

NANOGÖZENEKLI ALUMİNA BALİSTİK PANEL TASARIMI

Sıla Vural¹, Elif Özünlü², Ezgi Ünlü³
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi,
Ankara

Deniz Çelikbaş⁴, Hatice Duran⁵, Erdem
Acar⁶
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi,
Ankara

ÖZET

Gelişen balistik tehditlere karşı balistik koruma sistemlerinin geliştirilmesi önem kazanmaktadır. Malzeme üretim teknolojisinin gelişmesi ile balistik zırhlarda hafiflik, yüksek enerji soğurma kapasitesi ve yüksek balistik koruma sağlayacak yeni malzeme türleri arayışı başlamıştır. Seramik; düşük yoğunluğu, yüksek sertliği ve basınç dayanımı nedeniyle balistik zırhta yaygın olarak kullanılan bir malzeme haline gelmiştir. Seramik panel sistemlerinin ağırlığını azaltmak ve enerji soğurma kapasitelerini artırmak için literatürde çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların incelenmesi sonucunda nanogözenek yapıli seramik paneller üzerinde herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu proje kapsamında; iki farklı yeni tasarım geliştirilmiş, üretilmiş ve CES İleri Kompozit ve Savunma Teknolojileri firması tarafından gerçekleştirilen balistik testlerle test edilmiştir. Birinci tasarım alüminyum levha üzerinde anodizasyon yöntemi ile büyütülen nanogözenekli alümina, ikinci tasarım ise alüminyum levha üzerinde anodizasyon yöntemi ile büyütülen polimer emdirilmiş nanogözenekli alüminadır. Balistik test sonuçlarına dayanarak, polimer emdirilmiş konfigürasyonun, polimer emdirilmemiş nanogözenekli yapıya ve herhangi bir işlem uygulanmamış alüminyum plakaya kıyasla enerji soğurma kapasitesi açısından daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

GİRİŞ

İnsanoğlu varoluşundan itibaren kendini çevresindeki tehditlere karşı koruma bilinci taşımaktadır. Bu bilinç sayesinde ilkel zamanlarda kullanılan ipek ve post gibi malzemeler savaş ve üretim teknolojileri geliştikçe yerlerini daha ileri mühendislik malzemelerine bırakmıştır. Mısır, Sümer, Asur, Yunan ve Roma gibi tarih sahnesinde önemli rol alan uygarlıklar balistik koruma sistemlerindeki gelişmelere bronz, çelik, demir gibi metallerin kullanımı kazandırsa da ateşli silahların ve harp taktiklerinin gelişimi ile 20. yüzyılda balistik koruma sistemlerinin evrimi hız kazanmıştır ([Wang, 2014], [Yadav vd, 2016]). Yüksek enerji soğurma kapasitesine sahip olması ve hasara dayanıklı olmasının yanı sıra düşük yoğunluk ve esneklik de balistik koruma sistemlerinde aranan bir özellik haline gelmiştir. Metalik zırhlar, ağır olması ve hareket kısıtlayıcı özellikleri ile bu isteği karşılayamamıştır. Bu doğrultuda araştırmacılar yenilikçi malzemeler arayışına girmiştir ve seramikler düşük yoğunluk, yüksek sertlik ve basma dayanımı özellikleri ile metalik zırhların yerine geçmeye aday olmuştur. Buna karşın; seramiklerin çekme dayanımları, toklukları ve birden fazla

¹ Lisans Öğrencisi, Makine Mühendisliği Bölümü, E-posta: s.vural@etu.edu.tr

² Lisans Öğrencisi, Makine Mühendisliği Bölümü, E-posta: eozunlu@etu.edu.tr

³ Lisans Öğrencisi, Makine Mühendisliği Bölümü, E-posta: e.unlu@etu.edu.tr

⁴ Doktora Öğrencisi, Makine Mühendisliği Bölümü, E-posta: d.celikbas@etu.edu.tr

⁵ Doç. Dr., Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Mühendisliği Bölümü, E-posta: hduran@etu.edu.tr

⁶ Prof. Dr., Makine Mühendisliği Bölümü, E-posta: acar@etu.edu.tr

darbeye dayanım kabiliyetleri düşüktür. Bu dezavantajlardan düşük çekme dayanımı ve tokluğun üstesinden gelebilmek adına seramikler balistik koruma sistemlerinde destekleyici malzemeler ile birlikte kullanılırlar. Metaller ve kompozit malzemeler, yapıya destekleyici olarak kullanılan malzemelere örnek verilebilir ([Venkatesan vd., 2017], [Dancer, 2019], [Akella, 2015]). Söz konusu bu iki katmanlı yapılarda; seramik katman mermiyi erozyona uğratar ve aynı zamanda konik deformasyon şekli yaratarak metalik katmandaki lokal basıncı azaltırken, metalik katman ise kırılan seramik parçalarını yerinde tutup enerjiyi soğurur ([Übeyli, 2007]). Bunların yanı sıra seramik zırhların balistik performansını etkileyen birçok özellik vardır. Tablo 1’de verilen bu özellikler seramiğin mikro yapısından etkilenmektedir. Bu yüzden mikro yapısal kontrol, yeni seramik zırh geliştirme çabalarında önemli rol oynar. Bu konuda Dresch’in çalışmasında gözeneklilik, ikinci fazlar ve tanecik boyutunun büyük olmasının; elastik modülü, sertlik ve eğilme mukavemetini olumsuz etkilediği belirtilmiştir ([Hogan, 2014], [Dresch, 2021]).

Tablo 1: Malzeme özellikleri ve bu özelliklerin balistik performansa etkisi ([Dresch, 2021])

Özellik	Balistik Performansa Etkisi
Mikro Yapı	Sol sütunda listelenen tüm özellikleri etkiler
Tane Boyutu	
Ara fazlar	
Faz Değişimleri ve Amorfizasyon	
Gözeneklilik	
Yoğunluk	Ağırlık
Sertlik	Mermiyeye verilen hasar
Elastik Modül	Stres dalgası yayılımı
Eğilme Mukavemeti	Çoklu darbe dayanımı
Kırılma Tokluğu	Çoklu darbe dayanımı, saha dayanımı
Kırılma Tipi	Enerji soğurma

Metallik zırhların özelliklerini iyileştirme çalışmalarından birisi de yüzey kaplama yöntemidir. Kaplama yöntemi olarak sprey kaplama yöntemi havacılık ve otomobil sanayinde yüksek mukavemet özelliği sayesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Plazma sprey kaplama yönteminde kaplama hammaddesi olarak malzeme tozu kullandığı için, kullanılacak kaplama malzemesi yelpazesi oldukça geniştir. Özşahin’in çalışmasında plazma sprey yöntemi ile 0.762 mm kalınlığında ZrO₂ kaplanmış, 6.35 mm ve 8 mm kalınlığında AL 6061 T651 alüminyum plakaların balistik performansı incelenmiştir ([Özşahin, 2010]). Bahsi geçen çalışmada kaplama olan plakaların, kaplamasız haline karşılık gelen balistik limit hızın üstünde hızla gelen mermileri durdurabilirken; kaplama yapılmayan numunelerin ise bu hızlarda delindiği görülmüştür. Mohotti’nin çalışmasında ise alüminyum plakalar üzerine farklı kalınlıklarda poliüre kaplanmış ve bu plakalar 935 m/s hızla gelen mermiyeye karşı test edilmiştir ([Mohotti, 2013]). Poliüre kalınlığının artması ile beraber, merminin plakadan çıkış hızında azalma görülmüştür.

Bu çalışmada, AL 6061 T6 alüminyum plakaların dış yüzeyinde anodizasyon yöntemi ile 100 mikron kalınlığında nanogözenekli bir alümina tabakası büyütülmüştür. Yapılan literatür araştırması sonucunda nanogözenekli alüminanın balistik panel uygulamalarında daha önce kullanılmadığı tespit edilmiştir. Yalnızca Dai tarafından nanogözenekli alümina plakaların balistik uygulamalar için avantaj sağlayabileceği ifade edilmiştir ([Dai vd., 2017]). Bu bilgi doğrultusunda nanogözenekli yapının balistik performansı; alümina büyütülmemiş alüminyum plaka, nanogözenekli alümina büyütülmüş boş gözenekli plaka ve nanogözenekli alümina büyütülmüş polimer emdirilmiş plakalar üzerinde balistik testler uygulanarak karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmiştir.

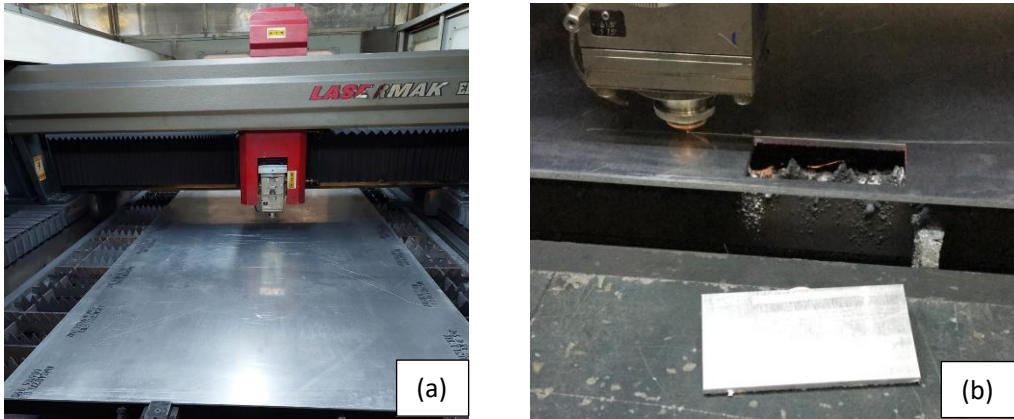
YÖNTEM

Üretim

Balistik panel üretiminde, AL 6061-T6 alüminyum ön plaka, AL 2024-T3 alüminyum ise arka plaka olarak kullanılmıştır. Öncelikle, ön tarafta yer alan plaka nanogözenekli alumina büyütülmesi işleminin gerçekleştirileceği anodizasyon cihazına uygun boyutlar haline getirilmesi gerekmektedir. Bahsi geçen aşamanın gerçekleştirilebilmesi adına AL 6061-T6 alüminyum plakalar 50x100 mm boyutlarında lazer kesim ile kesilmişlerdir; lazer kesim işlemi 5. Anabakım Fabrika Müdürlüğünde LASERMARK markalı lazer kesim makinesiyle gerçekleştirilmiştir. Numunelerin kesildiği lazer kesim cihazı, numunelerin kesim anına dair görüntüler ve numunelerin kesildikten sonra ulaştıkları görünüm sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1: LASERMARK markalı lazer kesim cihazı

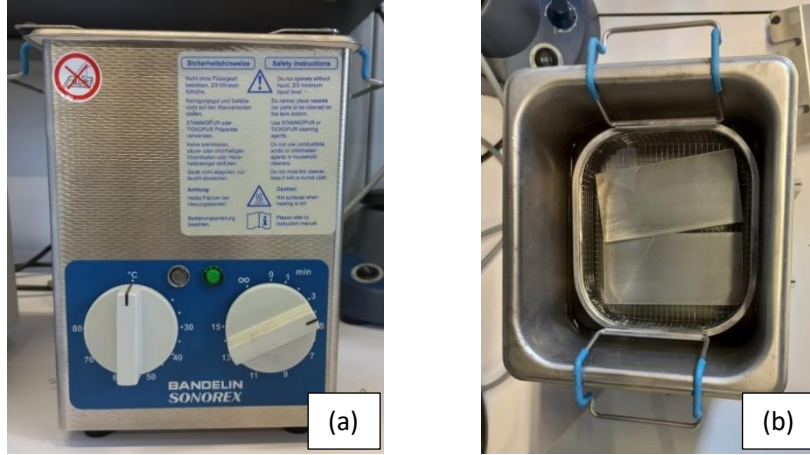


Şekil 2: (a) AL 6061 T6 alüminyum plakaların kesim süreci, (b) AL 6061 T6 alüminyum numunelerin kesim sonrası görüntüleri

Anodizasyon işlemi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Biyomedikal Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Fatih BÜYÜKSERİN'in araştırma grubunun yardımlarıyla Nanotıp Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Anodizasyon işleminin gerçekleştirilmesinin ardından, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Malzeme ve Nanoteknoloji Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Doç. Dr. Hatice Duran'ın polimer laboratuvarında nanogözenekli numunelere polimer emdirilmiştir.

Anodizasyon işleminden önce, numunelerin yüzeyleri 600 grid zımparalar ile tek bir yön doğrultusunda zımparalanmıştır. Zımparalama işleminin gerçekleştirilmesinin ardından, numuneler Bandelin Sonorex markalı ultrasonik banyo cihazında arındırılmıştır. Ultrasonik banyo cihazı ile temizleme sürecinin amacı, distile su dolu olan tank içerisine koyulmuş olan numunelere yüksek frekansta dalgalar göndererek numunelerin üst yüzeyinin temizlenmesini sağlamaktır. Ultrasonik enerji, kavitasyon denilen etkiyi ortaya çıkararak temizliğin gerçekleşmesini sağlar. Şekil 3(a)'da gösterilen ultrasonik banyo cihazının içine Şekil 3(b)'de

olduğu gibi yerleştirilen numuneler oda sıcaklığında 5 dakika boyunca bu banyoda kalmıştır. Numuneler ultrasonik banyodan çıkarıldıktan sonra distile su ile yıkanmıştır. Sonrasında ise numunelerin üzerindeki parmak izi gibi organik atıkları uzaklaştırmak amacıyla numuneler aseton ile yıkanmıştır.

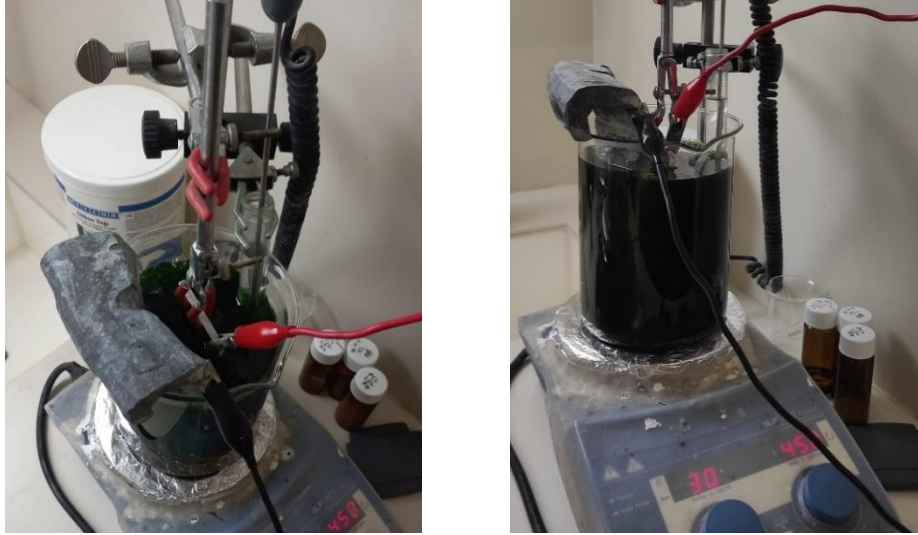


Şekil 3: Ultrasonik banyo işlemi, (a) Bandelin Sonorex marka ultrasonik banyo cihazı, (b) ultrasonik banyoda numuneler

Anodizasyon işlemi öncesi son işlem olarak elektrokimyasal cilalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Elektrokimyasal cilalama işlemi, kimyasal bir çözelti içerisindeki numunelere doğru akım verilerek yüzeyin mikron seviyesinde aşındırılmasıyla pürüzsüz bir yüzey elde etme işlemine verilen addır. Bu uygulamadan sonra numune yüzeyleri göz alıcı bir parlaklığa sahip olmuştur. Bu işlem sırasında numunelere 15 Volt gerilim verilmiştir ve işlem 65 derece sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. İşlem sırasında çözelti sıcaklığının 80 dereceyi geçmemesine dikkat edilmiştir. Elektrokimyasal cilalama işlemi çözeltisinin sıcaklığı 80 dereceyi aştığında sistem devre dışı bırakılarak soğutulmuş ve çözeltinin kaynaması engellenmiştir. Elektrokimyasal cilalama işlemi iki saat boyunca Tablo 2’de verilen solüsyon bileşimi ile gerçekleştirilmiştir. İşleme ait düzenek Şekil 4’te görülmektedir. İşlem sonucunda elde edilen alüminyum numuneler Şekil 5’te olduğu gibi görünmektedir. İşlem sonunda elektrokimyasal cilalama çözeltisinden alınan numune distile su ile yıkanmış ve polimer laboratuvarındaki laboratuvar fırınında kurutulmuştur.

Tablo 2: Elektrokimyasal cilalama işleminde kullanılan solüsyona bileşimi

Bileşen Adı	Miktarı
H ₃ PO ₄	1440 mL
H ₂ SO ₄	160 mL
CrO ₂	32 gr



Şekil 4: Elektrokimyasal cilalama düzeneği



Şekil 5: Elektrokimyasal cilalamadan sonra numune görünümü

Anodizasyon işlemi birinci ve ikinci anodizasyon olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir; buradaki amaç yüzeyde elde edilmeye çalışılan gözenek yapısının homojen ve düzgün olmasını sağlamaktır. Yüzeylerde gözenekli yapıyı oluşturmak için kullanılmış olan anodizasyon düzeneği Şekil 6'da görülebilmektedir. Anodizasyon işleminde elektrolit çözeltisi olarak okzalik asit kullanılmıştır. Bunun yanı sıra işlem sırasında kurşun katot tarafken, alüminyum numuneler anot taraf olarak kullanılmış olup okzalik asit çözeltisi tarafından yüzeyinin aşındırılması gerçekleştirilmiştir. Anodizasyon işlemi de gerçekleştirilirken aynı elektrokimyasal cilalama işleminde olduğu gibi sisteme 15 volt gerilim verilmiştir. İşleminde kullanılan okzalik asit çözeltisinde 45 gr okzalik asit dihidrat ve 1 litre su bulunmaktadır. Çözelti oluşturulduktan sonra manyetik bir karıştırıcı sayesinde homojenize edilmiştir ve anodizasyon düzeneğine konulmuştur. Anodizasyon işleminin ilk basamağı numuneler 5 derecede 2 saat bekletilerek gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'da görülmekte olan siyah kablo katot olan kurşuna; kırmızı kablo ise anot olan alüminyum numuneye bağlıdır.

Birinci anodizasyon aşamasının gerçekleştirilmesinin ardından, Şekil 7'de görüldüğü üzere numuneler kromik asit çözeltisinin içerisinde bekletilerek ilk anodizasyon aşaması sonucunda oluşmuş olan ince seramik tabakanın temizlenmesi sağlanmıştır; temizleme işleminin gerçekleştirilmesinin ardından numuneler ikinci anodizasyon işlemine hazır hale getirilmişlerdir. Kromik asit çözeltisinde bekletme işlemi yüzeyin temizlenmesinin yanı sıra

aynı zamanda ikinci anodizasyon aşamasında oluşacak olan gözenek yapılarının daha homojen olmalarını sağlamaktır.

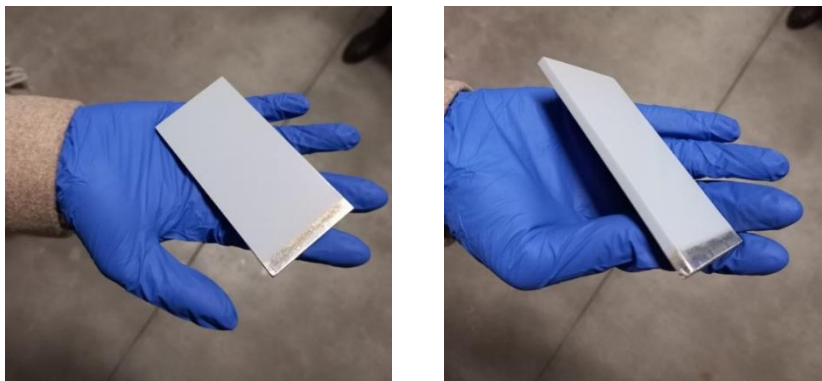


Şekil 6: Anodizasyon düzeneği



Şekil 7: Numunelerin kromik asitte bekletilmesi

İkinci anodizasyon işlemi gerçekleştirilirken birinci anodizasyon işleminde olduğu gibi okzalik asit çözeltisi kullanılmıştır. Birinci anodizasyondan farklı olarak ikinci anodizasyonda numuneler okzalik asit çözeltisi içerisinde 24 saat bekletilmiştir. Proses sonrasında numunelerin son durumu ve üzerlerinde oluşmuş olan alümina tabaka Şekil 8'de görülmektedir.

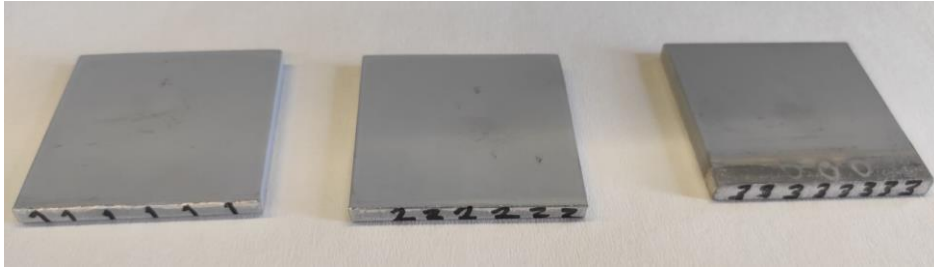


Şekil 8: İkinci anodizasyonun tamamlanmasının ardından numunelerin son durumu

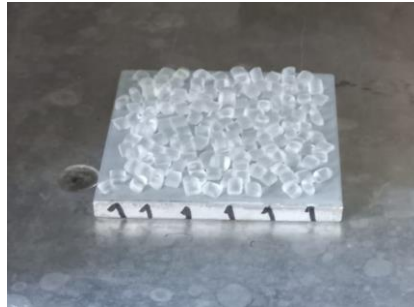
İkinci anodizasyon işleminin tamamlanmasının ardından oluşturulmuş olan gözeneklerin tamamen açılabilmesi için numuneler 52 dakika fosforik asit çözeltisinde bekletilmiştir. Gerçekleştirilen tüm bu prosesler sonucunda gözenek çaplarının yaklaşık olarak 70 nanometre civarından olması beklenmiştir.

Anodizasyon işlemlerinin tamamlanmasının ardından, numunelerde oluşturulmuş olan gözenekli yapının içerisine 3M™ Dyneon™ Floroplastik Granüller THV 221GZ tipi polimer emdirilmiştir. Kullanılan polimer, 3M™ Dyneon™ Floroplastik Granüller THV 221GZ, pelet formunda tetrafloroetilen, heksafloropropilen ve vinil florürden oluşan esnek, şeffaf bir floroplastiktir. Bu malzeme düşük sıcaklıkta işleme, düşük yanıcılık, termal kararlılık ve eriyik işlenebilirliği özellikleri arasında bir denge sağlar. Yüksek düzeyde esneklik, şeffaflık, düşük sıcaklıkta füzyon veya orta düzeyde kimyasal dirençle bağlanma yeteneği gerektiren uygulamalar için kullanışlıdır. Diğer floroplastiklere kıyasla nispeten düşük sıcaklıklarda işlem yapılabilir ve daha yüksek erime noktalı floroplastiklerde kullanılanla aynı seviyede korozyona dayanıklı ekipman gerektirme olasılığı düşüktür ([MatWeb: Material Property Data, 2022]). Literatürde Dyatkin'in çalışmasında çelik numunelerin yüzeyleri bir floropolimer olan politetrafloroetilen (PTFE) ile kaplanmıştır. PTFE ile kaplanan numuneler, poliüre ve kauçuk ile kaplanan numunelere kıyasla çok daha yüksek bir balistik performans sergilemiştir. Bunun sebebi ise politetrafloroetilenin, darbe kaynaklı bir faz geçişine maruz kalmaması ve yüksek performansı sayesinde darbe sırasında akışa direnmesi ve ardından alt tabakaya uygulanan gerilimi azaltmasıdır. Dyatkin'in çalışmasında belirtildiği gibi floropolimerler balistik uygulamalar için hafif ve basit çözümler sunmaktadır ([Dyatkin, 2018]).

Numunelerin polimer emdirme işleminden önceki durumları Şekil 9'da görülebilmektedir. Numune üzerine boncuk halinde polimerler yerleştirilmiştir ve 24 saat boyunca 200 derecede vakumlu fırında tutulmuşlardır; böylece polimerin gözeneklere iyice nüfuz etmesi sağlanmıştır. Numunelerin üzerine polimer yerleştirilmiş halleri Şekil 10'da verilmiştir. Sadece gözeneklerin polimer ile doldurulması istendiği için numunelerin yüzeyindeki polimer tabakaları temizlenmiştir. Temizlenen yüzeyler Şekil 11'de gösterilmektedir.



Şekil 9: Polimer emdirme işlemine hazır numuneler



Şekil 10: Boncuk halindeki polimerlerin yerleştirilmiş olduğu numuneler



Şekil 11: Yüzeyleri temizlenmiş numuneler

Polimerler yüzeyden temizlendikten sonra hassas terazi ile ağırlıkları ölçülmüştür. Polimer emdirilen numunelerin ağırlıkları, emdirme işleminden önceki halleri ile karşılaştırılmıştır. Kütle ölçüm sonuçları ve numunelerin kütle artışları Tablo 3'te verilmiştir. Tablodan da görüleceği üzere tüm numunelerde kütle artışı gözlemlenmiştir. Yüzeyler temizlenmiş olmasına rağmen, bir miktar polimer kaldığı düşünülmektedir; ancak polimer ağırlığının büyük bir kısmının gözeneklerde olduğu tahmin edilmektedir. Bu nedenle numune mikro yapısını gözlemlemek amacıyla SEM (*Taramalı elektron mikroskobu*) ile görüntüleme yapılmasına karar verilmiştir.

Tablo 3: Polimer emdirilmiş numunelerin kütleleri ve kütle artışı

	1. Numune	2. Numune	3. Numune
Polimersiz Numune Kütle	30.28 g	30.81 g	30.73 g
Polimerli Numune Kütle	30.49 g	31.14 g	31.08 g
Kütle Artışı	0.21 g	0.33 g	0.35 g

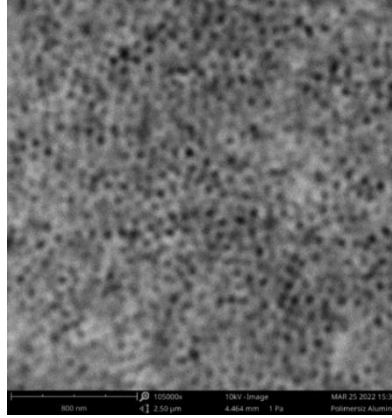
SEM Analizi

Bu aşamada numunelerin mikro yapısı incelenmiştir. Numunelerde homojen ve eşit çapta gözeneklerin oluşması beklenmiştir. Bu beklentiler doğrultusunda 5. Ana Bakım Fabrika Müdürlüğünde ZEISS markalı cihazda ve TOBB ETÜ Teknoloji Merkezi Laboratuvarında SEM incelemeleri yapılmıştır. 50 mikron ölçeğinde yapılan ilk görüntüleme ile nano boyutlu gözenekler görüntülenememiştir; ancak Şekil 12'de görüldüğü gibi krater yapılarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu krater yapıları, üretim sırasında asit ve voltaj kaynaklı korozyon nedeniyle oluşmuştur. Bu krater yapısı polimer emdirilen numuneler için uygundur; çünkü kraterler polimerin yüzeye ve gözeneklere daha iyi yapışmasını sağlamaktadır.



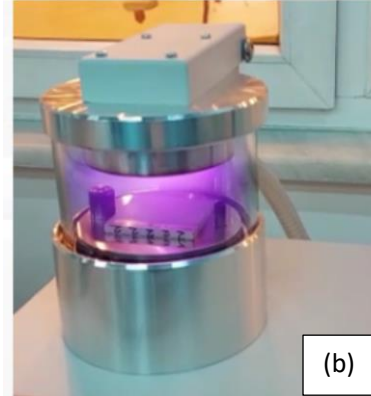
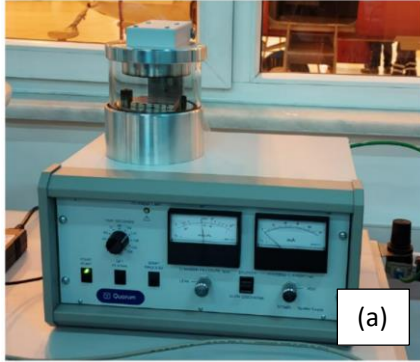
Şekil 12: 50 mikron ölçeğinde SEM görüntüsü

Gözenek yapılarının görüntülenebilmesi için ölçek 800 nanometre seviyesine indirilmiştir ancak görüntünün netliği sağlanamamıştır; bunun nedeni numunenin yüzeyinde iletkenlik sağlanamamasıdır, bulanık görüntü Şekil 13'te verilmiştir. Görüntüleme net olamamasına rağmen alümina tabakada oluşmuş olan gözenekli yapı gözlemlenebilmiştir.

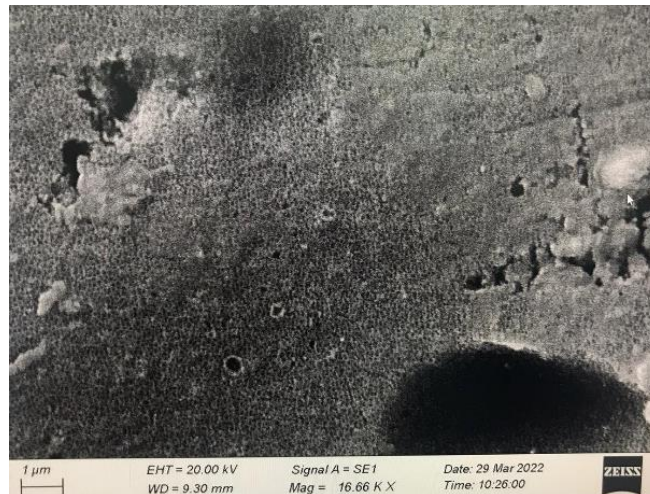


Şekil 13: Polimer emdirilmemiş numunenin 800 nanometre ölçeğinde SEM görüntüsü

İletkenlik probleminin çözülebilmesi ve iletkenliğin sağlanabilmesi amacıyla numune yüzeylerine nanometre seviyesinde altın kaplama yapılmıştır; kaplama işlemi püskürtme (sputtering) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Püskürtme işleminin gerçekleştirildiği cihaz ve püskürtme işlemi, işlem sonrasında elde edilen SEM görüntüsü Şekil 14 ve Şekil 15'te sırasıyla verilmiştir.



Şekil 14: (a) Püskürtme işleminin gerçekleştirildiği cihaz, (b) Püskürtme işlemi



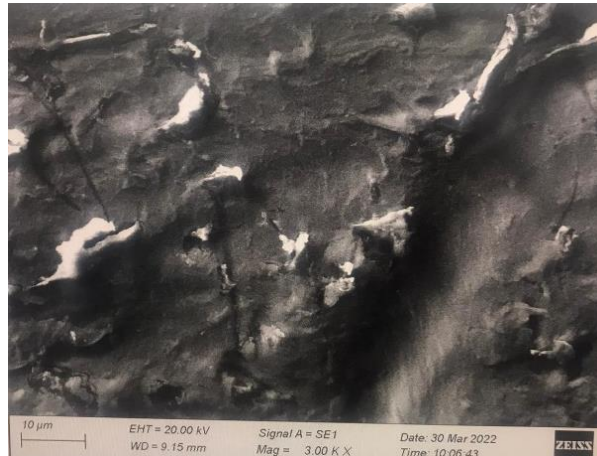
Şekil 15: 1 mikron ölçeğinde SEM görüntüsü

800 nanometre ölçeğinde görüntüleme gerçekleştirildiğinde, cihazın lensleri bu boyutta görüntüleme için yeterli hassasiyete sahip olmadığından görüntüdeki bulanıklık tekrarlamıştır.

Polimer emdirilmesiyle elde edilen numunelerin gözeneklerinin polimer ile başarılı bir şekilde doldurulup doldurulmadığını görmek için polimerli numuneler de SEM ile incelenmiştir. Polimer, ışığı belli bir oranda yansıtan bir malzeme olduğu için görüntüleme sırasında kamaşmalara neden olmuştur. 4 mikron ve 10 mikron ölçeğinde görüntüleme, sırasıyla Şekil 16 ve Şekil 17'de gösterilmektedir. Bu görüntülerde polimer kısımlar göze çarpsa da gözeneklerin içi görüntülenememiştir.



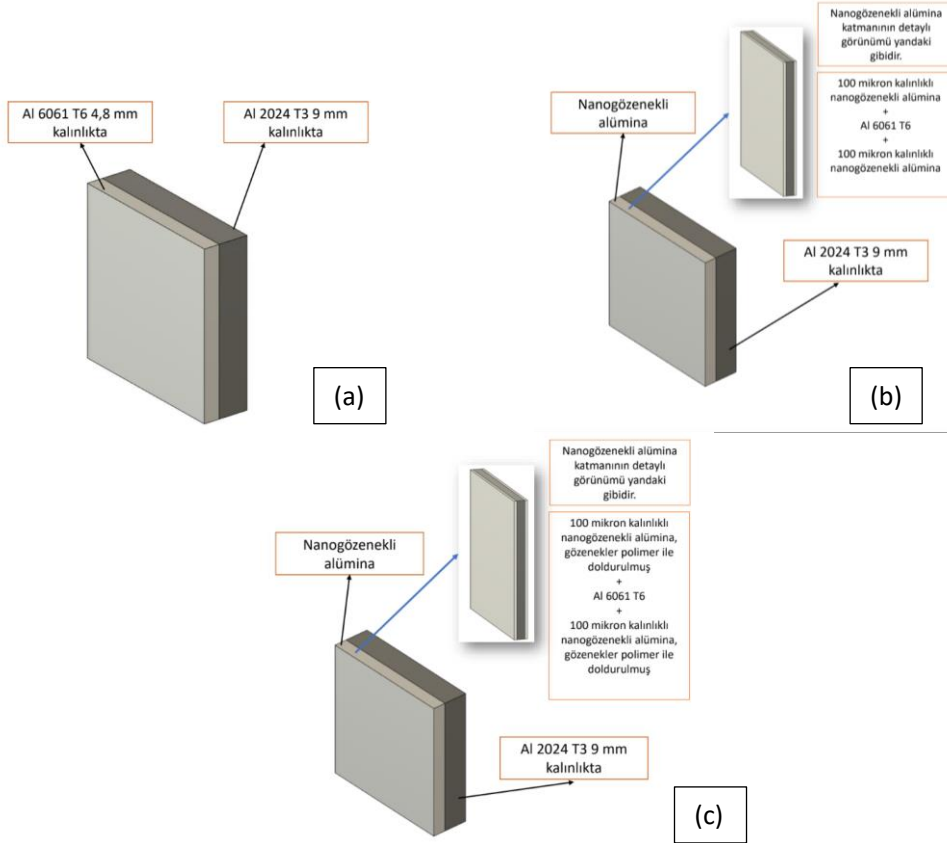
Şekil 16: Polimer emdirilmiş numunenin 4 mikron ölçeğinde SEM görüntüsü



Şekil 17: Polimer emdirilmiş numunenin 10 mikron ölçeğinde SEM görüntüsü

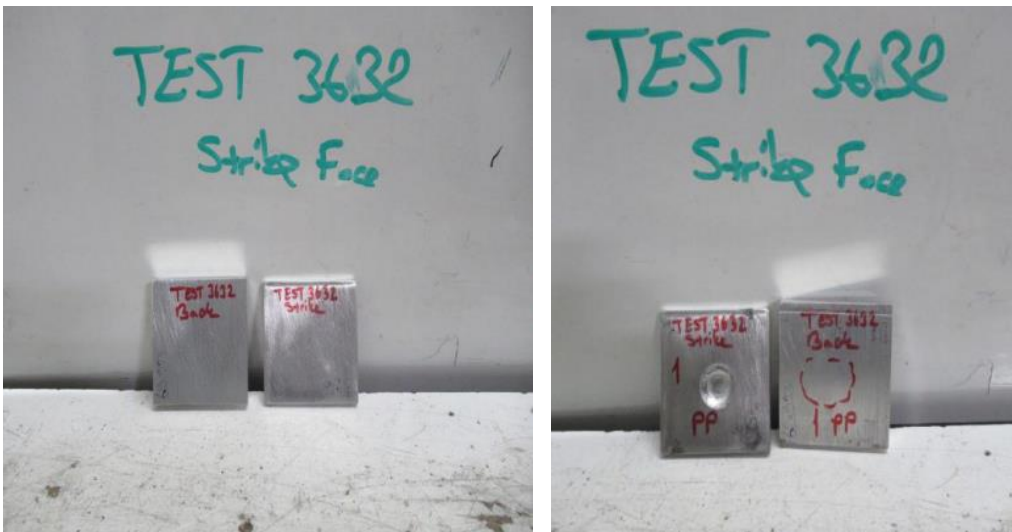
Balistik Testler

Balistik testler, CES İleri Kompozit ve Savunma Teknolojileri firması tarafından gerçekleştirilmiştir. Altı numune test edilmiştir. Testler için 9x19mm Luger FMJ mermisi kullanılmış olup mermiler ortalama 420 m/s hızla ateşlenmiştir. Hedef uzaklığı 5 metre ve ortam sıcaklığı 20.7 °C'dir. Balistik testlerde; yüzeyine herhangi bir işlem uygulanmamış AL6061-T6, yüzeyinde nanogözenekli alümina büyütülmüş ve polimer emdirilmemiş AL 6061-T6, yüzeyinde nanogözenekli alümina büyütülmüş ve polimer emdirilmiş AL 6061-T6 olmak üzere 3 farklı konfigürasyon AL 2024-T3 arka plaka ile kullanılmıştır ve bu konfigürasyonlar şekil 18'de verilmiştir. Kullanılan bu 3 farklı konfigürasyonun her biri için ikişer atış gerçekleştirilmiş olup, toplamda 6 atış gerçekleştirilmiştir.

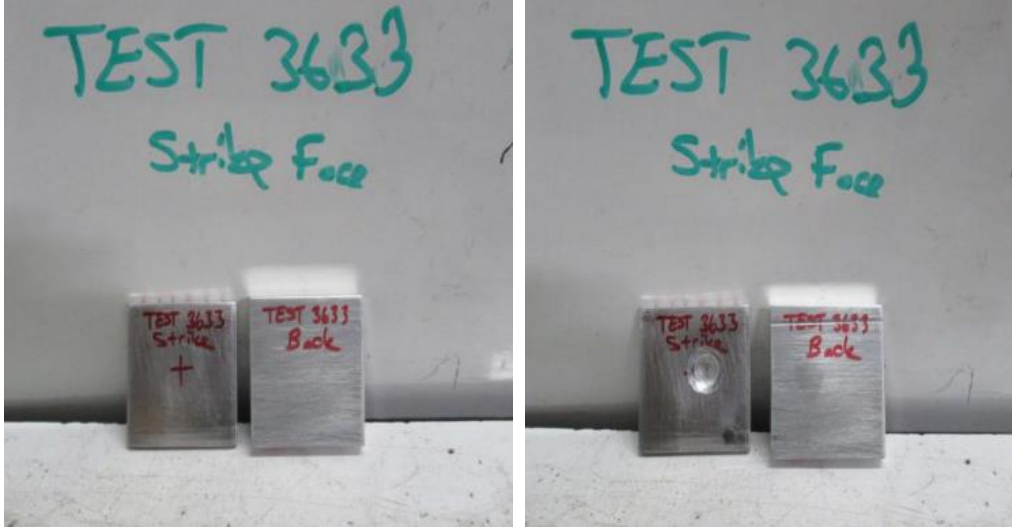


Şekil 18: Balistik testlerde kullanılan 3 konfigürasyon: (a) Yüzeyine herhangi bir işlem uygulanmamış AL6061-T6, (b) Yüzeyinde nanogözenekli alümina büyütülmüş ve polimer emdirilmemiş AL 6061-T6, (c) Yüzeyinde nanogözenekli alümina büyütülmüş ve polimer emdirilmiş AL 6061-T6

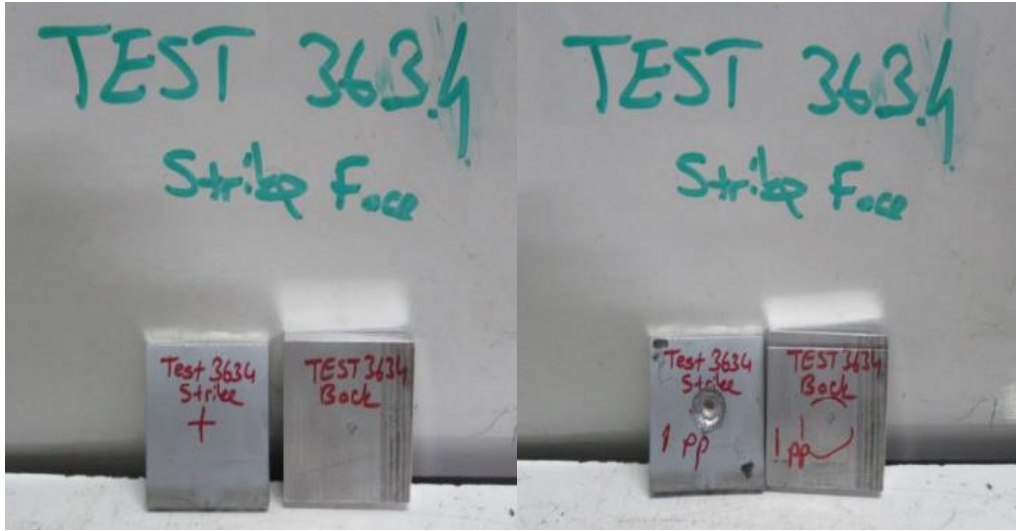
Balistik testlerde elde edilmiş olan sonuçlar; testlerden önce numunelerin çekilmiş olan fotoğrafları ve numunelerin testlerden sonra çekilmiş olan fotoğrafları incelenmiştir. 1. konfigürasyona ait olan test öncesi ve sonrası görüntüleri Şekil 19 ve Şekil 20’de verilmiştir; 2.konfigürasyona ait olan görüntüler Şekil 21 ve Şekil 22’de; son konfigürasyona ait görseller ise Şekil 23 ve Şekil 24’te verilmiştir.



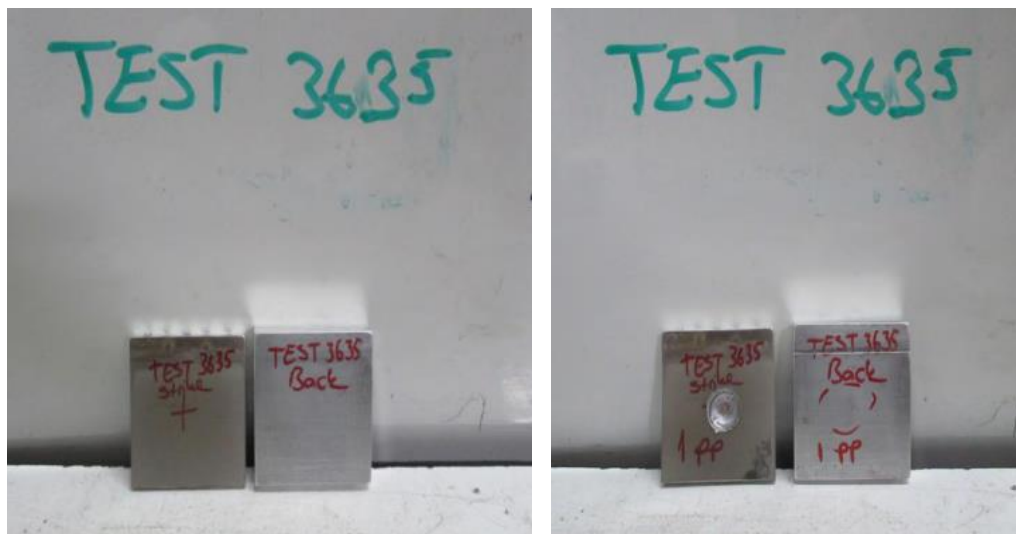
Şekil 19: 1. Konfigürasyon- Numune 1



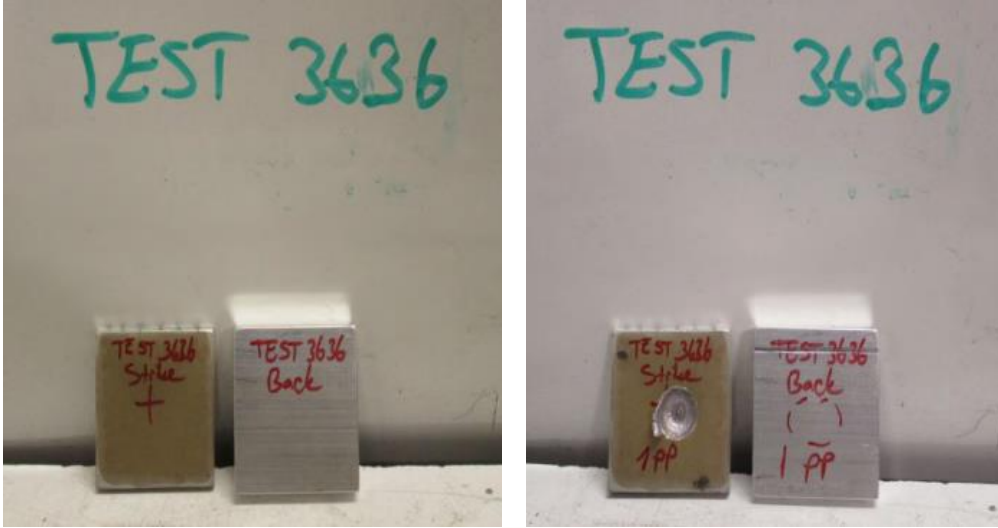
Şekil 20: 1. Konfigürasyon- Numune 2



Şekil 21: 2. Konfigürasyon- Numune 1



Şekil 22: 2. Konfigürasyon- Numune 2



Şekil 23: 3. Konfigürasyon- Numune 1



Şekil 24: 3. Konfigürasyon- Numune 2

Balistik testler sonucunda elde edilen penetrasyon derinliği değerleri Tablo 4'te gösterilmiştir. Bu sonuçların karşılaştırılmasında en önemli parametre arka plakanın penetrasyon derinliğidir; çünkü bu parametre ön plaka tarafından ne kadar enerji soğurulduğunu ve arka plakaya ne kadar enerji aktarıldığını gösterir. Temel olarak, ön plakanın deformasyonu ne kadar büyük olursa, soğurduğu enerji de o kadar büyük olur, böylece arka plakaya verilen hasar azalır. Bunun yanı sıra, Şekil 25'te verilen merminin darbe alanları incelenerek, polimer emdirilmiş konfigürasyonun, deformasyonu sadece panelin eksenel yönünde değil, aynı zamanda enine yönde de diğer konfigürasyonlara göre daha fazla dağıttığı gözlenmektedir. Bu fenomen, polimer emdirilmiş konfigürasyonların daha yüksek enerji soğurma kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 25: Ön plaka üzerlerindeki deformasyonlar (soldan sağa): Yüzeyine herhangi bir işlem uygulanmamış AL6061-T6, yüzeyinde nanogözenekli alümina büyütülmüş ve polimer emdirilmemiş AL 6061-T6, yüzeyinde nanogözenekli alümina büyütülmüş ve polimer emdirilmiş AL 6061-T6

Tablo 4: Balistik testler sonucunda elde edilen penetrasyon derinliği değerleri

Numune	Ön plaka penetrasyon derinliği	Arka plaka penetrasyon derinliği
Konfigürasyon 1- numune 1	2.44 mm	0.29 mm
Konfigürasyon 1- numune 2	3.05 mm	0.17 mm
Konfigürasyon 2- numune 1	3.44 mm	0.22 mm
Konfigürasyon 2- numune 2	2.66 mm	0.26 mm
Konfigürasyon 3- numune 1	3.30 mm	0.17 mm
Konfigürasyon 3- numune 1	4.29 mm	0.23 mm

UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, nanogözenek yapılı yeni bir balistik panel tasarımı geliştirilmiştir. Tasarlanan balistik panellerin üretim basamaklarında öncelikle alüminyum (AL6061-T6) üzerinde doğal oksit tabakası büyütüldü daha sonrasında ise nanogözenekli yapı oluşturulmuştur. Devam eden süreçte enerji soğurma kapasitesinin artırılabilmesi için, numunelerden bir kısmına polimer emdirme işlemi gerçekleştirilmiştir; sonuç olarak iki farklı tasarım elde edilmiştir: polimer emdirilmiş nanogözenekli numuneler ve polimersiz nanogözenekli numuneler. Her iki numune çeşidindeki nanogözenekli yapı oluşumunun görülebilmesi ve polimer emdirilen numunelerde polimerlerin gözeneklere yerleşim durumunun incelenebilmesi için numuneler SEM cihazı kullanılarak görüntülenmişlerdir. SEM görüntülenmesi yapılırken beklenen nanogözenek çaplarının 70 nanometre olması ve de polimer emdirilmiş numunelerde polimerin gözeneklere iyi yerleşmesidir. Yapılan görüntüleme sonucunda por çapları beklenildiği gibi yaklaşık 70 nanometre civarındadır.

Numunelerin SEM görüntülemeleri ve kütle ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Kütle ölçümü ve balistik testlerin gerçekleştirilmesinin ardından, 3 farklı konfigürasyon için balistik testler gerçekleştirilmiştir: ilk konfigürasyonda herhangi bir işlem görmemiş AL 6061-T6 ön plaka ve AL 2024-T3 arka plaka bulunmaktadır; ikinci konfigürasyonda, AL 6061-T6'nın yüzeyine büyütülmüş polimer emdirilmemiş nanogözenekli alümina ön plaka olarak kullanılırken arka plaka için yine AL 2024-T3 kullanılmıştır; son konfigürasyon için ise, ön plaka olarak nanogözeneklerine polimer emdirilmiş numune ve arka plaka olarak yine AL 2024-T3 tercih edilmiştir. Farklı konfigürasyonlar için gerçekleştirilen bu balistik testler sonucunda nanogözeneklerine polimer emdirilmiş olan numunelerin diğer numunelere kıyasla enerji soğurma kapasitesinin ve dayanımının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

SONUÇ

Bu çalışmada, nanogözenek yapılı yeni bir balistik panel tasarımı geliştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda anodizasyon yöntemi ile nanogözenekli alümina kaplama yapılan numunelerden polimer emdirilen numunenin, karşılaştırma yapılan diğer numunelere oranla daha iyi bir balistik performans sergilediği görülmüştür. Bu çalışmanın devamında, üretilen numunelerin malzeme karakterizasyonları tamamlanarak mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve sonlu elemanlar modelinin oluşturularak nanogözenekli yapının optimize edilmesi planlanmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada kullanılan nanogözenekli alüminanın üretimine verdiği destek için, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Biyomedikal Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Fatih Büyükserin'e, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Nanotıp Laboratuvarı asistanları Merve Çelik ve Pınar Ertürk'e teşekkür ederiz. Ayrıca, malzeme tedariki ve SEM görüntülemeleri için 5. Ana Bakım Fabrika Müdürlüğü'ne; balistik testlerde verdikleri destek için CES İleri Kompozit ve Savunma Teknolojileri firmasına teşekkür ederiz. Aynı zamanda bu çalışmayı 2209-B Üniversite Öğrencileri Sanayiye Yönelik Araştırma Projeleri Desteği Programı kapsamında desteklemeye layık gören TÜBİTAK'a (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

- 3M Dyneon™ THV 221GZ Fluoroplastic Granules. (n.d.).
MatWeb. <https://www.matweb.com/search/datasheettext.aspx?matguid=1b6fa0ee852d45b1a7ddbda8b5c8186b>
- Akella, K., & Naik, N. (2015). Composite Armour—A Review. *Journal of the Indian Institute of Science*, 95, 297-312.
- Dai, J., Singh, J., & Yamamoto, N. (2017). *The effect of nano pore size and porosity on deformation behaviors of anodic aluminum oxide membranes*. 218-229. Paper presented at SAMPE Seattle 2017 Conference, Seattle, United States.
- Dancer, C., Spawton, J., Falco, S., Petrinic, N., & Todd, R. (2019). Characterisation of damage mechanisms in oxide ceramics indented at dynamic and quasi-static strain rates. *Journal of the European Ceramic Society*, 39(15), 4936–4945.
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.06.054>
- Dresch, A. B., Venturini, J., Arcaro, S., Montedo, O. R., & Bergmann, C. P. (2021). Ballistic ceramics and analysis of their mechanical properties for armour applications: A review. *Ceramics International*, 47(7), 8743–8761.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.12.095>
- Dyatkin, B., & Gamache, R. M. (2018). Ballistic performance of front-facing fluoropolymer-coated armor composites. *International Journal of Impact Engineering*, 114, 63–68.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.12.005>
- Hogan, J. D., Farbaniec, L., Shaeffer, M., & Ramesh, K. T. (2014). The Effects of Microstructure and Confinement on the Compressive Fragmentation of an Advanced Ceramic. *Journal of the American Ceramic Society*, 98(3), 902–912.
<https://doi.org/10.1111/jace.13353>
- Mohotti, D., Ngo, T., Mendis, P., & Raman, S. N. (2013). Polyurea coated composite aluminium plates subjected to high velocity projectile impact. *Materials & Design (1980–2015)*, 52, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.05.060>
- Özşahin, E., & Tolun, S. (2010). Influence of surface coating on ballistic performance of aluminum plates subjected to high velocity impact loads. *Materials & Design*, 31(3), 1276–1283. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.09.018>
- Übeyli, M., Yıldırım, R. O., & Ögel, B. (2007). On the comparison of the ballistic performance of steel and laminated composite armors. *Materials & Design*, 28(4), 1257–1262.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.12.005>
- Venkatesan, J., Iqbal, M., Gupta, N., Bratov, V., Kazarinov, N., & Morozov, F., 2017. Ballistic Characteristics of Bi-layered Armour with Various Aluminium Backing against Ogive Nose Projectile. *Procedia Structural Integrity*, 6, 40–47.
<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.11.007>
- Wang, L., Kanesalingam, S., Nayak, R., & Padhye, R. (2014). Recent Trends in Ballistic Protection. *Textiles and Light Industrial Science and Technology*, 3(0), 37.
<https://doi.org/10.14355/tlist.2014.03.007>
- Yadav, R., Naebe, M., Wang, X., & Kandasubramanian, B. (2016). Body armour materials: from steel to contemporary biomimetic systems. *RSC Advances*, 6(116), 115145–115174. <https://doi.org/10.1039/c6ra24016j>