

---

## FARKLI TAKVİYE MALZEMELERİNİN KOMPOZİT MALZEME MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİNE ETKİSİ

*Mahmut BİNGÖL\**  
*Kadir ÇAVDAR\*\**

---

Alınma: 15.12.2015; kabul: 29.08.2016

**Öz:** Modern imalatlarda yüksek mekanik ve teknolojik özelliklere ihtiyaç olduğunda geleneksel malzemeler bunlara cevap veremez. Yüksek mukavemet ve hafiflik talepleri birbiri ile çelişen iki mühendislik isteği olup ancak kompozit malzemeler bunları sağlarlar. Bu nedenle kompozit malzemelerin endüstride kullanımları giderek zorunlu hale gelmiştir. Sheet Molding Compounds (SMC) yüksek mukavemetli parçaların seri olarak üretildiği başta otomotiv olmak üzere birçok alanda kullanılan termoset bir polimer kompozit yöntemidir.

Bu çalışmada, mukavemeti artırmak için rasgele fiberler yerine dokuma cam fiberler kullanılarak elde edilen mekanik değerler irdelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde; rasgele cam fiber malzeme ile çekme gerilmesi değeri ortalama 67,58 MPa değerine ulaşırken, aynı şartlar ve ağırlık oranında dokuma cam elyaf takviye malzemesi kullanıldığında bu değer ortalama 137,29 MPa değeri sağlanmıştır. Mukavemet değerlerinde sağlanan artış yaklaşık iki katır.

**Anahtar Kelimeler:** Kompozit, SMC, Takviye Malzemesi, Dokuma

### **Effects of Different Reinforcements for Improving Mechanical Properties of Composite Materials**

**Abstract:** The traditional materials are inadequate to the needs of modern manufacturing such as high mechanical and technological properties. There is a conflict with the demands of high-strength and lightweight, however the composite materials with diverse reinforcements provide each of the requests. Therefore, the use of the composite materials in industrial applications has become increasingly necessary. Sheet Molding Compounds (SMC) is a production method which the thermoset polymer composite parts with high-strengths can be manufacture in series for many areas, including automotive.

In this study, the mechanical properties of two different SMC materials were examined which obtained using woven glass fibers and nonwoven (random) fibers as reinforcements to increase strengths of the resulting material. The experimental results showed that the tensile strength of the SMC specimen with random fibers reached an average value of 67.58 MPa, but the average value of the specimen with woven glass fiber reinforcement in the same conditions and a weight ratio was reached up to 137.29 MPa. With this new material, the tensile strength values were increased approximately to double.

**Keywords:** SMC, Composites, Woven Fiber, Mechanical Properties

---

\* Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Görükle Kampüsü, 16059 Bursa.

\*\* Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Görükle Kampüsü, 16059 Bursa.

İletişim Yazarı: Kadir Çavdar (cavdar@uludag.edu.tr)

## 1. GİRİŞ

Polimer esaslı kompozit malzemeler yüksek dayanım, sertlik, hafiflik ve kimyasal dayanım gibi özelliklerin istendiği otomotiv, uzay, deniz araçları, inşaat, elektrik gibi birçok endüstri alanında yaygın biçimde kullanılmaktadır. SMC üstün özelliklerinden dolayı bahsi geçen alanlarda kullanılan bir polimer kompozit yöntemidir. SMC iki adımda üretilir. Birinci adımda özel olarak hazırlanan cam fiber, doymamış polyester, dolgu ve katkı maddeleri bir araya getirilip karıştırılarak pestil (prepreg) biçiminde malzemeler hazırlanır. İkinci adımda da olgunlaşması için bir süre bekletilen pestiller yüksek basınçlı ısıtmalı kalıplarda istenen şekle getirilir (Rosato ve Rosato, 2004; Voorn ve diğ., 2001).

SMC yönteminde üretim süreci uygun şekilde gerçekleştirildiğinde üstün nitelikli malzemeler elde edilebilir. Daha iyi mekanik özellikler, kısa çevrim süresi, mükemmel yüzey kalitesi, estetik, korozyon dayanımı, düşük maliyet gibi özellikler SMC ile üretimin tercih edilmesinin nedenlerindedir. Bu özelliklerinden dolayı özellikle otomotiv sanayiinde saç malzeme yerine kullanımı giderek artmaktadır (Merle ve diğ., 1998; 10-18; Kim ve diğ., 2014).

SMC üretim aşamalarını başarılı bir şekilde tamamlamak için prosesin hem kimyasal hem de mekanik olarak kontrolünün sağlanması gerekmektedir. Bu da ancak üretim süreci hakkında çok iyi bir bilgi birikimi sayesinde mümkündür. Örneğin üretim süreci esnasındaki hatalardan dolayı malzeme yüzeyinde veya içerisinde boşluk olursa, bu hem yüzey kalitesini düşürecek hem de son ürünün mekanik özelliklerini olumsuz etkileyecektir (Le ve diğ., 2008). Yine matris ve fiber arasındaki etkileşimler ile fiber oranı ve homojen dağılımı düzgün sağlanamazsa mekanik özellikler ve yüzey kalitesi olumsuz etkilenir [4-12]. Pestil içerisinde malzemelerin oranı fiberlerin dağılımı ve olgunlaşması da yine mekanik özellikleri etkileyen etkenlerdendir (Guiraud ve diğ., 2013).

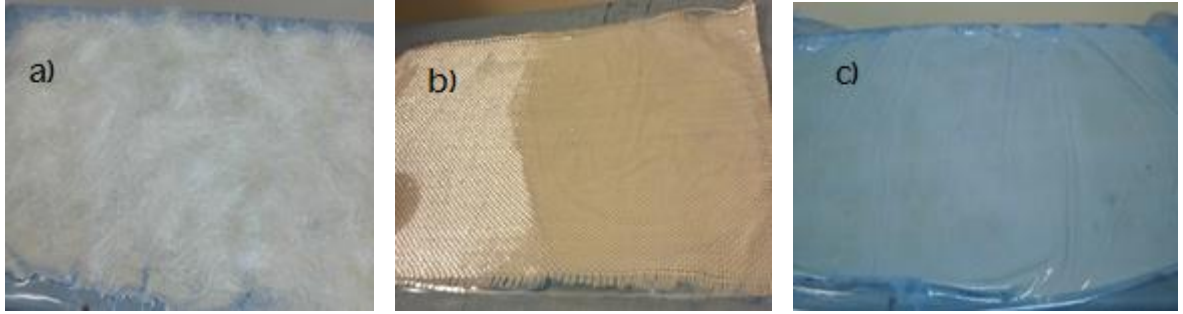
## 2. MATERYAL-YÖNTEM

SMC yöntemi ile kalıplama sonucu elde edilen nihai ürünün mekanik özellikleri genellikle takviye malzemelerinin cinsine, hacimsel oranına, matris içerisindeki dağılımına doğrudan bağlıdır. Hazırlanan pestil için özel bir formülasyon kullanılmıştır. Bu formülasyonda yaklaşık olarak %36 polyester, %10 termoplastik reçine, %30 kalsit ( $\text{CaCO}_3$ ), %20 elyaf takviye malzemesi, %4 ise diğer katkıları yer almaktadır. Formülasyonlarda malzemelerin cinsi, oranı ve dağılımı değiştirilerek malzemenin mekanik özellikleri değiştirilebilir. SMC levhaların üretimi için gerekli olan pestillerde genellikle rasgele fiber dağılımları kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise hem çeşitli boyutlarda kırılmış elyaflarla rasgele dağılımlı pestiller hem de dokuma fiber malzemesi takviye malzemesi olarak pestil hazırlanmış, bir süre olgunlaşması için bekletilmiştir. Burada R24-48-65 ile ifade edilen pestillerde, R; fiberin rasgele dağılımlı olduğunu 24-48 ve 65 sayıları ise elyafın mm olarak uzunluğunu ifade etmektedir. Dokuma elyafı yapılmış pestilde ise 6W, W; dokuma (woven) elyafı 6 sayısı ise dokuma elyafın kat sayısını ifade etmektedir, Şekil 1. Ağırlıkça aynı oranda takviye malzemesi olabilmesi için 500 gr/cm<sup>2</sup>'lik cam elyaf dokuma takviye malzemesinden 6 kat üst üste konularak dokuma pestil elde edilmiştir (6W).

SMC parçalar sıcaklık ve yüksek basınç etkisi altında üretildiği için kullanılan kalıbın bu şartlara uygun olması gerekmektedir. Bu şartlara uygun çalışabilmesi için ısı ve yüksek basınç dayanıklı özel çelik bir kalıp yaptırılmıştır. Isıtmanın sağlanabilmesi için kalıba rezistans bağlanmış ve bu rezistansların sıcaklık kontrolü için özel bir elektrik panosu hazırlanıp sıcaklıklar istenen değerde sabit tutulmuştur. Basıncı sabit değerde sürekli sağlayabilmek için ise kalıp hidrolik prese sabitlenmiştir Şekil 2-a. 140-150°C sıcaklık ve basınç altında pestiller kalıba yerleştirildikten sonra Şekil b) deki plakalar elde edilmiştir.

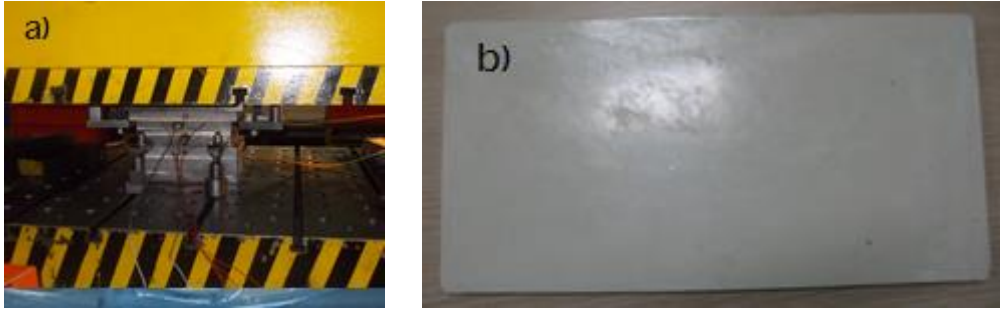
Üretilen bu plakalar, çekme deneyi numunesi için ISO 527, eğilme deneyi numunesi için ise ISO 178 standartlarına uygun olarak elmas testere ile kesilmiştir. Çekme deneyi için

hazırlanmış numuneler 5 mm/dk hızla Shimadzu marka çekme cihazında test edilmiştir. Eğilme deneyi için hazırlanmış numuneler ise 2 mm/dk hızla Zwick eğilme test cihazında deneye tabi tutulmuştur, Şekil 3.



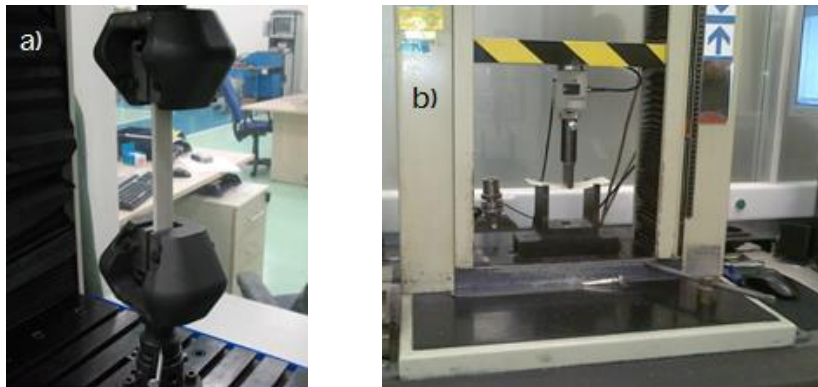
**Şekil 1:**

a) Rasgele cam elyafla hazırlanmış, b) Dokuma cam fiberlerle hazırlanmış pestil  
c) Pestillerin son hali



**Şekil 2:**

a) Kalıbın prese bağlanması, b) Üretilmiş plakalar



**Şekil 3:**

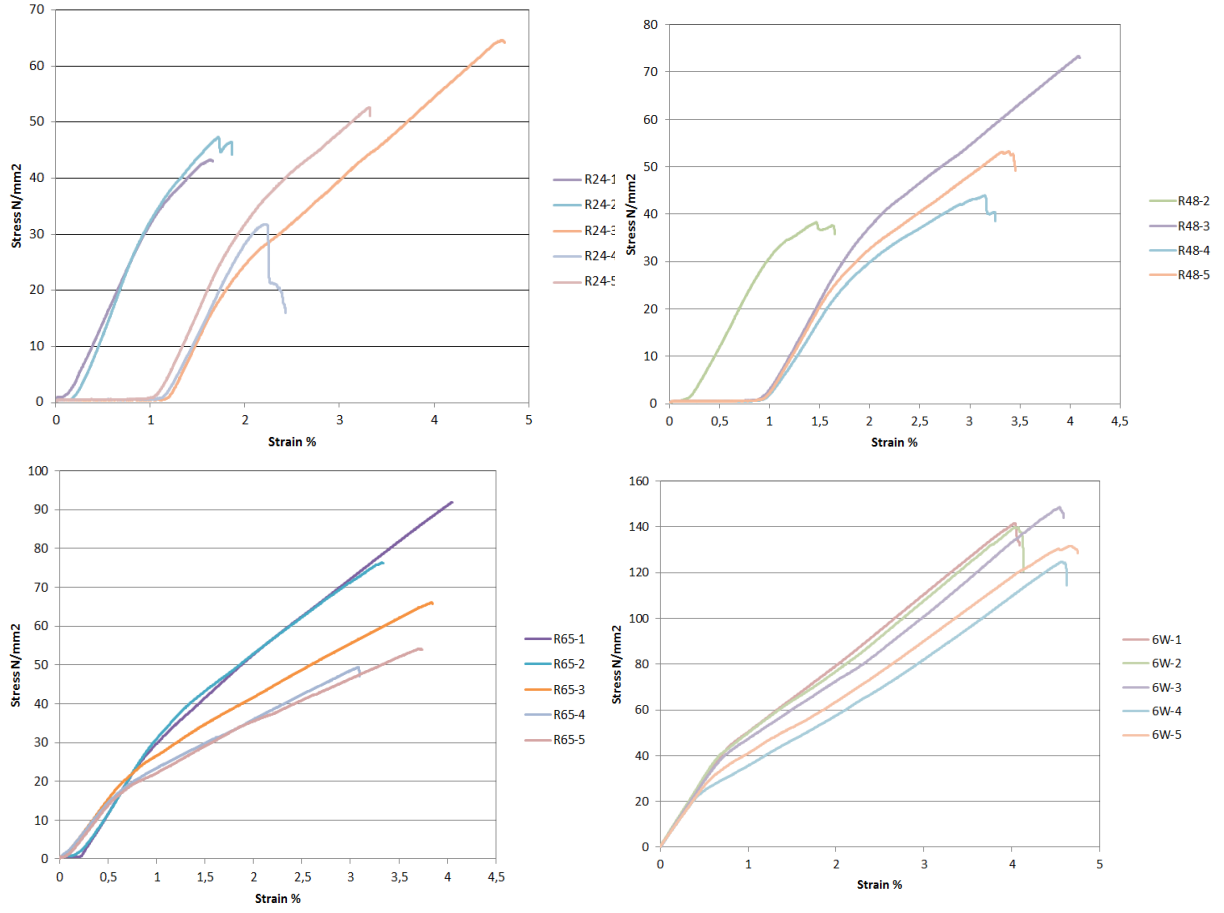
a) Numunenin çekme cihazında teste tabi tutulması, b) Numunenin eğilme cihazında teste tabi tutulması

### 3. SONUÇLAR

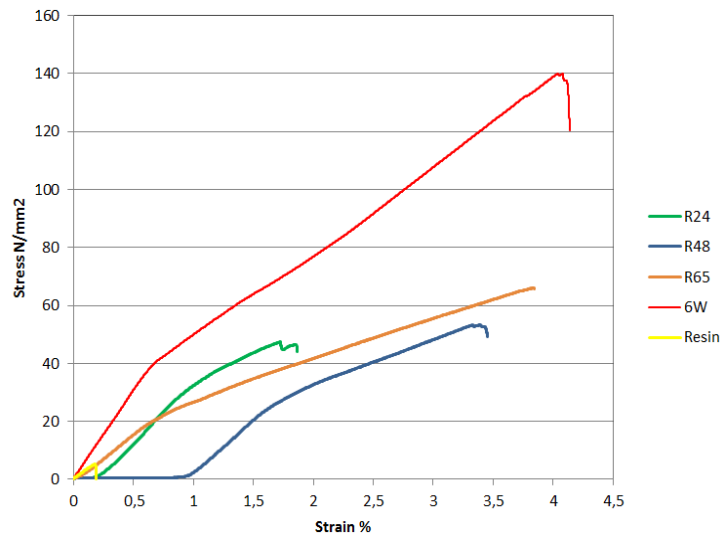
Mekanik değerleri etkileyen en önemli malzeme takviye malzemeleridir. Takviye malzemesi olarak kullanılan elyaf malzemelerinin cinsi, oranı ile parça içindeki dağılımı ve yönelimi malzeme mukavemetini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu çalışmada farklı tip elyaf malzemeler kullanılarak üretilen SMC malzemelerin mekanik özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu nedenle testi yapılmak istenen her takviye malzemesi için altı adet plaka üretilmiş bunların içinden beş tanesi seçilerek elmas testere ile standartlara uygun olarak kesilmiştir. Normalde rasgele dağılımlı fiberlerin mekanik değerleri literatürde mevcuttur. Yalnız elde edilen bu değerler literatürden alınmak yerine bizzat yapılmıştır. Bunun sebebi literatürde verilen mekanik değerlerin hangi elyaf oranları ve pestil formülasyonu ile elde edildiği yani üretim şartları açık olarak verilmemektedir. Dokuma ile rasgele elyaf arasındaki kıyaslamanın daha gerçekçi ve sağlıklı olabilmesi için tüm çalışmadaki numunelerin aynı şartlarda üretilmesi gerekmektedir. Ayrıca takviye malzemesinin kompozit malzeme üzerindeki etkisinin daha açık görülebilmesi için sadece reçineden elde edilen plakalardan elde edilen numunelerde aynı şartlarda teste tabi tutulmuş ve tüm sonuçlar Tablo 1.'de verilmiştir. Bu sonuçlar aynı zamanda grafik üzerinde Şekil 4.'te gösterilmiştir. Bu tablo ve grafikler incelendiğinde reçinenin mukavemet değeri ile en düşük mukavemet değerine sahip elyaf katkılı kompozit malzeme arasında bile yaklaşık 10 kat bir mukavemet değeri olduğu görülmektedir. Buradan asıl mukavemeti sağlayan malzemenin takviye malzemesi olduğu bir kez daha görülmüştür. Kompozit malzemelerin üretim sürecindeki kontrolün tam olarak sağlanamamasından dolayı elde edilen değerlerde bir miktar sapma olmaktadır. Bu sapmalar Şekil 4.'teki grafikler incelendiğinde açıkça görülmektedir. Kompozit malzemelerle üretilen malzemelerin testlerinde bu sapmalar genellikle beklenen bir sonuçtur. Bu durumun fiziksel ve kimyasal birçok nedeni olması ile birlikte en önemli üç tanesi aşağıda verilmiştir:

- Malzemenin pestil üretimi esnasında fiberin istendiği gibi yönlendirilip homojen olarak dağıtılamaması
- Reçine ile elyaf arasındaki bağlanmanın sağlanamaması
- Üretim esnasında örneğin pestil malzeme içindeki fiberlerin kalıp içindeki yayılımının ve yönlenmesinin kontrol edilememesi

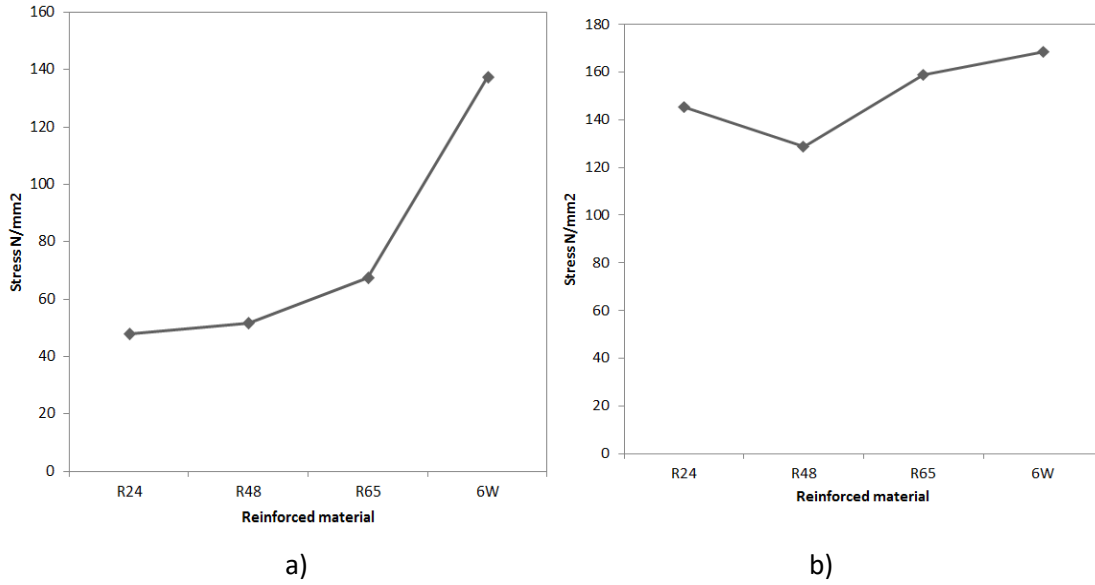
Elyaf uzunluğu arttıkça malzeme mukavemetinde belli bir değere kadar artış olmaktadır. Bu artış genellikle elyafın ortalama uzunluğunun 65 mm'ye kadar olması ile mümkün olup bu değer arttıkça bir miktar düşüş olmaktadır. Bunun sebebi kırılmış cam elyafın matris malzeme içinde dönerek bükülmesi ile açıklanabilir. Aslında daha uzun elyaflar da denenerek bu düşüşü gösteren sonuçlar elde edilmiş lakin bu grafiklerin burada gösterilmesine gerek duyulmamıştır. Elyaf uzunluğunun artışı ile mukavemet değerlerinin artması Tablo 1. ve Şekil 4'de açıkça görülmektedir. Bu mukavemet artışının elyaf uzunluğunun değerlerinin değiştirilmesi ile sağlanamayacağı açıktır. Bunun için yaklaşık üç yıl süren bir projede SMC'ye uygun üretim süreci kurulup bu deneyler tamamlandıktan sonra bazı kompozit yöntemlerinde kullanılan dokuma malzemeler bu proje kapsamında SMC yöntemi için kullanılmıştır. Bu dokuma takviye malzemesi kullanıldığında malzemenin mekanik değerleri üzerinde büyük bir artış görülmektedir. Söz konusu durum Şekil 5. ve Tablo 1.'de görülmektedir. Ortalama sonuçlara yakın olan değerlere ait olan eğriler kullanılarak Şekil 6.'da görülen grafik elde edilmiştir. Grafik incelendiğinde dokuma takviye malzemesi kullanıldığında mekanik değerlerde yaklaşık iki kat bir artış olduğu açıkça görülmektedir. Ağırlıkça yaklaşık olarak aynı miktarda cam elyaf kullanılarak bu kadarlık bir artışın elde edilmesi şaşırtıcı ve beklenmeyen bir sonuç olarak gözlemlenmiştir. Kompozit malzemelerde asıl mukavemet değerlerini sağlayan unsurun takviye malzemesi olduğu yine reçinenin çekme gerilmesi eğrisinin beraber çizilmesi ile gösterilmeye çalışılmıştır.



**Şekil 4:**  
*Rasgele ve dokuma fiber malzeme ile üretilen plakaların çekme deneyi sonuçları*



**Şekil 5:**  
*Rasgele ve dokuma fiber malzemelerin çekme gerilmesi değerlerinin bir arada gösteren grafik*



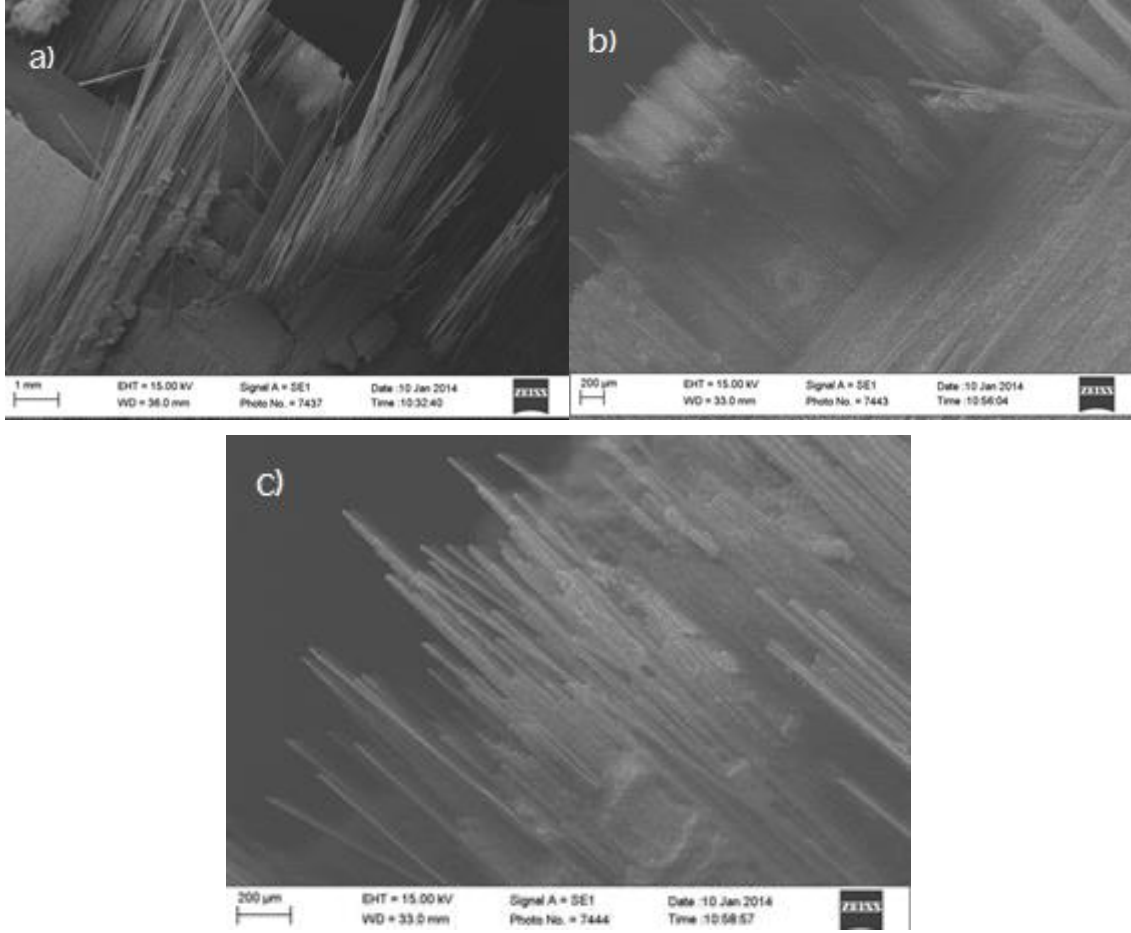
**Şekil 6:**  
a) Çekme b) Eğilme gerilmelerinin ortalama değerleri

**Tablo 1. Çekme ve eğilme gerilmesinin ortalama değerleri**

	Reçine	R24	R48	R65	6W
Çekme dayanımı	5,19	47,95	51,51	67,58	137,29
Eğilme dayanımı	22,11	145,19	128,57	158,89	168,56

### 3.1 Kırık Yüzeylerin SEM (Scanning Electron Microscope) Görüntüsü

Çekme ve eğilme numunelerinin kırık yüzey görüntülerini elde etmek için Carl Zeiss Evo40 marka SEM cihazı kullanılmıştır. Numunelerin yüzeyi altın paladyum (gold palladium) kaplandıktan sonra vakum altında inceleme altına alınmıştır. Kompozit malzemelerde hasar mekanizması genellikle üç aşamada gerçekleşmektedir, İlk aşamada matriste mikro çatlaklar oluşmakta daha sonra fiber ile matris arasında ayrılma en son arayüzeyde ayrılma ve fiberlerin kırılması ile hasar oluşmaktadır. (19-21, Huang ve Zhao, 2012). Bu mekanizma bazı yayınlarda kırılma mekaniği ile açıklanmaya çalışılmıştır (Ogi ve Yamanouchi, 2011). Şekil 7 a)'da üst üste yerleştirilmiş dokuma takviye malzemeler, b)'de ise dokuma malzemesini oluşturan enine ve boyuna fiber malzemeler, c)'de ise boyuna olan fiberler daha yakından görülmektedir. Şekil 7 c)'den de görüldüğü gibi fiberler kuvvet yönünde düzgün bir biçimde dizildiği için daha fazla yük taşımakta böylelikle daha yüksek mukavemet değerlerine ulaşılmaktadır. Fiberler rasgele dağılımlı SMC malzeme gibi sıyrılarak (pull-out) çıkmamakta kopana kadar direnç göstermektedir. Bu direnç esnasında fiberler nispeten uzadığı için üzerindeki matris malzeme dağılarak dökülmektedir.



**Şekil 7:**

*Dokuma SMC malzemenin a) 18x b) 58x c) 100x oranında büyütülmüş SEM görüntüsü*

Şekil 8 a)'da ise SMC R65 malzemenin dik yönde kırık yüzey görüntüsü görülmektedir. Bu parça incelendiğinde ise fiberlerin bir kısmı sıyrılıp çıkarken olurken bir kısmı ise kopmuştur. Şekil 8 b)'de numunenin içyapısında fiberlerin rasgele dağılımı ve c)'de ise enine yönde kırık yüzey görülmektedir. Şekillere göre, fiberlerin sadece bir kısmı kuvvet yönündedir yani kuvvet taşıyan fiberler daha az miktardadır. Bunun yanında bu fiberlerin bir kısmı da sıyrılınca daha düşük mekanik özellikler ortaya çıkmaktadır.

#### **4. TARTIŞMA-ÖNERİLER**

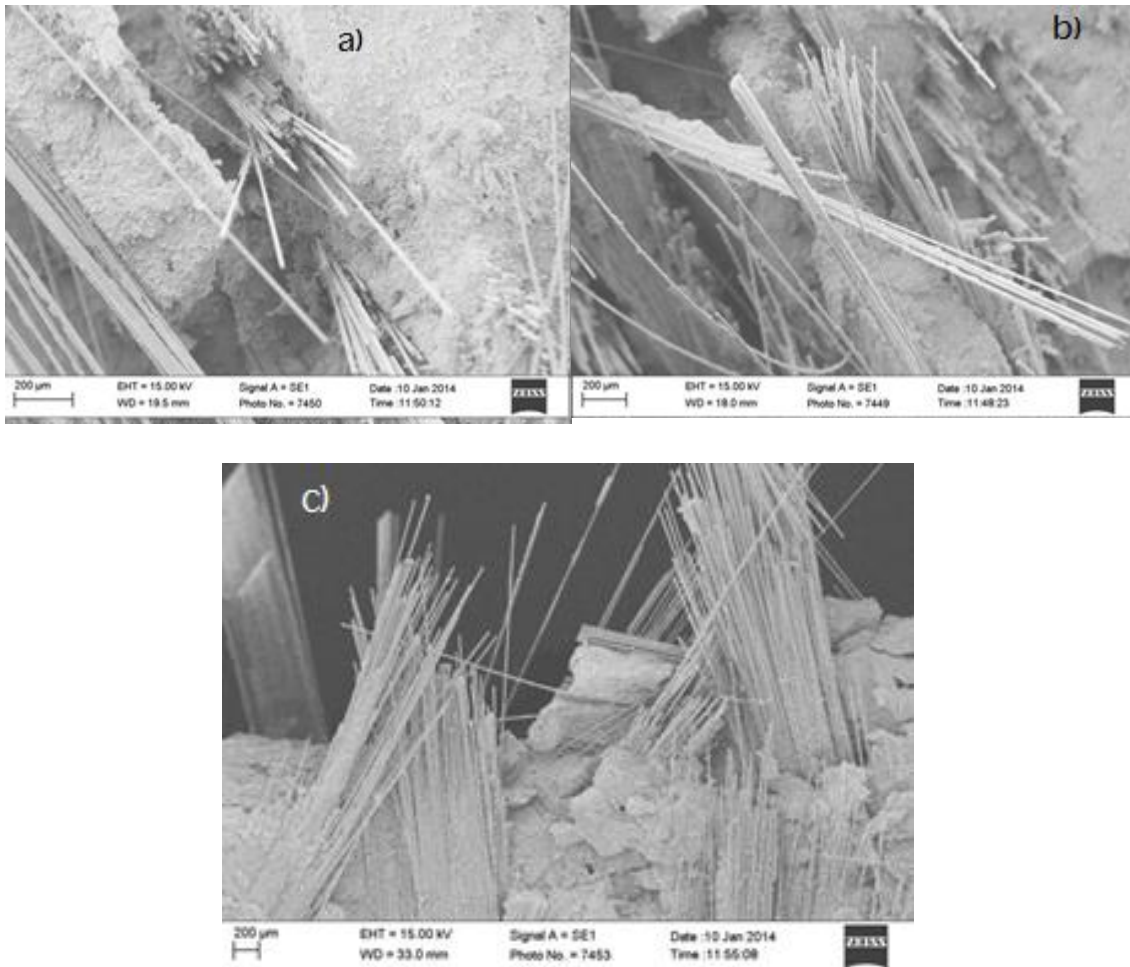
Enerji ve çevre problemlerinin arttığı dünyamızda bu sorunların çözümü istenen özellikleri sağlayabilecek üstün nitelikli kompozit malzemelerin üretilmesi ile mümkündür. Kompozit malzemeler daha iyi özellikler sunarken, üretim yöntemlerinin geliştirilmesi ve bileşimindeki malzemelerin iyileştirilmesi, bu malzemeleri daha da mükemmel yapmaktadır. Kompozit malzeme yöntemlerinden biri olan SMC ile üretilen parçalarda kimyasal ve fiziksel birçok etken mekanik özellikleri değiştirmektedir. Bu etkenlerin kontrolünün sağlanması daha iyi kompozit malzemelerin üretilmesine imkân vermektedir. Bu etkenlerin başında takviye malzemesi gelmektedir. Sonuçlar incelendiğinde rasgele cam fiber malzeme ile çekme gerilmesi değeri ortalama maksimum 67,58 MPa değerine ulaşılırken, aynı şartlarda ve ağırlık oranında dokuma cam elyaf takviye malzemesi kullanıldığında bu değer ortalama 137,29 MPa değerine



ulaşmaktadır. Özetle bu çalışma ile parçanın mekanik özelliklerinde tartışmasız en önemli parametrelerden biri olan takviye malzemesi değiştirilerek neredeyse iki kat daha yüksek mukavemet değerleri elde edilmiştir.

Malzeme içerisinde kullanılabilir takviye malzemelerinin hepsinin tek bir çalışmada denenmesi mümkün değildir. Gelecek çalışmalarda SMC içerisinde kullanılan mevcut takviye malzemeleri ile daha önce kullanılmamış takviye malzemelerinin birçok kombinasyonu denenerek daha üstün nitelikli veya kullanım amacına uygun malzemeler elde edilebilir.

Kompozit malzemelerde olduğu gibi SMC malzemelerinde üretimdeki en önemli eksiklik üretim süreçlerindeki tekrarlana bilirlirte yaşanan sıkıntılardır. Kullanılan mevcut takviye malzemelerle üretim yapılırken bile birçok problem yaşanmaktadır. Bu üretim süreçlerinin geliştirilmesi ile daha iyi mekanik özellik sağlayan takviye malzemelerinin kullanımı da yaygınlaşacaktır.



**Şekil 8:**

*Rasgele elyaflı (R65) SMC malzemenin a) 135x b) 100x c) 48x oranında büyütülmüş SEM görüntüsü*

## KAYNAKLAR

1. Abrams, L. M. ve Castro, J. M. (2003) Predicting Molding Forces During Sheet Molding Compound (SMC) Compression Molding. I: Model Development, Polymer Composites, June Vol. 24, No. 3.



2. Akermo, M. ve Astrom, B.T. (2000) Modelling component cost in compression moulding of thermoplastic composite and sandwich components, *Composites, Part A* 31 319–333.
3. Caprino, G. ve Santo, L. (1998) Interpretation of size effect in orthogonal machining of composite materials. Part II. Sheet moulding compound, *Composites, Part A* 29A 893–897.
4. Corre, S. L., Orge'as, L., Favier, D., Tourabi, A., Maazouz, A. ve Venet, C. (2002) Shear and compression behaviour of sheet moulding compounds, *Composites Science and Technology*, 62 571–577.
5. Feuillade, V., Bergeret, A., Quantin, A. ve Crespy, J.-C. (2006) Relationships between the glass fibre sizing composition and the surface quality of sheet moulding compounds (SMC) body panels, *Composites Science and Technology*, 66 115–127.
6. Fitoussi J., Bocquet M. ve Meraghni F. (2013) Effect of the matrix behavior on the damage of ethylene–propylene glass fiber reinforced composite subjected to high strain rate tension *Composites: Part B*, 45 1181–1191.
7. Fitoussi, J., Meraghni, F., Jendli, Z., Hug, G. ve Baptiste D. (2005) Experimental methodology for high strain-rates tensile behaviour analysis of polymer matrix composites, *Composites Science and Technology*, 65 2174–2188.
8. Guiraud , O., Dumont, P.J.J. ve Orge'as, L. (2013) How to Prepare SMC and BMC-like Compounds to Perform Relevant Rheological Experiments?, *Appl Compos Mater*, 20:157–169.
9. Huang, B. Z. ve Zhao L.J. (2012) Bridging and toughening of short fibers in SMC and parametric optimum, *Composites: Part B*, 43 3146–3152.
10. Jendli, Z., Meraghni, F., Fitoussi, J. ve Baptiste, D. (2004) Micromechanical analysis of strain rate effect on damage evolution in sheet molding compound composites *Composites, Part A* 35 779–785.
11. Kim, J.W., Kim, H.S., Lee D.G. (2014) Measurement of tensile strength and infrared thermography on unidirectional GFRP, *Materials Research Bulletin.*, vol. 58 35-38.
12. Kim, M-S., Lee, W-I., Han, W-S. ve Vautrin, A. (2011) Optimisation of location and dimension of SMC precharge in compression moulding process, *Computers and Structures*, 89 1523–1534.
13. Kim, S-Y. ve Im, Y-T. (1997) Three-dimensional Finite-element Analysis of Compression Molding of Sheet Molding Compound, *Journal of Materials Processing Technology*, 67 207-213.
14. Kim, S-Y. ve Im, Y-T. (1997) Three-dimensional thermo-viscoplastic analysis of compression molding of sheet molding compounds with fiber volume fraction prediction, *Journal of Materials Processing Technology*, 63 631-636.
15. Le, T.-H., Dumont, P.J.J., Orge'as, L., Favier, D., Salvo, L. ve Boller, E. (2008) X-ray phase contrast microtomography for the analysis of the fibrous microstructure of SMC composites, *Composites, Part A* 39 91–103.
16. Marissen, R. ve Linsen, J. (1999) Variability of the flexural strength of sheet moulding compounds, *Composites Science and Technology*, 59 2093-2100.
17. Merle, G., Allemand, J., Camino, G., Luda , M. P., Revellino, M. ve Blancon, R. (1998) Morphology analysis of microvoids in SMC: ageing effects, *Composites, Part A* 29A 1535–1543.
18. Ochola, R.O., Marcus, K., Nurick, G.N. ve Franz, T. (2004) Mechanical behaviour of glass and carbon fibre reinforced composites at varying strain rates, *Composite Structures*, 63 455–467.
19. Ogi, K. ve Yamanouchi M. (2011) Temperature Dependence of Flexural Strength of a CF-SMC, *Composite Appl Compos Mater*, 18:397–408.
20. Palmer, J., Savage, L., Ghita, O.R. ve Evans, K.E. (2010) Sheet moulding compound (SMC) from carbon fibre recycle, *Composites, Part A* 41 1232–1237.

21. Pickering , S.J. (2006) Recycling technologies for thermoset composite materials-current status, Composites, Part A 37 1206–1215.
22. Rosato D. ve Rosato D. (2004) Reinforced Plastics Handbook, Elsevier Science & Technology Books.
23. Taketa, I., Okabe, T., Matsutani H. ve Kitano, A. (2011) Flowability of unidirectionally arrayed chopped strands in compression molding, Composites, Part B 42 1764–1769.
24. Tataru, R.A. (2011) Chapter 17: Compression Molding, Edited:Kutz M. Applied Plastics Engineering Handbook, Processing and Materials, USA.
25. Voorn, B. V., Smit, H.H.G., Sinke, R.J. ve Klerk B. D. (2001) Natural Fibre Reinforced Sheet Molding Compound, Composites, Part A 32 1271-1279.