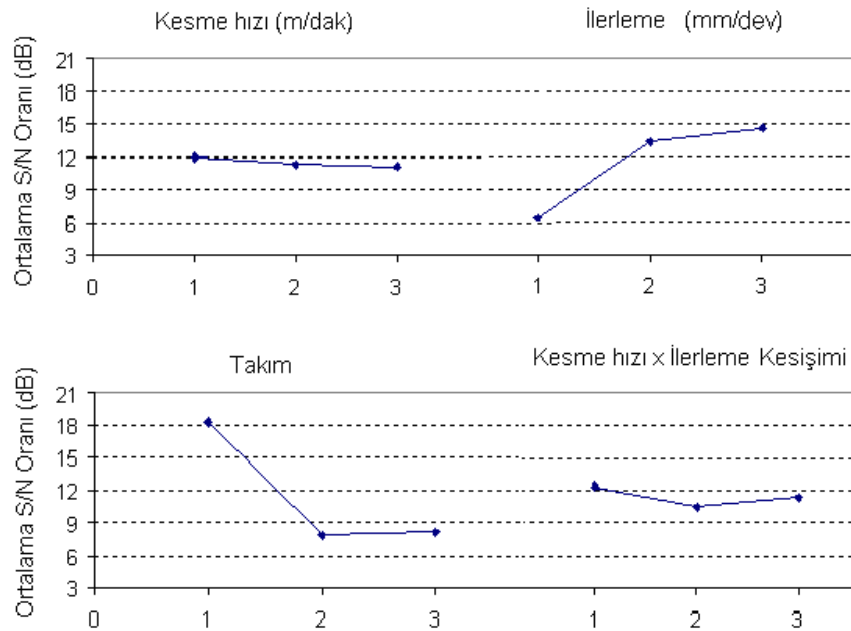
$$f(x) = 0,275533 + 0,06085.v - 0,18815.f + 0,16115.t \quad (2)$$

Yapılan çalışmada elde edilen regresyon modeli sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında Şekil 1 elde edilmiştir.



Şekil 1 Deneysel ve regresyon modeli sonuçlarının karşılaştırılması

Taguchi metoduna göre optimum parametrelerin belirlenmesinde sinyal/gürültü oranı kullanılmaktadır. Gürültü miktarı ne kadar küçükse, başka bir ifade ile kontrol edilemeyen parametreler ne kadar az ise S/N oranı o kadar büyük olacaktır. Optimum şartın elde edilebilmesi için gürültü oranının az olması beklenir. Bu nedenle Şekil 2' de verilen ortalama S/N grafiklerinde en büyük S/N değerleri seçildiğinde optimum parametre kombinasyonu A1B3C1 olmuştur. A1B3C1, 30 m/dak kesme hızı (A1), 0.025 mm/dak ilerleme (B3) ve kaplanmamış HSS takım (C1) parametre kombinasyonu, Çizelge 5' te verilen deney planında olmadığı için bu deney seti için doğrulama testi yapılmıştır. Doğrulama testi sonucunda ortalama 0.072 mm yüksekliğinde en küçük çapak yüksekliği elde edilmiştir.



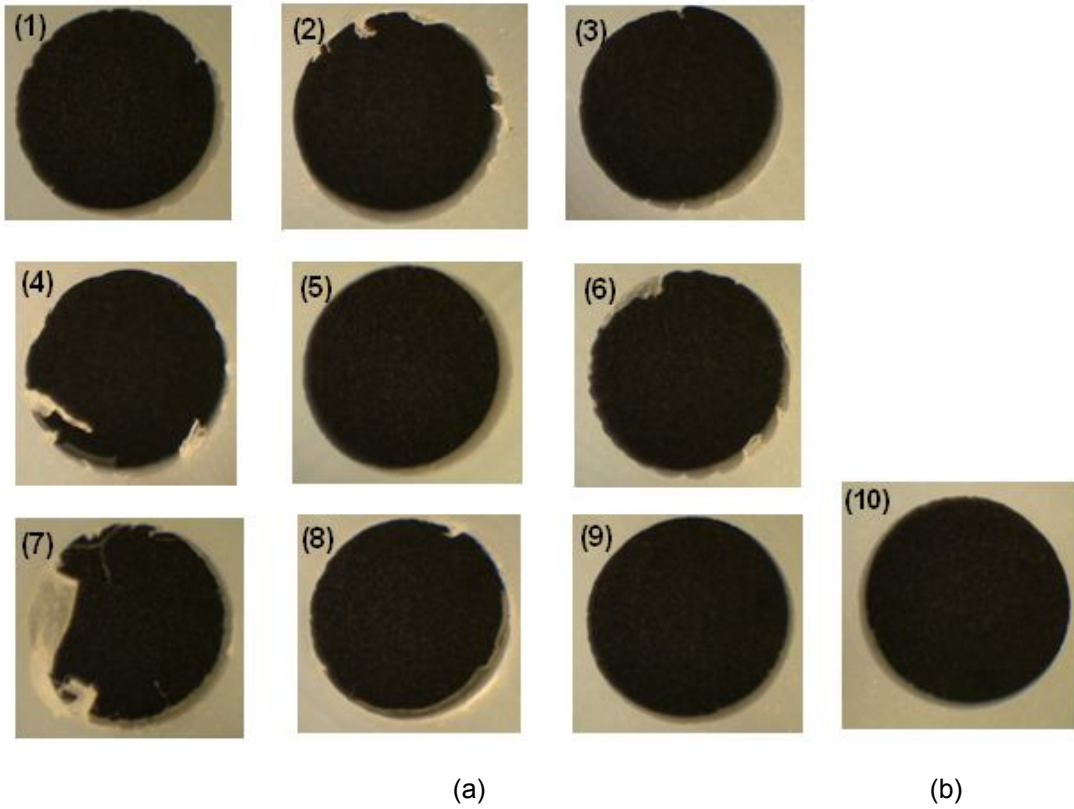
Şekil 2 Proses parametrelerine bağlı ortalama S/N oranları

Deney parametrelerinden kesme hızının etkinliği az olurken, kesme hızında gözlemlenen küçük bir artış ile çapak yüksekliğinin arttığı görülmüştür. Bunun sebebi, artan kesme hızının kesme bölgesinde sıcaklığı yükseltmesi ve malzemeyi daha fazla deforme etmesidir. Carr ve Feger' e [16] göre, artan takım hızları, polimerin relaksasyona uğrayamayacağı kalıcı deformasyonlara neden olmaktadır. Düşük kesme hızlarında çalışıldığında, polimer malzeme toparlanmak için daha çok zaman bulabilmekte ve bu durumda da çapak yüksekliği azalmaktadır.

İlerleme hızı etkin parametre olarak bulunmuştur. Birçok araştırmacının metal üzerine yaptığı çalışmalarda, yüksek ilerleme değerlerinde yüksek çapak değerleri görülmüştür [11-12]. Bunun sebebi, artan ilerlemenin kesme kuvvetlerini artırıp malzemenin daha çok deforme olmasına neden olmasıdır. Ayrıca; ilerleme artınca, zamanla takımındaki aşınma da artmakta bu durumda çapak boyutu artmaktadır. Ancak bu çalışmada tersi bir durum gözlemlenmiştir, yüksek ilerleme değerleri daha küçük çapak değerleri vermiştir. Plastik malzemelerde ısı iletkenliği düşüktür. Dolayısıyla, bu çalışmada, seçilen ilerleme aralığında, ilerlemenin yüksek alınması çapağın azalması yönünden etkili olmuştur. Çünkü, artan ilerleme ile takım üzerindeki ısı, plastik iş parçasının takımın ilerleme yönünde çok fazla etkili olmamakta ve buna bağlı olarak plastik malzeme fazla deformasyona uğramadığından daha küçük çapak oluşmaktadır. Ayrıca, küçük ilerleme değerlerinde çalışıldığında, parçada kesilmeden çok malzemenin sıvanması baskın rol oynamaktadır. Buna bağlı olarak da takım parçadan ayrılırken daha fazla çapak oluşabilmektedir.

Takımın kaplı olması çapak oluşumu üzerinde oldukça etkili olmuştur. Takımlar kaplı olduklarında, kaplama özelliklerine bağlı olarak genellikle ömürleri artmakta fakat ısı iletkenlikleri azalmaktadır [19-20]. Bu çalışmada herhangi bir kesme sıvısı veya soğutucu kullanılmamıştır. Bu nedenle polimer malzemeyi kaplanmış takım ile işlerken takımların ısı iletkenlikleri azaldığından, daha çok ısınan takım ile işlenen polimer daha çok deforme olmuştur. Bu nedenle, Şekil 2' de görüldüğü gibi, TiCN kaplı takımda oluşan çapak yüksekliği, TiN kaplı takım ile oluşandan biraz daha küçüktür. Bu nedenle sürtünme ve ısı etkisi ile deformasyona uğrayan malzemede, takım deliği terk ederken çapak oluşumu artmıştır. Öte yandan, kaplamasız HSS takımında, takım ısıyı kendi üzerine aldığından daha az deforme olan iş parçasında daha küçük çapak oluşumu görülmüştür.

Çizelge 5' te verilen deney şartlarına karşılık gelen çapak fotoğrafları Şekil 3' de verilmiştir. Optimum deney şartına (A1B3C1) karşılık gelen çapağın fotoğrafı ise 10 numaralı delikte verilmiştir.



Şekil 3 Optik mikroskopla çekilmiş delik fotoğrafları (X 10 büyütme)
a-Optimizasyon öncesi b- Optimizasyon sonrası (A1B3C1)

4. Sonuç

Yapılan bu çalışmada, talaşlı işlenerek şekillendirilmesi oldukça yaygın olan mühendislik plastiklerinden ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilenin matkapla delinmesinde oluşan çapak yüksekliği incelenmiştir. Taguchi' nin L9 deneysel tasarımına göre hazırlanan deney planında, kesme hızı, ilerleme ve takım tipi kontrol edilebilen faktörler olarak alınmıştır. Takımlar kaplamalı (TiC, TiCN) ve kaplamasız HSS esaslı takımlardır. Hem Taguchi hem de çoklu regresyon sonuçlarına göre ilerleme ve takım, çapak oluşumunu üzerine etkili faktörler olmuştur. Kaplamalı HSS takımlardaki ısı iletkenliğinin kaplamasız olana göre az olması, polimer malzemeyi daha fazla deforme etmiştir. Isınan ve deforme olan polimerde daha çok çapak görülmüştür. İlerleme arttıkça çapak yüksekliğinde azalma saptanmıştır çünkü ilerleme arttığında, takım delik boyunca daha büyük ilerleme değerleri ile hareket etmekte ve buna bağlı olarak oluşan ısının bölgesel etkinliği azalmıştır. Ayrıca, küçük ilerleme ile çalışıldığında polimer malzemede kesilmeden çok sıvanma meydana gelmiştir. Bu durumda da daha yüksek çapak değerleri elde edilmiştir. Kesme hızının çapak üzerine tekil etkinliği oldukça az iken, ilerleme ile beraber değerlendirildiğinde yüksek kesme hızları ve küçük ilerleme değerleri çapak oluşumunu arttırmıştır.

Kaynaklar

[1] Kurtz, S.M., Ultra high molecular weight handbook, Elsevier Academic Press, 2004.

[2] Barnetson, A., ve Hornsby, P.R., Observations on sintering of ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) powder, Journal of Materials Science Letters, 14,1995, 80-84.

- [3] Chen, K.C., Ellis, E.J., Crugnola, A., Effects of molding cycle on the molecular structure and abrasion resistance of ultra high molecular weight polyethylene, ANTEC 81, 1981, 270-272.
- [4] Salles, J.L.C., Gonçalves, M.T.T., Effects of machining parameters on surface quality of ultra high molecular weight polyethylene, materials, 8 (1), 2003, 1-10.
- [5] Davim, J.P, Taguchi approach for achieving better machinability in unreinforced and reinforced polyamides, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 27(9), 2008, 909-924.
- [6] Gillespie, L.K., Blotter, P.K., The formation and properties of machining burrs, Trans.of ASME, Journal of Engineering for Industry, 1976, 64-74.
- [7] Gaitonde, V.N, Karnik, S.R., Achhyutha B.T., Siddeswarappa B., Taguchi optimization in drilling of aisi 316l stainless steel to minimize burr size using multi performance objective based on membership function, Journal of Materials Processing Technology, 202, 2008, 374-379.
- [8] Nakayama, K. and Arai, M., Burr formation in metal cutting, Annals of the CIRP, 36, 1987, 33-36.
- [9] Aurich, J.C., Dornfeld, D., Arrazola, P.J., Franke, V., Leitz, L., Min, S., Burrs-analysis, control and removal, CIRP Annals, Manufacturing Technology, 58, 2009, 519-542.
- [10] Lee, K., Dornfeld, D.A., Micro Burr formation and minimization through process control, Precision Engineering, 29, 2005, 246-252.
- [11] Ko, S.L., Chang, J.E., Yang, G.E., Burr minimizing scheme in drilling, Journal of Materials Processing Technology, 140, 2003, 237-242.
- [12] Gaitonde, V.N, Karnik S.R., Achhyutha B.T., Siddeswarappa B., Genetic algorithm –based burr size minimization in drilling of AISI316 stainless steel, Journal of Materials Processing Technology, 197, 2008, 225-236.
- [13] Xiao, K.Q., Zhang, L.C., The Role of Viscous Deformation in the Machining of Polymers, International Journal of Mechanical Sciences, 44, 2002, 2317-2336.
- [14] Kobayashi, A.K., Saito, K., On the Cutting Mechanism of High Polymers, Journal of Polymer Science, 58, 1962, 1377-1395.
- [15] Ferecau, C., Stan, F., Popa, V., Machining and surface integrity of polymeric materials, International Journal of Material Forming, 1(1), 515-518, 2008.
- [16] Carr, J.W, Feger, C., Ultraprecision machining of polymers, Precision Engineering, 15, 1993, 221-237.
- [17] Ross, P.J., Taguchi techniques for quality engineering, McGraw Hill, 1996.
- [18] Taguchi G., An introduction to quality engineering, Asian Productivity Organization, Tokyo,1986.
- [19] Brito, R.F., Carvalho, S.R., Silva, L.M.M.S., Ferreira, J.R., Thermal analysis in coated cutting tools, Internation Communications in Heat and Mass Transfer, 36, 2009, 314-21.
- [20] Kusiak, A., Battaglia, J.L., Rech, J., Tool coatings influence on the heat transfer in tool during machining, Surface and Coatings Technology, 195, 2005, 29-40.