

yüksek çekme gerilmesi, yüksek elastisite modülü ve yüksek elektriksel iletkenliğe sahip lif grubudur (Afshari et al., 2008). PPID liflerinin üretim teknolojileri ve kullanım alanlarının geliştirilmesi günümüzde araştırma konusu olarak yerini korumaktadır.

3. ZIRH TASARIMLARINDA DARBE DAYANIMINA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

Üretilen balistik panel ve koruyucu zırhların darbe dayanım testleri incelendiğinde, darbe dayanımına etki eden faktörler; malzeme özellikleri, kumaş yapısı, mermi geometrisi, darbe hızı, tabaka sayısı, sürtünme ve sınır koşulları olarak sınıflandırılabilir (Tabiei and Nilakantan, 2008).

3.1. Malzeme özellikleri

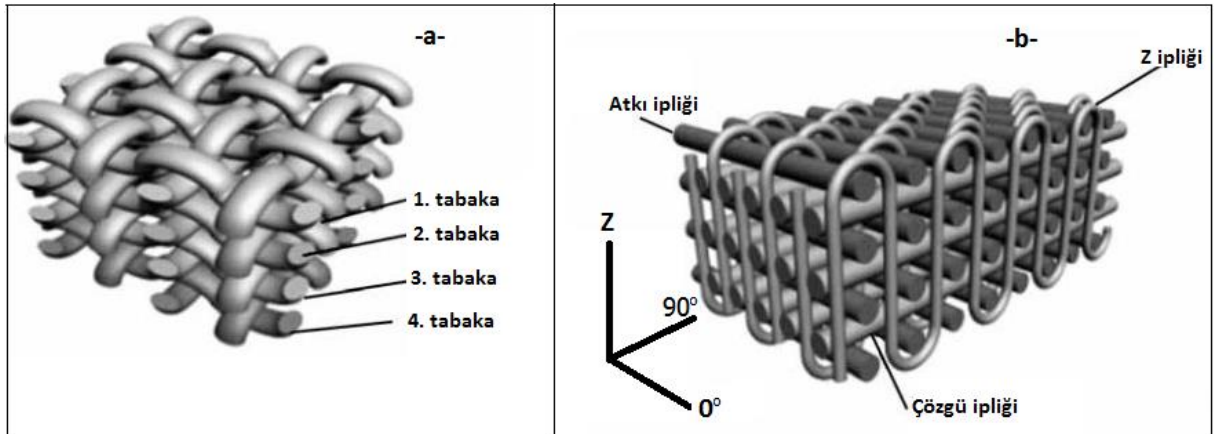
Zırh tasarımlarında balistik dirence etki eden malzeme özellikleri malzemenin çekme gerilmesi, elastisite modülü ve yoğunluğudur. Yüksek elastisite (E) ve düşük yoğunluğa (d) sahip olan malzemelerin darbe etkisini daha geniş bir alana yayarak darbenin noktasal etkisini azalttığı görülmüştür. Bu durum, matematiksel olarak merminin zırha çarptığı noktada oluşturduğu darbe dalgası ile açıklanabilir (Roylance, 1980). Darbe dalgasının aktarım hızı; (c)

$$c = \sqrt{\frac{E}{d}} \quad (1)$$

eşitliğinden hesaplanmaktadır. Balistik direnci etkileyen diğer bir faktör ise hacim-ağırlık oranıdır [52]. Farklı tiplerdeki lif ve kompozitler ile yapılan çalışmalarda, yüksek hacim-ağırlık oranına sahip kompozit malzemelerin daha yüksek balistik direnç gösterdiği sonucuna varılmıştır. Aynı şekilde elastisitesi yüksek malzemelerin enerji sönümleme kapasitesinin daha yüksek olduğu bildirilmiştir (Lin and Bhatnagar 1992).

4.2 Kumaş Yapısı

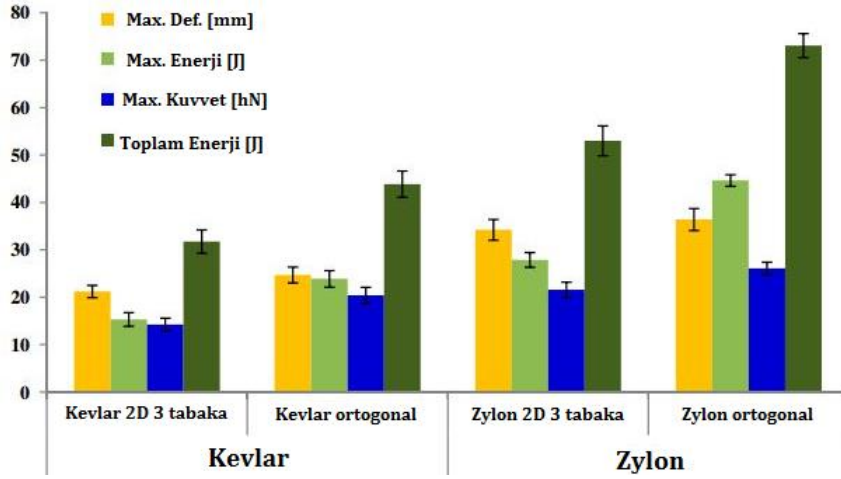
Kumaş yapısı, kumaşı oluşturan örgünün, örgüyü oluşturan ipliğin ve ipliği oluşturan lifin tüm özelliklerini silsile olarak taşımaktadır. Fakat tek başına kumaş yapısıyla ilgili bilgiler balistik performansın tahmin edilmesi için yeterli değildir. Kumaşların balistik direncin belirlenmesinde kumaş malzeme özellikleri ve kumaş dokuma özelliklerinin bir arada değerlendirilmesi gerekmektedir (Yumak vd., 2013). Şekil 8'de düzlemsel ve üç boyutlu kumaşlara ait yapı diyagramları verilmiştir.



Şekil 8. a) Düzlemsel (2D), b) Üç Boyutlu (3D) kumaşların yapı diyagramları (Zhang et al., 2014a)

Zırh tasarımında kullanılan yüksek mukavemetli kumaşlar üretim geometrilerine göre *tek yönlü plakalar*, *düzlemsel* (2D) ve *üç boyutlu* (3D) kumaşlar olmak üzere 3 farklı gruba ayrılır (Jovicic, 2003). Zırh tasarımında diğer kumaş türlerine göre daha yakın zamanlarda kullanılmaya başlanan 3D kumaşlar, 2D kumaşlara atkı ve çözgü ipliklerine ek olarak üçüncü bir Z ipliğinin dokuma sürecine eklenmesiyle üretilmişlerdir (Zhang et al., 2014b; Shi et al., 2011). Bu üç farklı kumaşın enerji sönümleme ve darbe yükleri karşısında hasar davranışları incelendiğinde tek yönlü plakaların, düzlemsel (2D) ve üç boyutlu (3D) kumaşlara kıyasla daha fazla enerji absorbe edebildiği fakat hasar alanlarının (2D) ve (3D) kumaşlara oranla daha büyük olduğu görülmüştür (Zhang et al., 2014a). Şekil 9'da 2D ve 3D Kevlar ve Zylon kumaşlara ait mekanik özellikler verilmiştir. Çalışma

sonuçlarına göre; Zylonun kevlarla, 3D'nin 2D'ye ve ortogonal yapının tabakalı yapıya karşı daha üstün performanslar sergilediği görülmüştür (Behera and Dash, 2013).



Şekil 9. Farklı dokuma geometrilerinin mekanik özelliklere etkileri (Behera and Dash, 2013).

3.3 Mermi Geometrisi

Merminin yüksek hızla gelerek zırha çarpması esnasında mermi baskıya ve kesme kuvvetine neden olur ve zırh penetrasyona uğrar. Mermi yavaşlayarak plakayı deforme etmeye başlar ve bu durum delaminasyona ve liflerin gerilmesine neden olur. Bu esnada merminin zırha temas yapacağı mermi ucu geometrisi basıncı arttırıp azaltacağı için deformasyon oluşumunda önemlidir (Jovicic, 2003). Mermi geometrisinin incelenmesinde etkili olan faktörler mermi ağırlığı, mermi yarıçapı ve mermi uç geometrisidir. Sabit kütledeki farklı yarıçaplarda aynı mermi geometrisine sahip mermiler ile yapılan deneyler sonucunda görülmüştür ki, artan mermi yarıçapıyla balistik limit hızı artmaktadır. Sabit yarıçap ve aynı mermi geometrisine sahip mermilerde kütle artışının merminin hızını düşürdüğü bildirilmiştir (Naik and Doshi, 2008). Farklı şekil, çap ve uzunluğa sahip mermilerin balistik testlerde hıza olan etkilerinin incelendiği diğer bir çalışmada, merminin geometrisi, çap ve uzunluğunun darbe dayanımını etkilediği bildirilmiştir (Nilakantan et al., 2013). Şekil 10'da farklı geometriye sahip darbe uçları gösterilmiştir.



Şekil 10. Darbe testlerinde kullanılan farklı geometriye sahip darbe uçları a) Düz, b) Yarı küresel, c) Ogival, d) Konik (Lim et al., 2002; Tan et al., 2003)

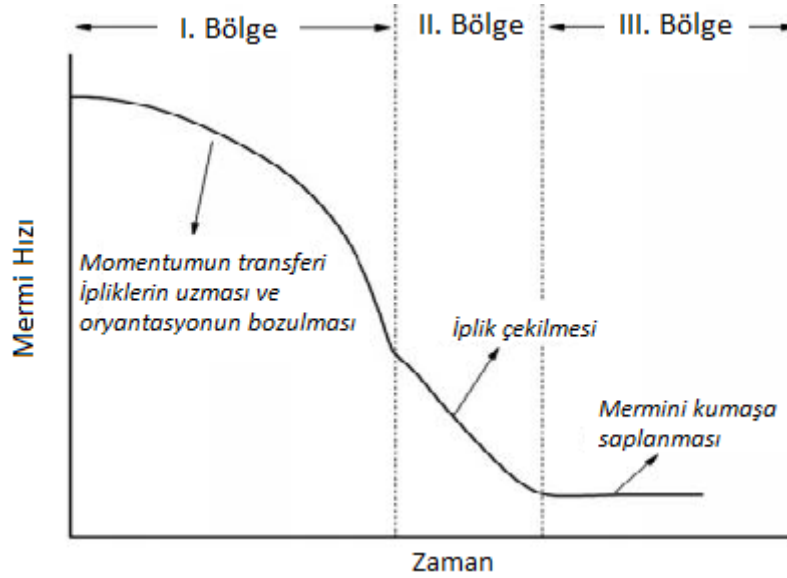
Merminin uç geometrisi kadar balistik direnci etkileyen diğer bir faktör merminin ağırlık ve boyutlarıdır. Farklı (küre, koni ve silindir) geometrilere sahip 3 mermi ve bu 3 merminin ağırlıkları eşit mermi ebatları farklı 6 mermiyle balistik test yapılmış ve sonuçlar Tablo 2'de gösterildiği gibidir. Burada çarpma hızı V_i (impact velocity), darbe sonrası artık hız V_r (residual velocity) olarak verilmiştir.

Tablo 2. Farklı ağırlık ve geometrilerdeki mermiler ile yapılan darbe test sonuçları (Nilakantan et al., 2013)

Mermi	Darbe Noktası	V_i (m/s)	V_r (m/s)
Küre(d=5.556 mm)	Boşluk-İplik	50	13.2 - 8,5
Küre(d=2.778 mm)	Boşluk-İplik	50	32.1 - 28,5
Büyük Koni (d=5.556 mm)	Boşluk	50	16.8
Küçük Koni (d=2.778 mm)	Boşluk	50	43.9
Büyük Silindir (d=5.556 mm L=5.556 mm)	Boşluk-İplik	50	-
Büyük Silindir (d=5.556 mm L=5.556 mm)	Boşluk-İplik	85	40.8 - 40,5

3.4 Mermi Hızı

Balistik testler sırasında hız limitinin altında bir hızla gelen merminin kumaşa temas ettiği ilk andan kumaşa nüfuz ettiği ana kadar geçen süreyi 3 aşamada incelenebilir. İlk aşamada merminin hızından dolayı sahip olduğu kinetik enerji ve momentum ipliklere aktarılır. İpliklerde uzama ve kumaş yapısında bozulmalar oluşur. İkinci aşamada ise aktarılan enerjinin bir sonucu olarak merminin temas ettiği ipliklerde çekilme meydana gelir. Üçüncü ve son aşamada ise merminin kumaşa saplanmasıyla birlikte merminin kinetik enerjisinin tamamı sönmülmüş olur ((Nilakantan and Gillespie, 2012). Şekil 11’de Balistik limitin altında bir hızla gelen merminin zamana bağlı hız grafiği verilmiştir.



Şekil 11. Balistik limitin altında bir hızla gelen merminin hız grafiği (Nilakantan and Gillespie, 2012)

3.5 Çoklu Tabakalar

Literatürde kumaşların balistik uygulamalarda çok tabakalı olarak uygulanmasına dair birçok çalışma bulunmaktadır (Özgültekin, 2012; Jacobs and Van Dingenen, 2001; Zhang et al., 2014a; Zhang et al., 2014b; Jovicic, 2003). Bu çalışmaların büyük bir çoğunluğu artık hız (V_r) ve çarpma hızı (V_s) üzerine yapılmıştır.

Çok katlı balistik uygulamalar ile ilgili araştırma yapan birçok araştırmacı hasar mekanizmaları öncelikle mermi geometrisi, hız, matris-lif yapılaşma durumlarına bağlı olduğunu görmüştür. Balistik uygulamalarda düşük matris-lif arası yapılaşma durumu çok katlı balistik uygulamalar için dayanımı arttırmaktadır (Özgültekin, 2012).

3.6 Sürtünme

Mermi-iplik ve iplik-iplik arasındaki sürtünme katsayısı ve aralarda kullanılan polimer matrisler enerji emilimini dolayısıyla balistik dayanımı arttırmaktadır. Sürtünme merminin hızını azaltarak artık hızın azaltılmasını sağlamaktadır. İplik-iplik arasındaki sürtünme balistik dayanımı mermi-iplik arasındaki sürtünmeden nispeten daha fazla etkilemektedir (Ha-Minh et al., 2012). Lifler ve lif-mermi arasındaki sürtünme

oranı liflerin darbe karşısında bir arada tutularak hareket etmelerini engellemektedir (Nilakantan and Gillespie, 2012). Sürtünme, hasar oluşumunu yavaşlatarak daha fazla enerjinin emilebilmesini sağlamaktadır. Sürtünme farklı sınır koşullarında farklı özellikler gösterebilmektedir. 4 kenarı sabit 0,5 sürtünme katsayısına sahip plakada enerji emilimi %11 artarken, 2 kenarı sabit plakada aynı sürtünme değerinde %24 oranında enerji emilimi artmaktadır (Duan et al., 2005).

3.7 Sınır Şartları

Balistik uygulamalarda malzeme cinsi, kumaş yapısı, mermi hızı ve geometrisi gibi faktörlerin yanında balistik limiti belirleyen diğer bir faktörde sınır şartlarıdır. Dört tarafı sabit bağlantı şekli iki tarafı sabit bağlantı şekline göre mermiyi daha hızlı yavaşlatabilmektedir Fakat iki tarafı sabit bağlantı şekli mermi hızını daha fazla düşürebilmektedir bu sebeple de mermi hızını daha uzun sürede yavaşlatmaktadır (Duan et al., 2005). İki tarafı sabit mekanizmada, hedef zırh diğer iki taraftan gerilme kabiliyetini korumaktadır. Bu durum mermi hızında yavaşlamaya neden olmaktadır.

4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Balistik bilimi üzerine yapılan birçok çalışma, devletler tarafından gizli tutulmasına rağmen, özellikle son yıllarda balistik panel ve kişisel koruyucu zırh üretimi ile ilgili birçok akademik çalışma da mevcuttur. Metal koruyucular ağırlıkları nedeniyle taşıma ve hareket kabiliyetlerini sınırlandırmaktadır. Bu yüzden zırh üretiminde ağır olan metal ve türevlerinin yerini yüksek fiziksel ve mekanik özelliklere sahip liflerden oluşan kumaşlar (Aramid, UHMWE, PBO, Cam Lifler ve PPID) almaya başlamıştır. Dış hava şartlarına ve UV ışınlarına karşı direnci düşük malzemelerin özellikleri değişik madde ve yöntemlerle artırılabilir. Bunların başında kaplama ve nano/makro boyutta partikül ilavesi gelmektedir. Özellikle TiO_2 ve SiO_2 partiküllerinin UV ışınlarına karşı etkili oldukları yapılan çalışmalarla desteklenmiştir Tatsumi et al., 1994; Deka and Maji, 2011).

Son yıllarda polimer biliminin ve teknolojisinin gelişmesiyle, polipropilen (PP), yüksek yoğunluklu polipropilen (HDPP) ve düşük yoğunluklu polietilen (LDPP) gibi polimerlerin dolgu maddesi olarak kullanıldığı balistik panel çalışmalarının sayıları da artmaktadır. Polimer ve yüksek mukavemetli lif kombinasyonlarında uyum sağlayıcı maddeler, epoksi ve poliüretan gibi tutkalların kullanılan materyale uygun olarak seçilmelidir. Balistik testleri etkileyen birçok (malzeme, mermi, sınır koşulları vb.) etken bulunmaktadır. Bu etkenlerin bireysel olarak belirlenmesi, yapılacak olan testlerin doğruluğu ve güvenli bir şekilde gerçekleştirilmesi için yeterli değildir. Farklı etmenlerin etkileşimi beklenen davranışı sergilemeyebileceği için, hazırlanan panel veya zırhın testlerinde bütün etmenler kontrol altında tutulmalıdır.

KAYNAKLAR

- Afshari, M., Kotek, R. and Chen, P. 2011. High Performance Fibers. High Performance Polymers and Engineering Plastics, 269-340.
- Afshari, M., Sikkema, D. J., Lee, K. and Bogle, M. 2008. High Performance Fibers Based On Rigid and Flexible Polymers. Polymer Reviews, 48(2), 230-274.
- Behera, B. K. and Dash, B. P. 2013. An Experimental Investigation into Structure and Properties of 3D-Woven Aramid and PBO Fabrics. The Journal of The Textile Institute, 104(12), 1337-1344.
- Bunsell, A. R. 1988. Fibre Reinforcements for Composite Materials, Elsevier Science Publishers.
- Candan, C. 2005. Zırh Teknolojilerindeki Gelişmeler. Zırh Teknolojileri Semineri, Ankara, Milli Savunma Bakanlığı Arge ve Teknoloji Daire Başkanlığı.
- Cavallaro, P.V. 2011. Soft Body Armor: An Overview of Materials, Manufacturing, Testing, and Ballistic Impact Dynamics, Naval Undersea Warfare Center Division Newport.
- Csukat, G.F. 2006. A Study on The Ballistic Performance of Composites, Macromol Symposia, 239: p. 217-226.
- Deka, B. K. and Maji, T. K. 2011. Effect of TiO_2 and nanoclay on the properties of wood polymer nanocomposite. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 42(12), 2117-2125.

- Duan, Y., Keefe, M., Bogetti, T. A. and Cheeseman, B. A. 2005. Modeling The Role of Friction During Ballistic Impact of a High-Strength Plain-Weave Fabric. *Composite Structures*, 68, 331–337.
- Ha-Minh, C., Boussu, F., Kanit, T., Crépin, D. and Imad, A. 2012. Effect of Frictions on The Ballistic Performance of a 3D Warp Interlock Fabric: Numerical Analysis. *Applied Composite Materials*, 19(3-4), 333-347.
- Iannucci, L. and Pope, D. 2011. High Velocity Impact and Armour Design, *Express Polymer Letters*, 5, 262–272.
- Jacobs, M. J. N. and Van Dingenen, J. L. J. 2001. Ballistic Protection Mechanisms in Personal Armour. *Journal of Materials Science*, 36(13), 3137-3142.
- Jordan, J. B. and Naito, C. J. 2014. An Experimental Investigation of The Effect of Nose Shape on Fragments Penetrating GFRP. *International Journal Of Impact Engineering*, 63, 63-71.
- Jovicic, J. M. 2003. Numerical Modeling and Analysis of Static and Ballistic Behavior of Multi-Layered/Multiphase Composite Materials Using Detailed Microstructural Discretization (Doctoral Dissertation, Drexel University).
- Karahan, G. 2008. Balistik Yapılarda Balistik Performansı Etkileyen Parametrelerin İncelenmesi, *Tekstil Teknolojileri Dergisi*, 3, 51-58.
- Kılıç, N. 2014. Development of Multi-Layer Ballistic Armor Panel with Simulation and Ballistic Tests. Marmara University, Department of Mechanical Engineering. Ph. D. Thesis.
- Kitagawa, T., Murase, H. and Yabuki, K. 1998. Morphological Study on Poly- p-phenylenebenzobisoxazole (PBO) Fiber. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 36(1), 39-48.
- Ko, F. and Geshury, A. 2002. Textile Preforms for Composite Materials Processing, *Advanced Materials and Processes Information Analysis Center, AMPT-19*.
- Lane, R. A. 2005. High Performance Fibers for Personnel And Vehicle Armor Systems, *Amptiac Quarterly*, 5, 1-10.
- Lim, C. T., Tan, V. B. C. and Cheong, C. H. 2002. Perforation of High-Strength Double-Ply Fabric System by Varying Shaped Projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, 27(6), 577-591.
- Lin, L. and Bhatnagar, A. 1992. Ballistic Energy Absorption of Composite-III, 24th International SAMPE Technical Conference. p. 291-306.
- Liu, S., Wang, J., Wang, Y. and Wang, Y. 2010. Improving The Ballistic Performance of Ultra High Molecular Weight Polyethylene Fiber Reinforced Composites Using Conch Particles. *Materials & Design*, 31(4), 1711-1715.
- Mathur, A. and Netravali, A. N. 1996. Modification of Mechanical Properties of Kevlar Fibre by Polymer Infiltration. *Journal of Materials Science*, 31(5), 1265-1274.
- Naik, N. K. and Doshi, A. V. 2008. Ballistic Impact Behaviour of Thick Composites: Parametric Studies. *Composite Structures*, 82(3), 447-464.
- Nilakantan, G. 2013. Filament-Level Modeling of Kevlar KM2 Yarns for Ballistic Impact Studies. *Composite Structures*, 104, 1-13.
- Nilakantan, G. and Gillespie, J. W. 2012. Ballistic Impact Modeling of Woven Fabrics Considering Yarn Strength, Friction, Projectile Impact Location, and Fabric Boundary Condition Effects. *Composite Structures*, 94(12), 3624-3634.
- Nilakantan, G., Wetzel, E. D., Bogetti, T. A. and Gillespie, J. W. 2013. A Deterministic Finite Element Analysis of the Effects of Projectile Characteristics on The Impact Response of Fully Clamped Flexible Woven Fabrics. *Composite Structures*, 95, 191-201.
- Özgültekin, S. E. 2012. Balistik Zırhlarda Kullanılan Kompozit Malzeme Kombinasyonlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Roylance, D. 1980. Stress Wave Propagation in Fibers-Effects of Cross Overs, *Fibre Science Technoloji*, 13(5), 385–395.
- Seely, L., Zimmerman, M. and Mclaughlin, J. 2004. The Use of Zylon Fibers in Uldb Tendons, *Advances in Space Research*, 33(10), 1736-1740.
- Shi, W., Hu, H., B. Sun., B. and Gu, B. 2011. Energy Absorption of 3D Orthogonal Woven Fabric Under Ballistic Penetration of Hemispherical- Cylindrical Projectile. *The Journal of The Textile Institute* 102(10), 875–889.
- Tabiei, A. and Nilakantan, G. 2008. Ballistic Impact of Dry Woven Fabric Composites: A Review, *Applied Mechanics Reviews*, 61, 010801-12.
- Tan, V. B. C., Lim, C. T. and Cheong, C. H. 2003. Perforation of High-Strength Fabric by Projectiles of Different Geometry. *International Journal of Impact Engineering*, 28, 207–222
- Tatsumi, T., Fukuda, S. and Kadomura, S. 1994. Radiation damage of SiO₂ surface induced by vacuum ultraviolet photons of high-density plasma. *Japanese journal of applied physics*, 33(4S), 2175.
- URL-1. <http://www.coastalwindsports.com/WhoseLine.html> (Alıntının yapıldığı tarih:10.10.2016)

- Wall, J.W., 2002, An Investigation of The Ballistic Impact Resistance of Modified 2x1, Four-Step, Three-Dimensionally Braided Composites with Axial Reinforcement, Master of Science, Graduate Faculty of North Carolina State University, Carolina.
- Wallenberger, F. T., Watson, J. C., and Li, H. 2001. Glass Fibers. Materials Park, OH: ASM International, 27-34.
- Walling, S. J. 1985. S-2 Glass Fiber: Its Role in Military Applications, International Conference on Composite Materials, Metallurgical Society of AIME, August 1985, p. 443-456
- Yang, D. 2011. Design, Performance and Fit of Fabrics for Female Body Armour, The Degree of Doctor of Philosophy, Faculty of Engineering and Physical Sciences.
- Yang, H. H. 1993. Kevlar Aramid Fiber. John Wiley & Sons.
- Yumak, N., Pekbey, Y. and Aslantaş, K. 2013. Zırh Tasarımında Kullanılan Kompozit Malzemelerin Deformasyon Karakteristiğinin Araştırılması. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 10(4), 1-21.
- Zhang, A.D., Sun, Y.A., Chen L., Zhang, S. and Pan, N., 2014b, Influence of Fabric Structure and Thickness on The Ballistic Impact Behavior of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene Composite Laminate. Materials and Design, 54, 315–322.
- Zhang, C. H., Huang, Y. D., Yuan, W. J. and Zhang, J. N. 2011. UV Aging Resistance Properties of PBO Fiber Coated with Nano-ZnO Hybrid Sizing. Journal of Applied Polymer Science, 120(4), 2468-2476.
- Zhang, Q., Fang, X., Sun, X., Sun, B. and Qiu, Y. 2014a. Comparison of The Mechanical Properties Between 2D and 3D Orthogonal Woven Ramie Fiber Reinforced Polypropylene Composites. Polymers & Polymer Composites, 22(2), 187.