

## SANDVIÇ KOMPOZİTLERİN DELİNMESİNDE DELAMİNASYON FAKTÖRÜNÜN İNCELENMESİ

*Abdil KUŞ\**  
*Ergün EKİCİ\*\**

Alınma: 30.09.2016; düzeltme: 22.09.2017; kabul: 02.11.2017

**Öz:** Bu çalışmada bal peteği geometrisinde farklı çekirdek malzemelerden üretilen sandviç kompozitlerin delinmesinde delik giriş ve çıkış bölgesinde oluşan delaminasyon faktörü araştırılmıştır. Taguchi metodu L<sub>18</sub> tasarımına göre yapılan deneylerde kontrol faktörleri olarak kesme hızı, ilerleme miktarı ve çekirdek malzeme tipi esas alınmıştır. Deneyler CNC dik işleme merkezinde 6,3 mm çapında TiAlN kaplı karbür matkap kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca %95 güven seviyesinde varyans analizi (ANOVA) uygulanmış, giriş ve çıkış bölgeleri hasarı için optimum parametreler belirlenmiştir. Her iki numunede delme işlemi sonrasında tüm deney şartlarında deliklerin optik görüntüleri alınmış ve en yüksek kesme parametreleri için delik çıkış bölgesinde oluşan hasar tipleri incelenmiştir. Delaminasyon faktörü üzerinde en etkili parametre delik giriş bölgesi için %46 katkı oranı ile kesme hızı, çıkış bölgesi içinse %32,8 katkı oranı ile ilerleme miktarı olmuştur. Özellikle delik çıkış bölgesinde oluşan hasar tipleri delaminasyon, kesilmemiş elyaf ve parçalanma olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Sandviç kompozit, Delaminasyon faktörü, Nomex, Taguchi metodu, Delik delme.

### Analysis of Delamination Factor in the Drilling of Sandwich Composites

**Abstract:** In this study the delamination factor forming on the in and out areas of the hole in drilling of sandwich composites fabricated by using different core materials with honeycomb geometry was analyzed. Cutting speed, feed rate, and core material type were taken as the controlling factors in the experiments carried out according to Taguchi method L18 design. The experiments were carried out on a CNC vertical machining center using TiAlN coated carbide drill with a diameter of 6,3 mm. Moreover, an analysis of variance (ANOVA) with a 95% confidence level was applied and the optimal parameters for the damages on the in and out areas were determined. Optical images of the holes were taken in all test conditions after the drilling of every two specimens, and the damage types forming on the out area of the hole were analyzed for the optimal cutting parameters. The most effective parameter on the delamination factor was the cutting rate with a contribution rate of 46% for the hole entrance zone and the feed rate with the contribution rate of 32.8% for the exit zone. In particular, the types of damage that occurred in the hole exit zone were found delamination, uncut fibers, and cracking.

**Keywords:** Sandwich composite, Delamination factor, Nomex, Taguchi method, Drilling.

## 1. GİRİŞ

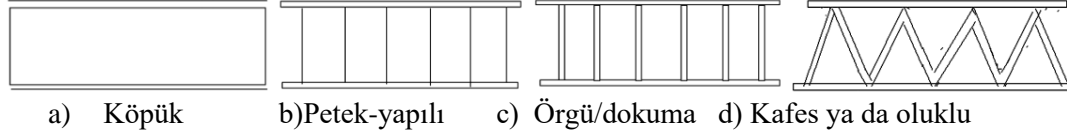
Sandviç panel geleneksel metalik kompozit yapı elemanlarına kıyasla ağırlık/yüksek rijitlik oranı nedeniyle havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılan yapısal elemandır (Arunkumar

\*Uludağ Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Görükle-Bursa TURKEY)

\*\*Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Çanakkale

İletişim Yazarı: Abdil KUŞ ( abdikus@uludag.edu.tr)

ve ark., 2016). Sandviç paneller sert alt üst yapı ile nispeten yumuşak içyapıdan meydana gelmektedir. Genel olarak kullanılan sandviç yapı tipleri Şekil 1’de sunulmuştur (Vinson, 2001).



**Şekil 1.**

*Sandviç yapıların tipleri (Vinson, 2001).*

Sandviç yapıların üretim süreçleri çok farklı olmakla birlikte delme işlemi montaj için yaygın kullanılan işleme yöntemlerinden biridir. Sandviç yapıların delinmesinde elyafların çekilmesi, düzensiz toz talaş ve delaminasyon karşılaşılan tipik sorunlardır. Delaminasyon delik giriş ve çıkış bölgeleri olmak üzere iki şekilde incelenmektedir. Delik üst yüzeyi çevresi etrafında meydana geldiği zaman, “peel-up” delaminasyonu ya da sadece delik giriş delaminasyonu olarak tanımlanır. Delik çıkış bölgesinde “push-out” delaminasyonu ya da delik çıkış delaminasyonu olarak bilinir ve malzemenin en alttaki yüzey katında daha şiddetlidir (Dharanve Won, 2000). CFRP (Karbon elyaf takviyeli polimer kompozit) delinmesinde delaminasyon faktörünün azaltılması üzerine literatürde birçok araştırma yapılmıştır (Gaitondeve ark., 2011, Grilove ark., 2013, Xuve ark., 2014, Çelikve ark., 2014, Karpatve ark., 2012). Ariffin et al., Boeing firmasından temin ettikleri sandviç kompozitlerin kesme parametreleri ve matkap çapına (3, 6 mm) bağlı olarak HSS ve karbür matkaplarla delinmesinde delaminasyon faktörünü araştırmışlardır. Orta kesme hızı ve HSS takım ile minimum hasar, düşük kesme hızı ve karbür takımında maksimum hasarın oluştuğunu belirtmişlerdir (Ariffinve ark., 2009). Sharma et al., poliüretan köpük kompozit sandviç yapıların delinmesinde kesme hızı, ilerleme miktarı ve delme boyunun delaminasyon faktörü üzerindeki etkilerini Taguchi metodu yardımıyla araştırmışlardır. Delaminasyon faktörü üzerinde en etkili parametrenin kesme hızı olduğunu ve onu etki bakımından sırasıyla delme boyu ve ilerleme miktarının takip ettiğini belirtmişlerdir (Sharma ve ark., 2006). Khoran et al., farklı çekirdek malzemelerle oluşturulmuş cam elyaf takviyeli kompozitlerin delinmesinde kesme parametreleri ve takım çapına bağlı olarak delaminasyon faktörünü araştırmışlardır. Delaminasyon faktörü üzerinde en etkili parametrenin ilerleme miktarı olduğu onu kesme hızı ve takım çapının takip ettiğini belirtmişlerdir (Khoranve ark., 2015).

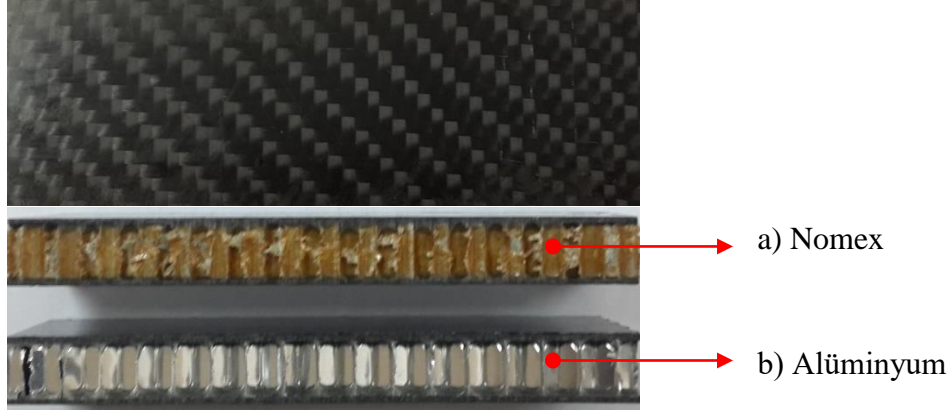
Literatürde sandviç kompozitlerin delinmesi üzerine yeterli çalışma yapılmadığı görülmektedir. Bu çalışma ile farklı çekirdek malzemesine sahip sandviç kompozitlerin delinmesinde kesme parametrelerinin delaminasyon faktörü üzerindeki etkileri değerlendirilerek yapılacak yeni çalışmalara ışık tutması düşünülmektedir.

## 2. MALZEME METOT

### 2.1. Sandviç Kompozitlerin Üretimi

Karbon elyaf takviyeli polimer kompozit (CFRP) plakalar, (0°/90°/0°) lamina oryantasyonuna göre 3 kat vakum infüzyon prosesi ile TOFAŞ prototip merkezinde üretilmiştir. Kompozit plakalar için CW200B 3 K Twill karbon kumaş, reçine olarak ise (sandviçpox® El 2200) epoxy reçine ve %20 oranında sertleştirici (Sandviçpox®Eh-2900) kullanılmıştır. Lif hacimsel oranı 40% seçilmiştir. Elde edilen karbon plakalar oda sıcaklığında 12 saatlik polimerizasyon (cure) işlemine tabii tutulmuş ve 100°C de ise 1 saat fırında post cure işlemi yapılmıştır. Alüminyum ve nomex bal peteği olmak üzere 10 mm kalınlığında iki farklı tür iç dolgu (çekirdek) malzemesi kullanılmıştır. Alt ve üst kattaki CFRP katmanların nomex ve alüminyum bal peteği çekirdek malzemesi ile birleştirilmesinde Araldite AW106-HV953U

yapıştırıcı kullanılmıştır. Yapıştırma sonrasında plakalar 40x120 mm ölçülerinde kesilerek deney numuneleri hazırlanmıştır (Şekil 2).



**Şekil 2:**  
*Sandviç kompozit numuneler a)Nomex ve b) Alüminyum*

## 2.2.Delme deneyleri

Delme deneyleri, maksimum 8000 dev/dak ve 7,5 kW güce sahip AWEA AV-610 marka CNC dik işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. CFRP'nin delinmesinde yaygın kullanılan matkap çap ve uç açısına uygun olarak Tablo 1'de özelliği verilen karbür matkap kullanılmıştır.

**Tablo 1. Matkabin özellikleri**

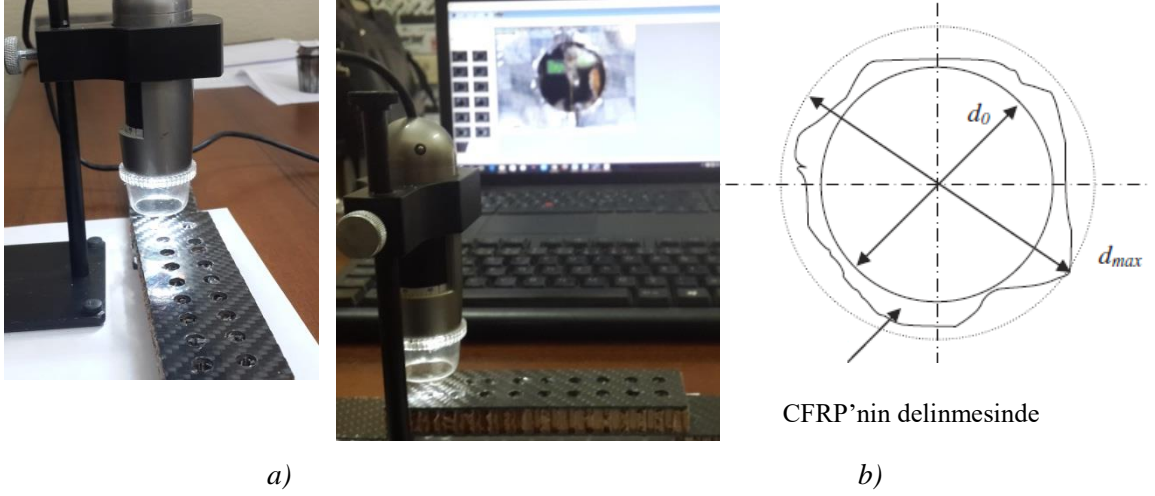
Takım malzemesi	Karbür
Takım referansı	DIN 6539
Çapı	6,3 mm
Kaplama	TiAlN
Uç açısı	140°
Helis açısı	20°

Delme deneyleri boydan boya kuru kesme şartlarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan kontrol faktörleri ve faktör seviyeleri Tablo2'de sunulmuştur.

**Tablo 2. Deneylerde kullanılan kontrol faktörleri ve seviyeleri**

Seviyeler	Kontrol faktörleri		
	A-Çekirdek malzeme	B-Kesme hızı, [Vc, m/dk]	C-İlerleme miktarı, [f, mm/dev]
1	Alüminyum	60	0,05
2	Nomex	84	0,07
3	-	118	0,1

Sandviç kompozitlerin delinmesi sonrasında delik giriş ve çıkış bölgesinde oluşan hasarın ölçümünde Dino-lite optik mikroskop kullanılmıştır (Şekil 3.a). Delaminasyon faktörünün (Fd) hesaplanmasında delik çevresinde oluşan maksimum hasar çapının ( $d_{max}$ ) delik çapına ( $d_o$ ) bölünmesiyle elde edilmiştir (Şekil 3.b).



**Şekil 3:**  
a) Delik hasarının ölçümü, b) Delaminasyon faktörünün hesaplanması

### 2.3. Optimization and Modeling

Farklı çekirdek malzemeler ile üretilen sandviç kompozitlerin kesme parametrelerine bağlı olarak delinmesinde kontrol faktörlerinin delik giriş ve çıkış bölgesinde oluşan hasarın üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesinde Taguchi yöntemi kullanılmıştır.  $L_{18}(2^1 \times 3^7)$  dizisine göre oluşturulan deneysel tasarımda minimum hasar istendiğinden dolayı “en düşük en iyi” yaklaşımı kullanılmıştır (Eşitlik 1).

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

Optimum parametrelerin belirlenmesinde sinyal gürültü S/N oranları esas alınmıştır. Ayrıca parametre etkilerinin belirlenmesi için %95 güven seviyesinde varyans analizi ANOVA uygulanmıştır.

## 3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

### 3.1. Taguchi Yöntemi Analizi

Seçilen ortogonal diziye göre gerçekleştirilen 18 deney sonrası delik giriş ve çıkış bölgesi gözlemlenen delaminasyon faktörü (DF) değerleri ve S/N oranları Tablo 3’te sunulmuştur.

Kontrol faktörlerinin tüm seviyeleri için giriş ve çıkış delaminasyon faktörü ortalama S/N oranları değerleri Tablo 4’te sunulmuştur.

Kontrol faktörlerinin optimum parametrelerinin belirlenmesinde en yüksek S/N oranı esas alınmaktadır. Buna göre giriş bölgesinde oluşan delaminasyon faktörü (1,0302) için en düşük S/N oranı -0,258768 dB olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde çıkış bölgesinde oluşan delaminasyon faktörü (1,0885) için S/N oranı -0,38133 dB olarak hesaplanmıştır. Kontrol faktörlerinin delik giriş bölgesi delaminasyon faktörü üzerindeki etkilerini belirten ortalama S/N grafikleri (Şekil 4), delik çıkış bölgesi delaminasyon faktörü ortalama S/N grafikleri ise Şekil 5’te sunulmuştur. Delik giriş bölgesi hasarı için kesme hızı ve ilerleme miktarının artmasına paralel delaminasyon faktörünün arttığı görülmektedir. Literatürde yüksek ilerleme miktarının yüksek itme kuvveti ve moment oluşturduğu birçok araştırmacı tarafından bildirilmiştir (Krishnarajve ark., 2012, Gaitondeve ark., 2008). İlerleme miktarının artışı devir başına delinecek CFRP kalınlığının artması ile ilişkilidir. Bununla birlikte artan kesme hızı (devir sayısı) artışına paralel olarak matris malzemesi aşırı ısınmaktadır. Bu durum delme sürecinde

CFRP'nin rijitliğinin azalmasına ve liflerin serbest kalmasına neden olarak liflerin kesilmesini zorlaştırır (Marques ve ark., 2009). Bunun doğal sonucu olarak ta delaminasyon artar.

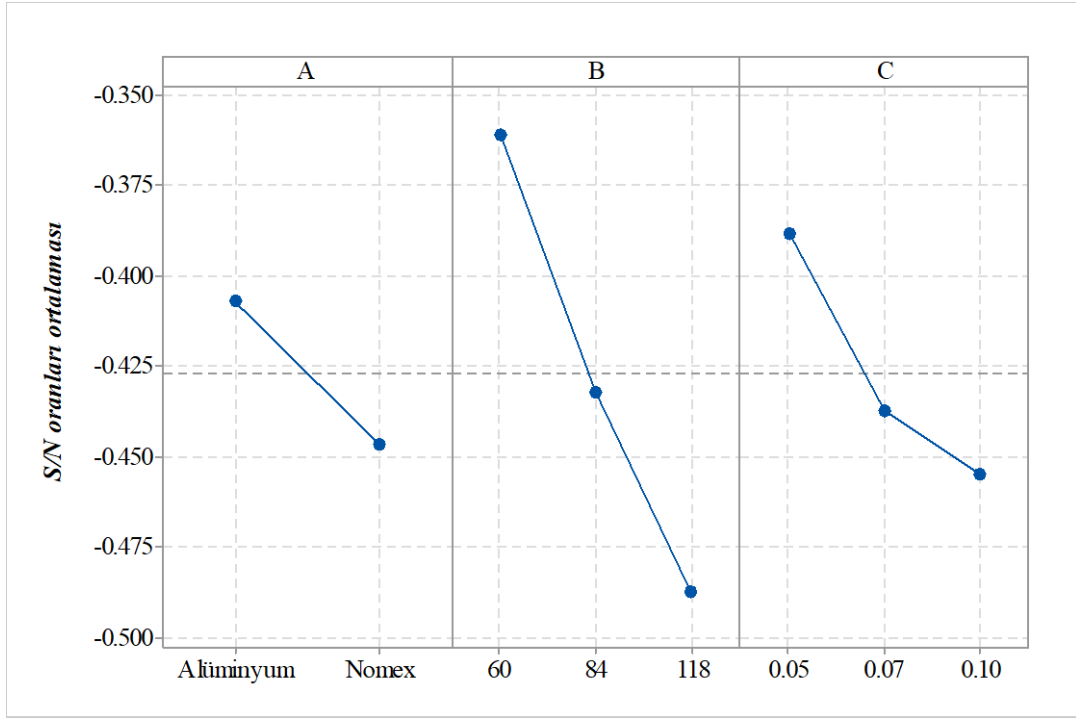
**Tablo 3.  $L_{18} (2^1 \times 3^2)$  ortogonal dizi, deneysel sonuçlar ve S/N oranları**

Deney No	A	B	C	Yanıtlar		S/N oranı [dB]	
				Giriş-DF	Çıkış-DF	Giriş-DF	Çıkış-DF
1	Alüminyum (1)	60	0,05	1,0444	1,1124	-0,377298	-0,86628
2			0,07	1,0460	1,0978	-0,390491	-0,89183
3			0,1	1,0480	1,1338	-0,407179	-1,09109
4		84	0,05	1,0441	1,1139	-0,374525	-0,80996
5			0,07	1,0449	1,0885	-0,381339	-0,75319
6			0,1	1,0531	1,1039	-0,449138	-0,85833
7		118	0,05	1,0476	1,1240	-0,404238	-0,93335
8			0,07	1,0485	1,0978	-0,411236	-0,94602
9			0,1	1,0552	1,1373	-0,466311	-1,11729
10	Nomex (2)	60	0,05	1,0302	1,1279	-0,258768	-1,04564
11			0,07	1,0513	1,1213	-0,347768	-0,99470
12			0,1	1,0417	1,1400	-0,384582	-1,13827
13		84	0,05	1,0563	1,1009	-0,399308	-0,83464
14			0,07	1,0610	1,1021	-0,513934	-0,84425
15			0,1	1,0488	1,1720	-0,474259	-1,37867
16		118	0,05	1,0716	1,1488	-0,514836	-1,20510
17			0,07	1,0689	1,1389	-0,578783	-1,12997
18			0,1	1,0528	1,2181	-0,546830	-1,71361

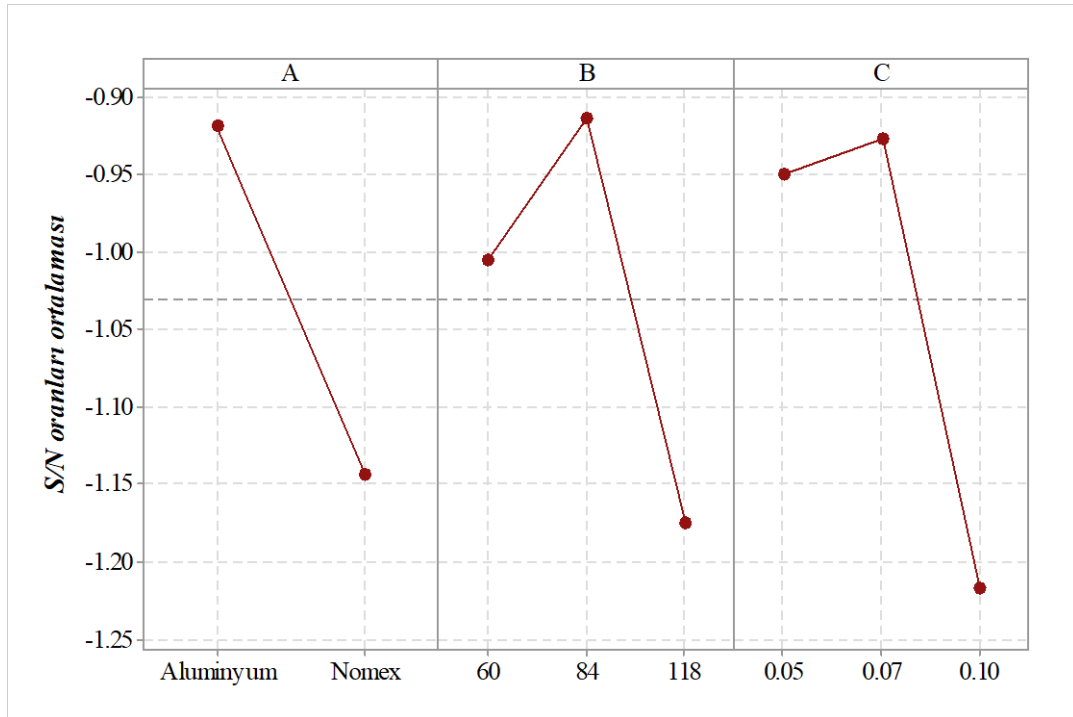
**Tablo 4. Giriş ve çıkış delaminasyonu için S/N yanıt tablosu**

Seviye	Giriş-DF			Çıkış-DF		
	A	B	C	A	B	C
1	-0,4069	-0,3610	-0,3882	-0,9186	-1,0046	-0,9492
2	-0,4466	-0,4321	-0,4373	-1,1428	-0,9132	-0,9267
3	-	-0,4870	-0,4547	-	-1,1742	-1,2162
Delta	0,0397	0,1260	0,0666	0,2242	0,2611	0,2895
Sıra	3	1	2	3	2	1

\*Optimum seviye



**Şekil 4:**  
Giriş delaminasyon faktörü S/N oranları için ana etki grafiği



**Şekil 5:**  
Çıkış delaminasyon faktörü S/N oranları için ana etki grafiği

**Tablo 5. Giriş delaminasyon faktörü için ANOVA sonuçları**

Kaynak	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Varyans	F	P	Katkı oranı (%)
A	1	0,000106	0,000106	9,13	0,039	6,964
B	2	0,000701	0,0003505	30,07	0,004	46,057
C	2	0,000208	0,000104	8,92	0,034	13,666
A*B	2	0,000374	0,000187	16,02	0,012	24,572
A*C	2	0,000076	0,000038	3,24	0,146	4,993
B*C	4	0,00001	0,0000025	0,21	0,921	0,657
Artık hata	4	0,000047	1,175E-05			3,088
Toplam	17	0,001521				100

$$R^2 = \%96,9 \quad R^2(\text{düzeltilmiş}) = \%87$$

Delik çıkış bölgesi delaminasyon faktörü için ANOVA sonuçları Tablo 6 incelendiğinde çekirdek malzeme tipi ve ilerleme miktarının anlamlı bir etkisinin ( $P < 0.05$ ) olduğu görülmüştür. Katkı oranları bakımından değerlendirildiğinde en etkili parametrenin %32.8 katkı oranı ile ilerleme miktarı olduğu onu etki bakımından sırasıyla %23.7 ve %21.88 katkı oranları ile çekirdek malzeme tipi ve kesme hızı takip etmiştir. İlerleme miktarının ana faktör olduğu literatürde (Krishnamoorthy ve ark., 2012, Eneyew ve Ramulu 2014, Xuve ark., 2014) yazarlar tarafından da belirtilmiştir. Çekirdek malzeme tipinin kesme hızına göre anlamlı ve daha yüksek katkı oranına sahip olması alüminyum malzemenin nomex'e kıyasla itme kuvveti karşısında daha rijit bir davranış göstererek elyaf kopmalarını ve delaminasyonu minimize etmesine bağlanmıştır. Parametre etkileşimlerinin katkı oranları ise %7'nin altında kalmıştır.

**Tablo 6. Çıkış delaminasyon faktörü için ANOVA sonuçları**

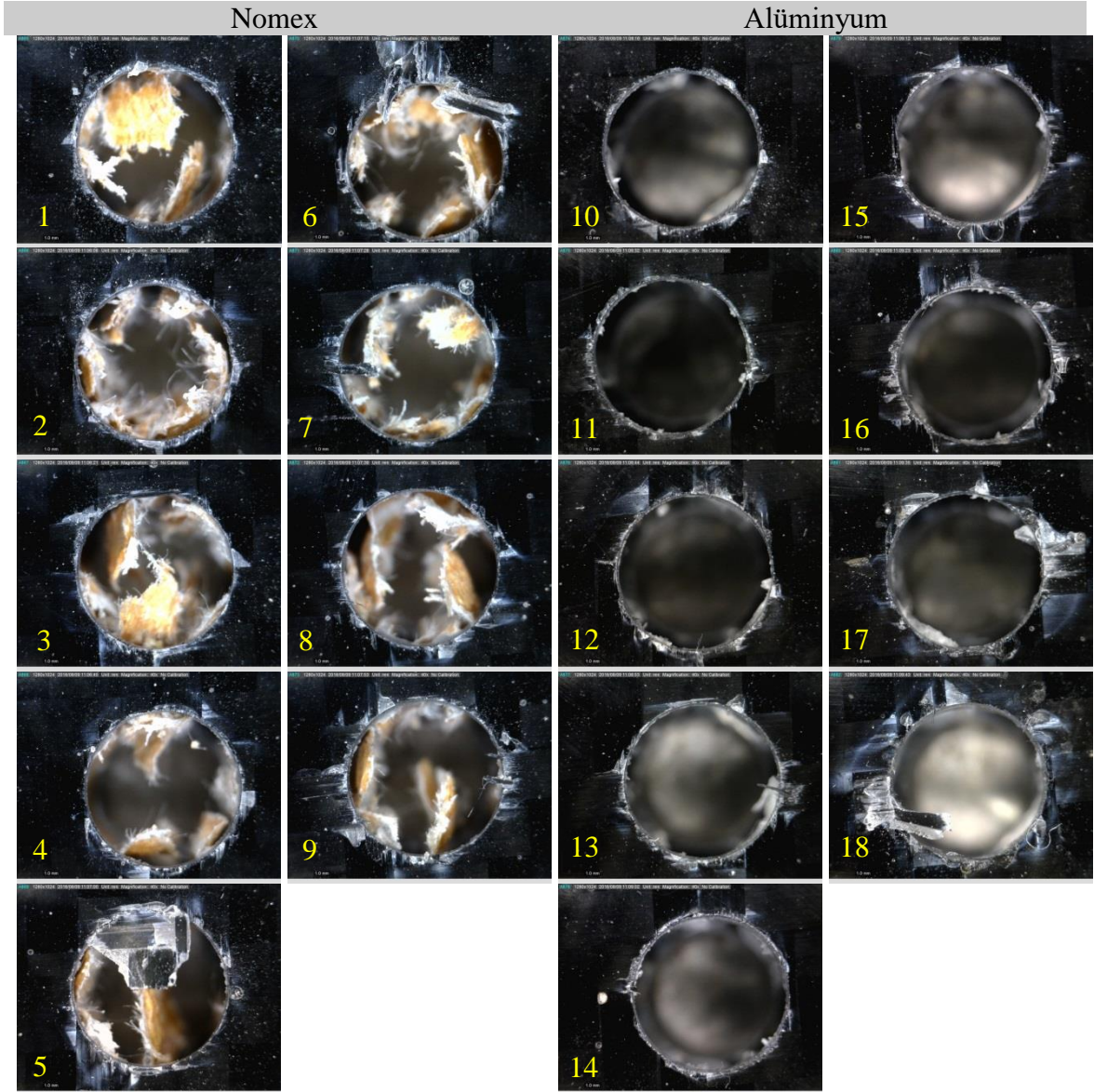
Kaynak	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Varyans	F	P	Katkı oranı (%)
A	1	0,003909	0,003909	14,18	0,02	23,712
B	2	0,003608	0,001804	6,54	0,055	21,887
C	2	0,005414	0,002707	9,82	0,029	32,842
A*B	2	0,000803	0,000402	1,46	0,335	4,871
A*C	2	0,001127	0,000564	2,04	0,245	6,837
B*C	4	0,000521	0,00013	0,47	0,757	3,160
Artık hata	4	0,001103	0,000276			6,691
Toplam	17	0,016485				100

$$R^2 = \%93,3 \quad R^2(\text{düzeltilmiş}) = \%71,6$$

### 3.3. Delik çıkış bölgesindeki hasar görüntüleri

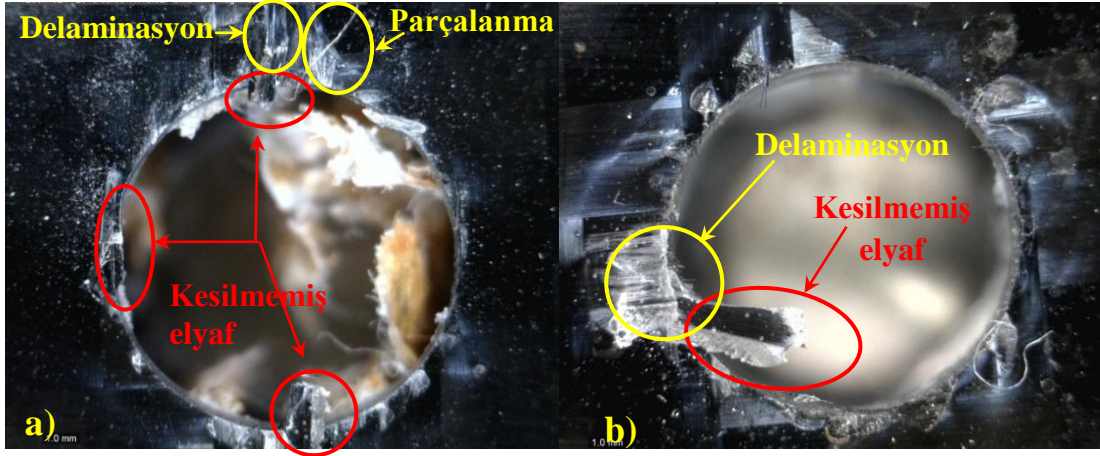
Sandviç kompozitlerin delinmesi sonrasında delik çıkış bölgesinde oluşan hasar görüntüleri deney numarasına göre Şekil 6'da sunulmuştur. Artan kesme parametrelerine bağlı olarak çıkış bölgesinde oluşan hasarın her iki kompozit numune için arttığı net bir şekilde görülmektedir. Nomex alüminyuma göre CFRP katmanlarda daha ciddi hasar olduğu görülmüştür. Ayrıca delik kalitesi bakımından değerlendirildiğinde alüminyum daha temiz bir delik sağlarken nomex malzemede kopan veya yırtılan nomex malzemenin deliği kapattığı delik yüzeyinin ikinci bir işleme ihtiyaç duyduğu görülmüştür. Çıkış bölgesinde oluşan hasar tiplerinin daha detaylı incelenmesi için her iki numunenin de en yüksek kesme hızı (184 m/dk) ve ilerleme miktarında (0,1 mm/dev) delinmesi sonrasındaki görüntüleri Şekil 7'de sunulmuştur. Şekil 7'de her iki sandviç malzeme için hasar tiplerinin delaminasyon, kesilmemiş elyaf ve parçalanma şeklinde olduğu görülmektedir.





**Şekil 6:**  
*Deney sıralarına göre çıkış bölgesinde oluşan hasar fotoğrafları*





**Şekil 7:**  
Çıkış bölgesinde oluşan hasar görüntüleri ( $V_c=184$  m/dk ve  $f=0,1$  mm/dev) a) Nomex ve b) Alüminyum.

#### 4. SONUÇLAR

Sandviç kompozitlerin kesme parametreleri ve çekirdek malzeme tipine bağlı olarak delinmesi sonrasında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

1. Delik giriş bölgesi delaminasyon faktörü üzerinde en etkili parametre %46 ile kesme hızı olmuştur. Kesme hızını %24,5 ve %13,6 katkı oranları ile çekirdek malzeme/kesme hızı etkileşimi ve ilerleme miktarı takip etmiştir.
2. Delik çıkış bölgesi delaminasyon faktörü üzerinde en etkili parametre ise %32,8 katkı oranı ile ilerleme miktarı iken onu %23,7 ve %21,8 katkı oranları ile sırasıyla çekirdek malzeme ve kesme hızı takip etmiştir.
3. Kesme hızı ve ilerleme miktarı artışının giriş delaminasyonunu artırırken yüksek kesme hızı ve ilerleme miktarının da çıkış bölgesi delaminasyonunu arttırdığı görülmüştür.
4. Giriş ve çıkış DF için sandviç malzeme tipleri içerisinde alüminyumun genel olarak daha iyi performans göstermiştir.
5. Giriş ve çıkış DF için optimum parametreler sırasıyla  $A_1B_1C_1$  ve  $A_1B_2C_2$  şeklindedir.
6. Özellikle delik çıkış bölgesinde oluşan hasar tipleri delaminasyon, kesilmemiş elyaf ve parçalanma olduğu görülmüştür.

#### KAYNAKLAR

1. Arunkumar, M.P. Pitchaimani, J. Gangadharan, K.V. Lenin Babu M.C. (2016) Influence of nature of sandviç on vibro acoustic behavior of sandwich aerospace structures, *Aerospace Science and Technology*, 56, 155–167. doi:10.1016/j.ast.2016.07.009
2. Çelik, A.Lazoglu, I. Kara, A. Kara, F. (2015) Investigation on the performance of SiAlON ceramic drills on aerospace grade CFRP composites, *Journal of Materials Processing Technology*, 223, 39–47. doi:10.1016/j.jmatprotec.2015.03.040
3. Dharan, C.K.H. Won, M.S. (2000), Machining parameters for an intelligent machining system for composite laminates, *International Journal of Machine Tools and Manufacture.*, 40, 415–426. doi:10.1016/S0890-6955(99)00065-6

4. Eshetu, D. Eneyew, Ramulu, M. (2014) Experimental study of surface quality and damage when drilling unidirectional CFRP composites, *Journal of Materials Research and Technology*, 3, 354–362. doi:10.1016/j.jmrt.2014.10.003
5. Gaitonde, V.N. Karnik, S.R. Campos Rubio, J. EstevesCorreia, A. Abrao A.M. and Davim, J. P. (2011) A study aimed at minimizing delamination during drilling of CFRP composites, *Journal of Composite Materials*, 45(22), 2359–2368. doi:10.1177/0021998311401087
6. Gaitonde, V.N. Karnik, S.R. Campos Rubio, J. EstevesCorreia, A. Abrão, A.M. Davim, J.P. (2008) Analysis of parametric influence on delamination in highspeed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites, *Journal of Materials Processing Technology*, 203, 431–438. doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.10.050
7. Grilo, T.J. Paulo, R.M.F. Silva, C.R.M. Davim, J.P. (2013) Experimental delamination analyses of CFRPs using different drill geometries, *Composites: Part B*, 45, 1344–1350. doi:10.1016/j.compositesb.2012.07.057
8. Karpat, Y. Değer, B. Bahtiyar, O. (2012) Drilling thick fabric woven CFRP laminates with double point angle drills, *Journal of Materials Processing Technology*, 212, 2117– 2127. doi:10.1016/j.jmatprotec.2012.05.017
9. Khoran, M. Ghabezi, P. Frahani, M. Besharati, M. K. (2015) Investigation of drilling composite sandwich structures, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76(9), 1927–1936. doi:10.1007/s00170-014-6427-x
10. Krishnaraj, V. Prabukarthi, A. Ramanathan, A. Elanghovan, N. Senthil Kumar, M. Zitoune, R., Davim, J.P., (2012) Optimization of machining parameters at high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates, *Compos.: Part B*, 43, 1791–1799. doi:10.1016/j.compositesb.2012.01.007
11. Krishnamoorthy, A., RajendraBoopathy, S., Palanikumar, K., Davim J.P., (2012) Application of grey fuzzy logic for the optimization of drilling parameters for CFRP composites with multiple performance characteristics, *Measurement*, 45, 1286–1296. doi:10.1016/j.measurement.2012.01.008
12. Marques, A.T.Duraõ, L.M., Magalhaes, A.G. Silva, J.F. Tavares, J.M.R.S. (2009) Delamination analysis of carbon fibre reinforced laminates: evaluation of a special step drill, *Composites Science and Technology*, 69, 2376–2382. doi:10.1016/j.compscitech.2009.01.025
13. MohdAriffin, M. K. A. Mohd Ali, M. I. Sapuan, S. M. Ismail, N. (2009) An optimise drilling process for an aircraft composite structure using design of experiments, *Scientific Research and Essay*, 4, 1109-1116.
14. Sharma, S.C. Krishna, M. Narasimha Murthy, H.N. (2006) Delamination During Drilling in Polyurethane Foam Composite Sandwich Structures, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 15, 306-310. doi:10.1361/105994906X108710
15. Vinson, J. R. (2001) Sandwich structures, *American Society of Mechanical Engineers*, 54, 201-215. doi:10.1115/1.3097295
16. Xu, J. An, Q. Chen, M. (2014) A comparative evaluation of polycrystalline diamond drills in drilling high-strength T800S/250F CFRP, *Composite Structures*, 117, 71–82. doi:10.1016/j.compstruct.2014.06.034