



FİBER TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİT YAPRAK YAYLARIN GELİŞİMİ

(DEVELOPMENT OF FIBER REINFORCED POLYMER COMPOSITE LEAF SPRINGS)

Cemal KOÇHAN¹, Melih BELEVİ¹

ÖZET/ABSTRACT

Bu çalışmanın amacı polimer kompozit yaprak yaylarda günümüze kadar olan gelişmeleri ele almak ve yapılacak yeni çalışmalara yol göstermektir. Kompozit malzemeler konusundaki araştırmaların ilerlemesi ile yaprak yayların fiber takviyeli polimer kompozit malzemelerden üretilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar neticesinde çelik yaprak yaylara nazaran polimer kompozit yaprak yaylar % 85'e varan hafiflik, daha yüksek yorulma ömrü, korozyona karşı yüksek direnç ve yüksek doğal frekans gibi avantajlara sahip olarak üretilmiştir. Bu makalede, polimer kompozit yaprak yaylar ile ilgili yapılmış olan önemli çalışmalar değerlendirilmiş ve yapılacak yeni çalışmalara yol gösterilmiştir

Aim of this study to review development of composite leaf springs and to sign new investigations. Knowing the composite materials in detail by improved studies, design attempts for fiber reinforced composite leaf springs are being increased. Fiber reinforced polymeric composite leaf springs produced with advantages of 85% weight reduction, improved fatigue life, better corrosion resistance and high natural frequency than steel leaf springs. In this paper important studies on polymeric composite leaf springs are reviewed and further studies announced.

ANAHTAR KELİMELELER/KEYWORDS

Yaprak yay, Polimer kompozitler, Mekanik özellikler, Sonlu elemanlar metodu
Leaf spring, Polymeric composite, Mechanical properties, Finite element method

¹ DEÜ, Makina Mühendisliği Bölümü, Bornova 35100, İZMİR

1. GİRİŞ

Yaprak yaylar otomobil gibi binek araçların, kamyonet, kamyon gibi hafif ve ağır ticari araçların, tren gibi demiryolu araçlarının süspansiyon sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu yaylar günümüze kadar geleneksel olarak çelik malzemeden imal edilmiştir. Ancak çelik malzemenin yaprak yay tasarımına elverişli olabilmesi için yeterli derecede sertleştirilebilmesi gereklidir. Bu da çeliğin tüm kesit boyunca homojen olarak martenzitik bir yapıya sahip olması ile gerçekleşir. Aksi takdirde kesit içinde martenzitik olmayan bölgeler yaprak yayın yorulma ömrünü kısaltır (SAE HS788, 1982). Ayrıca çelik malzemeden imal edilecek yaprak yayın yorulma ömrünü arttırabilmek için sıcak şekil verme ile sertleştirilmesi, ısıl işlem ile dekarbürizasyonu, kumlama ile çekme gerilmesine maruz kalan tarafta basma artık gerilmesi oluşturulması, öngerilme ile montaj edilmesi gibi her birinin belli sınırlar çerçevesinde yapılması gereken işlemler uygulanmalıdır (SAE HS788, 1982; Landgraf ve Francis, 1979).

Doğal kaynakların korunması ve enerji tasarrufu amacı ile otomobil üreticileri günümüzde ağırlık azaltılmasını temel amaç olarak ele almaktadır. Ağırlık azaltılması esas olarak daha iyi malzemelerin kullanılması, tasarım optimizasyonu ve daha verimli üretim süreçlerinin kullanılması ile mümkündür (Shankar ve Vijayarangan, 2006). Araç üzerinde süspansiyon sistemi tarafından desteklenmeyen ağırlığa yaylanmaz ağırlık denir (Subramanian ve Senthilvelan, 2009). Örneğin otomobillerde süspansiyon sistemlerinde kullanılan yaprak yaylar, yaylanmaz ağırlığın % 10'u ila % 20'sine sahip olduklarından ağırlık azaltılmasında oldukça iyi potansiyele sahip elemanlardır. Yaylanmaz ağırlığın azaltılması sürüş karakteristiğinin ve yakıt veriminin artmasını da sağlamaktadır (Rajendran ve Vijayarangan, 2001). Yapılan çalışmalarda, aynı niteliklere sahip kompozit yaprak yayda, çelik yaprak yayya göre % 85'e varan ağırlık azaltılması sağlanmıştır (Shankar ve Vijayarangan, 2006).

Genel olarak yaylar enerjiyi absorbe edip depolaması ve daha sonra geri vermesi için tasarlanan makina elemanlarıdır. Bundan dolayı malzemenin gerinme enerjisi yay tasarımında temel etken olmaktadır. Malzemenin özgül gerinme enerjisi:

$$U = \frac{\sigma^2}{\rho E} \quad (1)$$

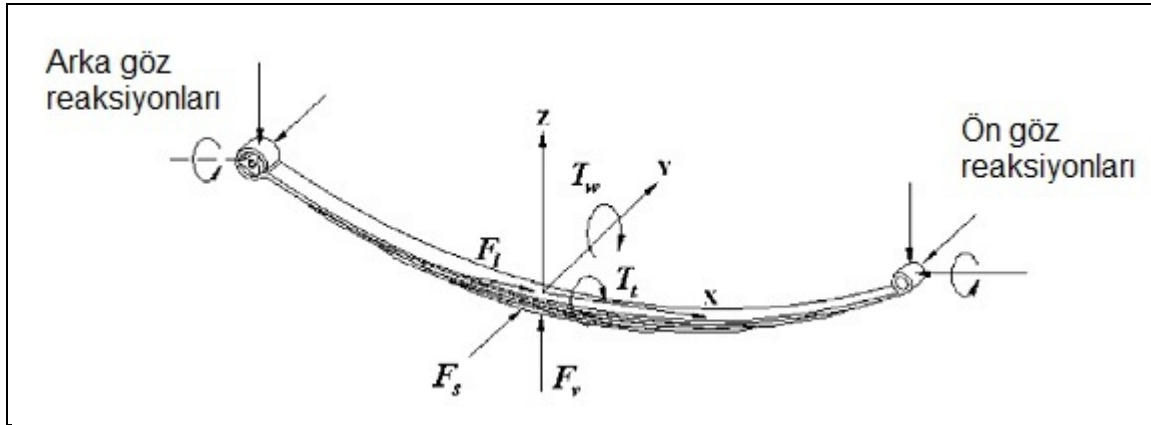
burada σ , ρ ve E sırasıyla, yay malzemesine ait mukavemet, yoğunluk ve elastisite modülü olmak üzere ifade edilir. Bu ilişkiden açıkça görüldüğü gibi düşük elastisite modülüne ve yoğunluğuna sahip bir malzeme yüksek özgül gerinme enerjisine sahip olmaktadır. Buradan kompozit malzemelerin yay uygulaması için güçlü adaylar olduğu rahatlıkla görülmektedir (Al-Qureshi, 2001).

Fiber takviyeli kompozit malzemelerin çeliklere nazaran önemli ölçüde hafiflik (çeliğe göre 5 kat daha fazla mukavemet/ağırlık oranına sahip olması) sağlamasının yanında; yüksek darbe kabiliyeti ile çalışma koşullarında oluşan gürültünün, titreşiminin, yol düzgünsüzlüklerinin azaltılması ve bu sayede konforlu sürüş sağlanması, yüksek korozyon direnci, tabakalar arası sürtünmenin olmaması, üstün yorulma mukavemeti ve "güvenli hasar" kabiliyeti gibi avantajları da vardır (Talib vd., 2010; Shokrieh ve Rezaei, 2003).

Yaprak yay tasarımında yayın kendisi kadar, yay uçlarının (gözlerin) da önemi fazladır. Çünkü yay gözleri enerji absorbe eden parça olmanın yanı sıra çökme boyunca yayın belli bir güzergahı takip etmesini sağlamaktadır (Shankar ve Vijayarangan, 2006). Ayrıca yay gözleri aks ile araç gövdesini birleştiren bir yapı elemanı olarak da görev yapar (Shokrieh ve Rezaei, 2003). Bundan ötürü bağlama gözlerinin mukavemeti, yaprak yayın süspansiyon sistemindeki performansında önemli rol oynar. Yaprak yay ile yay gözlerinin bağlantı mukavemeti, yayın

kendi mukavemetinden daha üstün olmalıdır ki yaprak yay süspansiyon sisteminde verimli çalışabilsin (Subramanian ve Senthilvelan, 2010).

Yorulma hasarı otomobil bileşenlerinin çalışma koşullarında uğradıkları baskın hasar türüdür. Bunun sebebi otomobil bileşenlerinin dinamik yüklere maruz kalmasıdır. Yaylar bu yüklerden diğer bileşenlere göre daha fazla etkilenir. Yaprak yaylar yol düzensizliklerinden gelen ani yükleri absorbe etmenin yanı sıra, yandan gelen yükler, fren ve hızlanmada oluşan momentler gibi çeşitli dış yükleri de taşımaktadır. Bu yükler içerisinde en önemlisi değişken düşey yüklerdir (Shankar ve Vijayarangan, 2006; Shokrieh ve Rezaei, 2003; Kumar ve Vijayarangan, 2007). Şekil 1 ile süspansiyon sisteminde kullanılan çok tabakalı bir yaprak yaya etkiyen yükler görülmektedir.



Şekil 1. Yaprak yaya etkiyen yükler (Shokrieh ve Rezaei, 2003). F_v : düşey yük, F_s : yan yük, F_l : uzunlamasına yük, T_t : burulma torkü, T_w : düzeltme torkü

Yaprak yayı konu alan çalışmalarda yedi yapraktan oluşan bir çelik yaya eş değer niteliklerde tek tabakalı polimer kompozit yaprak yayın üretilmesi, yay gözlerinin tasarlanması (Shankar ve Vijayarangan, 2006), termoplastik reçine ile tasarlanan bir yaprak yayda fiber boyunun yay özelliklerine (Subramanian ve Senthilvelan, 2009), bağlama gözlerine (Subramanian ve Senthilvelan, 2010) etkisi ve göz performansı (Subramanian ve Senthilvelan, 2010), bir kompozit yaprak yayın optimum tasarımı (Rajendran ve Vijayarangan, 2001), jip türü bir araçta kullanılmak amacı ile bir tek tabakalı polimer kompozit yaprak yayın imalatı (Al-Qureshi, 2001), otomotiv uygulamasında kullanılmak üzere bir yaprak yayın tasarımı ve analizi (Talib vd., 2010), otomobil arka süspansiyon sisteminde kullanılan dört tabakalı bir çelik yaya denk nitelikte bir polimer kompozit yaprak yayın ve yaprak gözlerinin optimizasyonu ile analizi (Shokrieh ve Rezaei, 2003), yedi yapraktan oluşan bir çelik yaya denk nitelikte çok tabakalı bir polimer kompozit yaprak yayın üretimi (Kumar ve Vijayarangan, 2007), güneş enerjisi ile çalışacak bir hafif aracın süspansiyon sistemi için bir polimer kompozit yaprak yay tasarımı ve üretimi (Sancaktar ve Gratton, 1999), yük vagonları gibi ağır demir yolu araçlarında kullanılan çok tabakalı çelik yaprak yaya denk niteliklerde polimer kompozit yaprak yay tasarımı, üretimi (Hou vd., 2005) ve yay gözlerinin tasarımı yapılmıştır (Hou vd., 2007).

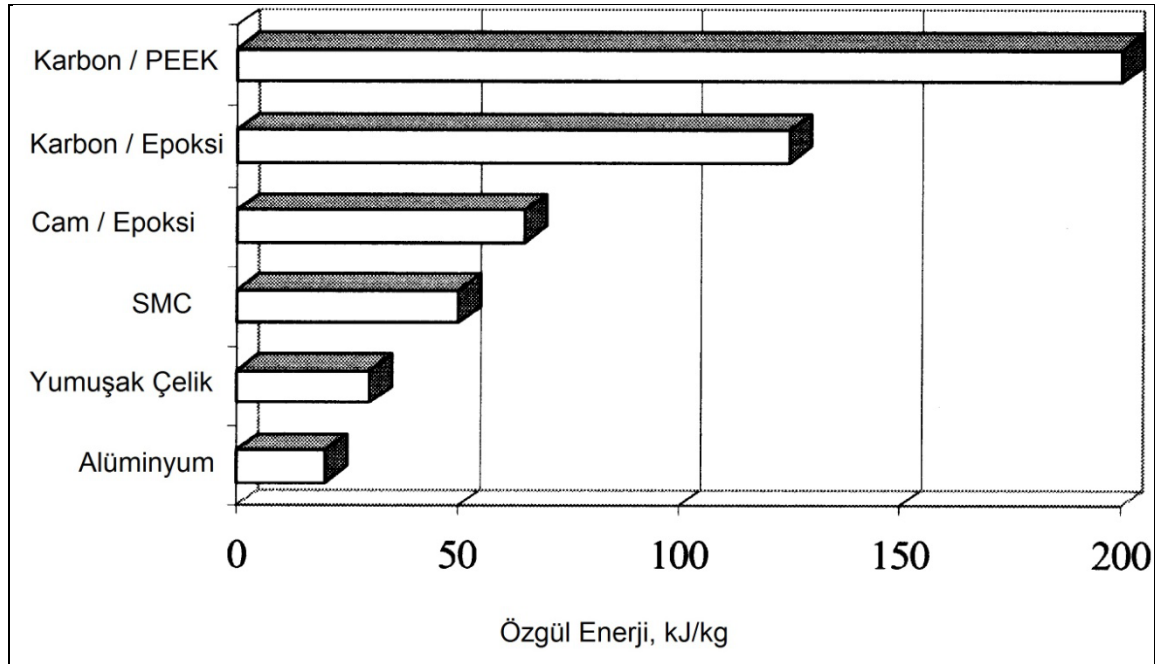
Bu çalışmanın amacı günümüze kadar yapılmış olan fiber takviyeli kompozit yaprak yayların gelişimini incelemek ve konu ile ilgili yapılabilecek ileri çalışmalara yol göstermektir.

2. YÖNTEM

2.1. Kullanılan Malzemeler

Araç süspansiyon sisteminde ihtiyaç duyulan gereksinimleri karşılayacak yay uygulamaları için grafit/epoksi kompozitin diğer kompozit malzemelere göre üstünlüğü aşikardır (Al-Qureshi, 2001). Ancak elde edilebilirlik ve maliyet sınırlamalarından ötürü yapılan çalışmalarda cam fiber takviyeli/epoksi, cam takviyeli polyester gibi termoset reçineli kompozitler ve cam takviyeli/polipropilen gibi termoplastik reçineli kompozitler kullanılmıştır (Shankar ve Vijayarangan, 2006; Al-Qureshi, 2001; Talib vd., 2010; Shokrieh ve Rezaei, 2003; Kumar ve Vijayarangan, 2007; Sancaktar ve Gratton vd., 1999; Hou vd., 2005; Hou vd., 2007; Subramanian ve Senthilvelan, 2009; Subramanian Subramanian ve Senthilvelan, 2010).

Süspansiyon sistemlerinde kullanılan bu yayların tasarımında kullanılan malzeme özellikle yorulmaya ve darbelere dayanıklı olmalıdır. Şekil 2 ile karbon/PEEK (polietereterketon) termoplastik ve karbon/epoksi, cam/epoksi gibi termoset kompozitlerin, SMC (Choped Strand Mat Composite - kırılmış keçe elyaf kompozit), yumuşak çelik ve alüminyum gibi metallerin özgül enerjileri verilmiştir. Termoset ile termoplastik reçineden oluşan kompozitlerin darbe (çarpma) dayanımları incelenmiş ve genel olarak termoplastik reçinelerin termosetlere nazaran daha yüksek enerji absorpsiyon kabiliyetinin olduğu belirtilmiştir (Ramakrishna, 1997)



Şekil 2. Çeşitli malzemelerin özgül enerjileri (Ramakrishna, 1997)

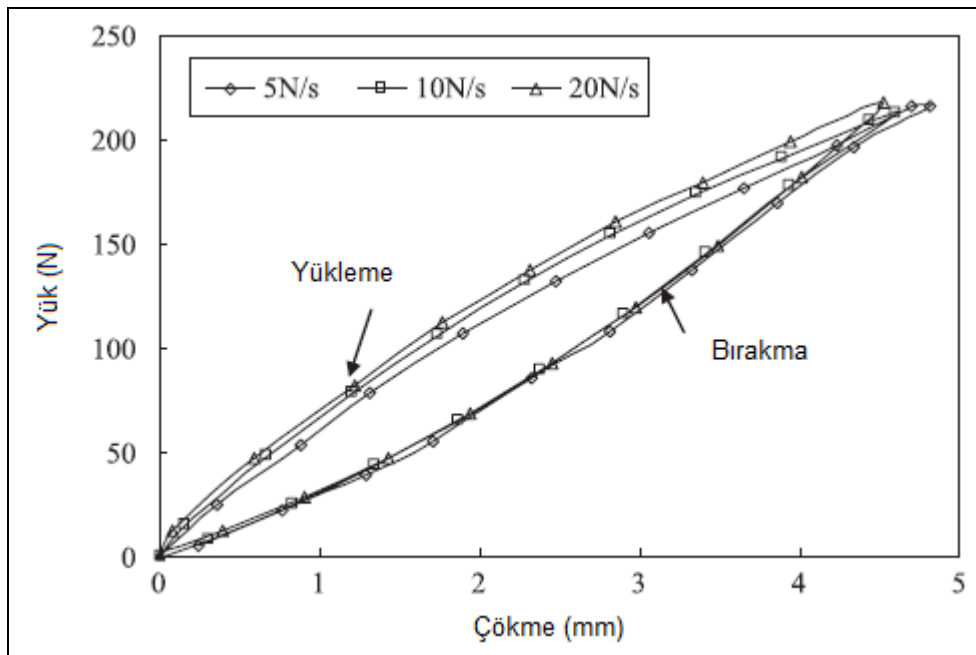
2.2. Üretim Metotları

Kompozit yaprak yay üretiminde örgülü E-camı fiber/epoksi malzeme ile kalıp kullanılarak el yatırması metodu uygulanmıştır. El yatırması metodunda kalıp içine tabakalamadan önce yapışmayı önlemek ve iyi bir yüzey elde etmek için jel/vernik sürülmüştür. Epoksi reçine her tabaka serildikten sonra emdirilmiş ve bir rulo vasıtasıyla tabakalar arasında hava kalması engellenmiştir (Shankar ve Vijayarangan, 2006). Kimi

çalışmalarda ise yaprak yay için hazırlanan kalıplara E-camı fiberler tabakalandıktan sonra epoksi reçine emdirilmesi için vakum torbasına alma metodu uygulanmıştır (Al-Qureshi, 2001; Sancaktar ve Gratton, 1999). Bir başka çalışmada ise E-camı/epoksi malzeme için, lif sarma metodu kullanılmıştır (Kumar ve Vijayarangan, 2007). Diğer bir çalışmada tek eksenli E-camı fiberler öncelikle bir dikiş makinasında dikilmiş ve matris malzemesi de yüksek sıcaklığa uygun polyester seçilerek reçine infüzyon metodu kullanılmıştır (Hou vd., 2005). Termoplastik reçine ile yaprak yay üretimi yapılmış olan bir çalışmada ise öncelikle uygun kalıp üretilmiş ve enjeksiyon metodu kullanılmıştır. Ham malzemeler önceden 2 saat süresince 80 °C de ısıtılmış ve 50D/d hızla enjeksiyon yapılmıştır (Subramanian ve Senthilvelan, 2009).

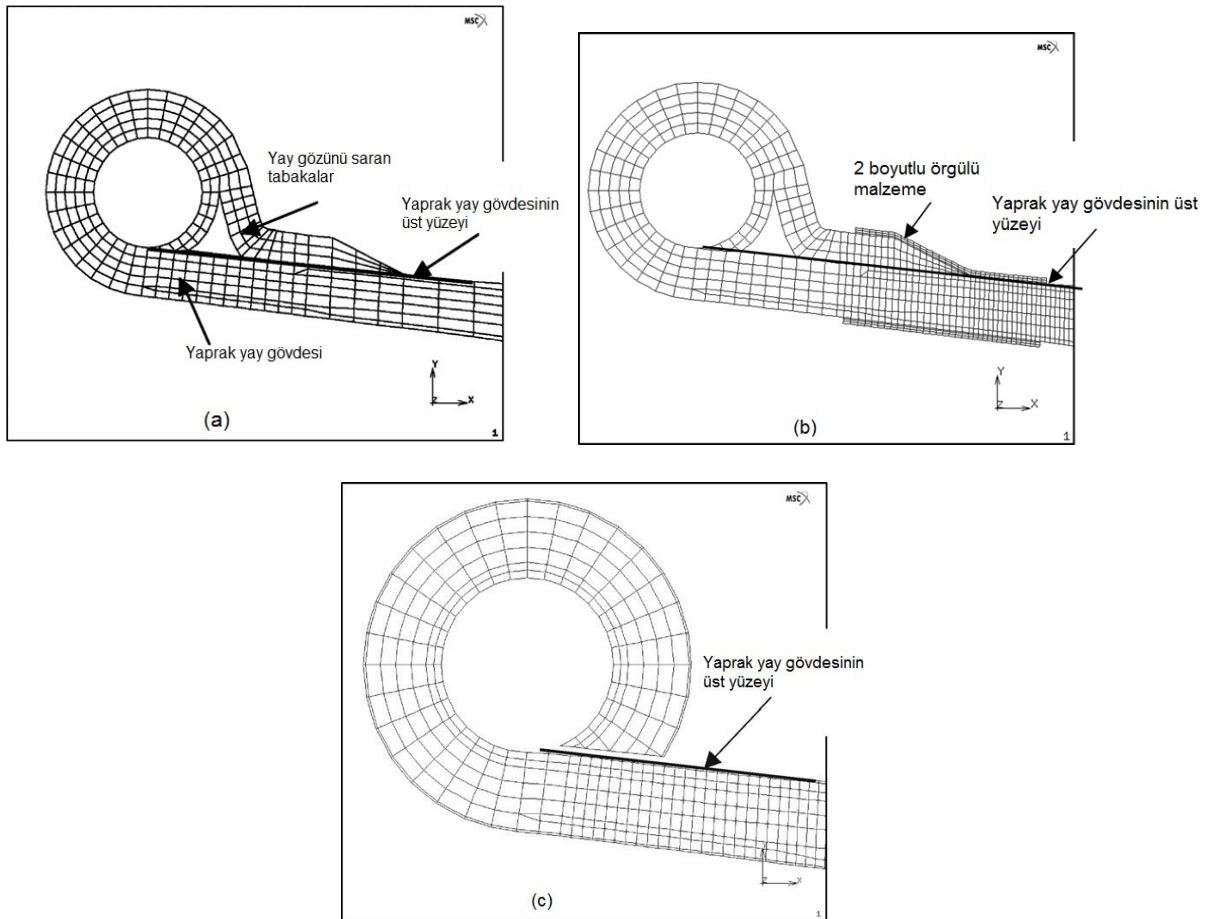
2.3. Uygulanan Testler

Yaprak yaylara uygulanması gereken statik ve dinamik test standartları Society of Automotive Engineers (SAE-Otomotiv Mühendisleri Birliği, Amerika) tarafından belirtilmiştir (SAE J1528, 1990). Bu standarda göre sıfırdan önceden belirlenmiş maksimum şekil değişimine kadar 50 N aralıklar ile ölçüm yapılarak yaprak yaya statik test uygulanmıştır (Shankar ve Vijayarangan, 2006). Polipropilen reçinede enjeksiyon ile üretilen kompozit yaprak yay SAE J1528 standartlarına uygun olarak 12 mm tasarım deformasyona kadar yüklenmiştir. Zamana bağlı yük deplasman grafiğini elde etmek için, yaprak yay 1, 5, 10, 50 mm/dk gerinme hızlarında test edilmiştir. Bunun yanında 5, 10, 20 N/s yükleme hızlarında yükleme ve serbest bırakma uygulanarak yük-deplasman grafiğinde histerisiz eğrisi, Şekil 3 elde edilmiştir. Fiber uzunluğunun kompozit yaprak yayın çekme mukavemetine etkisini görmek için ASTM D 638 standardına göre 5 mm/dk çekme hızı ile statik test uygulanırken dinamik özellikler için termalgravimetrik analiz (TGA) ve dinamik mekanik testler uygulanmıştır. Termalgravimetrik analiz için $\pm 0,3$ °C hassasiyette Mettler Toledo (TGA/SDTA 851) cihaz kullanılmış ve azot ortamında dakikada 10 °C sıcaklık artışı ile 25 °C ile 600 °C arasında test uygulanmıştır. Dinamik mekanik özellikler için ise ASTM D6382 standardına uygun numuneler ile 3N değişken yük 0,1 Hz ile 100 Hz arasında ve oda sıcaklığından 92 °C sıcaklığa kadar test edilerek hem frekansın hem de sıcaklığın etkisi incelenmiştir (Subramanian ve Senthilvelan, 2009).



Şekil 3. Uzun fiberli kompozit yaprak yayın histerisizliği (Subramanian ve Senthilvelan vd., 2009).

Yine yaprak yaya hidrolik test cihazı ile üç nokta eğme testi uygulanmıştır (Al-Qureshi, 2001). Çelik yaprak yayın çalışma şartlarına denk gelecek şekilde 3250 N düşey yük kullanarak elektro-hidrolik test cihazı ile kompozit yaprak yay statik olarak test edilmiştir. Bunun yanında sürtüş konforu açısından yayın doğal frekansı ölçülmüştür. Yol düzensizliklerinin oluşturduğu titreşimin maksimum 12 Hz frekans kabul edildiğini belirtilmiş ve dinamik durum için yaprak yaya 75 mm deformasyonluk çevrim ile 33 MHz frekansında yorulma testi 20000 çevrim uygulanmıştır (Kumar ve Vijayarangan, 2007). Yük vagonları gibi ağır demiryolu araçlarında kullanılmak üzere tasarlanan kompozit yaprak yaya uygulanan maksimum 105 kN statik yükte hasar görülmemiş ve yay 105±30 kN değişken yük altında 1 milyon çevrimlik yorulma testinde dayanmıştır (Hou vd., 2005). Bir diğer çalışmada ağır yükler altında çalışan kompozit yaprak yaylar için üç farklı göz tasarlanmıştır. Bu tasarımlardan ilk ikisinde, tabakaların göz etrafından yay gövdesinin üst yüzeyine doğru sarılarak oluşturduğu birleşik göz ucu yer alırken Şekil 4a ve Şekil 4b, üçüncü tasarım Şekil 4c açık göz ucuna sahiptir. Statik test için önce 100 kN'a kadar sonra 150 kN'a kadar 10 kN'luk artışlar ile yükleme yapılarak deformasyon kaydedilmiştir (Hou vd., 2007).



Şekil 4. Yaprak yay göz tasarımları (a) ve (b) kapalı göz tasarımı (c) açık göz tasarımı (Hou vd., 2007)

2.4. Analizler

Kullanım şartlarına göre sınır şartlarında polimer kompozit yaprak yayın tasarımında optimizasyona gidilmiştir (Shankar ve Vijayarangan, 2006; Rajendran ve Vijayarangan, 2001). Yaprak yayın sayısal modellenmesi ve analizi için Ansys (Shankar ve Vijayarangan, 2006; Shokrieh ve Rezaei, 2003; Kumar ve Vijayarangan, 2007; Sancaktar ve Gratton, 1999).

Lusas ve MSC MARC gibi sonlu elemanlar metoduna göre analiz yapan paket programlar kullanılmıştır (Talib vd., 2010; Hou vd., 2005; Hou vd., 2007). Yapılan analizlerden 3 boyutlu analizlerde 8 düğümlü SOLID 45 ve SOLID 46 (Ansys paket programının üst versiyonlarında Solid 45 elemanının yeni versiyonu olarak yer almaktadır) katı elemanı ile yapraklar arası temas yüzeyi için CONTACT 174 ve TARGET 170 kullanılırken 2 boyutlu analiz için düzlem eleman (2D Plain Strain Element) kullanılmıştır (Shokrieh ve Rezaei, 2003; Kumar ve Vijayarangan, 2007; Hou vd., 2007). Yapılan analizler statik yükleme durumu için uygulanmış ve yaprak yayın simetrik geometrisinden ötürü yayın yarısı ve dörtte biri modellenerek analiz edilmiştir (Shankar ve Vijayarangan, 2006; Talib vd., 2010; Shokrieh ve Rezaei, 2003; Kumar ve Vijayarangan, 2007; Sancaktar ve Gratton, 1999).

3. TARTIŞMA

Çelik yaprak yay ile aynı koşullarda çalışmak üzere tasarlanan E-camı/epoksi kompozit yaprak yay % 85 oranında hafiflik ile gerekli yeterliliği sağlamıştır. Yay gözleri için ise cıvatalı bağlama yerine yapıştırma ile bağlanan gözlerin yaprak yayın performansını daha iyi etkilediği belirtilmiştir. Ayrıca sürüş konforu açısından yapılan harmonik analiz sonucu kompozit yaprak yayın doğal frekans modları tespit edilmiş ve çelik yaprak yaydan daha yüksek olduğu, yol düzensizliklerinden ötürü rezonansa girmeyeceği belirtilmiştir. Yapılan testler ile sonlu elemanlar analizinin birbiri ile uyduğu bildirilmiştir (Shankar ve Vijayarangan, 2006).

Çizelge 1. Çelik ve kompozit yaprak yayların karşılaştırılması (Shankar ve Vijayarangan, 2006)

Malzeme	Statik yük (N)	Maksimum çökme (mm)		Maksimum gerilme (MPa)		Ağırlık (kg)
		FEM	Deneysel	FEM	Deneysel	
Çelik	3980	90	107,5	511	503,3	26
E-camı/Epoksi	4250	94	105,0	466	473,0	3,88

Çizelge 2. Kompozit yaprak yayın doğal frekansları (Shankar ve Vijayarangan, 2006)

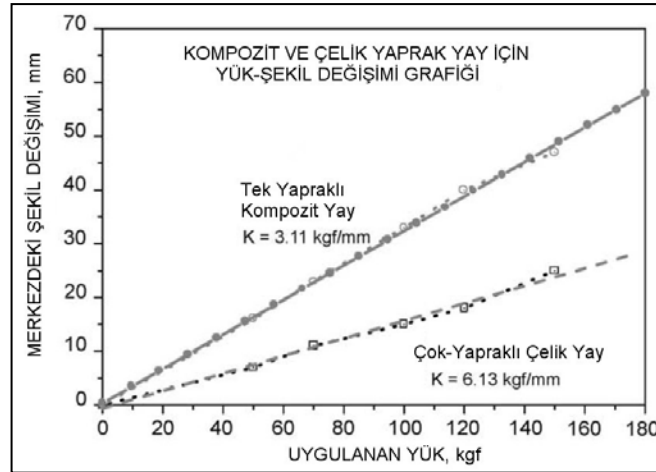
Mod	1	2	3	4	5
Frekans (Hz)	33	135	192	288,5	368,7

Yapılan testler sonucunda, 5 mm/dk hızla 12 mm çökme elde edene kadar kısa fiberden oluşan yayın 163 N, uzun fiberden oluşanın ise 481 N yüke dayandığı belirtilmiştir. Yayların yay katsayıları ise kısa fiberli yayın 12,5 N/mm iken uzun fiberli yayın 40,1 N/mm olarak bulunmuştur. Yaprak yayların çalışma koşullarında farklı çekme hızlarına maruz kaldıkları vurgulanmış ve bunun etkisini görebilmek için uygulanan testte çekme hızı 1, 5, 10, 50 mm/dk olarak uygulanmıştır. Deney sonuçlarında, kısa fiberli yapıda, uzun fiberli yapıya nazaran çekme hızına daha fazla hassasiyet görülmüştür. Enerji depolama kapasitesi bakımından ise kısa fiberli yayın 9,37 J, uzun fiberlinin ise 24,11 J enerji depoladığı belirtilmiştir. Kompozit yaprak yayların histerisiz karakteristiği 200 N yüke kadar uygulanan 5, 10, 20 N/s'lik yükleme ve serbest bırakma oranlarının tümünde kısa fiberli yapı uzun fiberli yapıya göre daha fazla enerji harcamıştır. Ayrıca değişen yükleme serbest bırakma oranlarına uzun fiberli yapının daha az hassas olduğu bildirilmiştir. Bunun sebebi olarak kısa fiberli yapıda var olan fiber uçlarının sayıca uzun fiberli yapıya göre daha fazla olması gösterilmiştir (Subramanian ve Senthilvelan, 2009).

Genetik algoritma metodu ile yapılan optimizasyon çalışmasında kompozit yaprak yayda çelik yaya nazaran %75,6 oranında hafiflik elde edilmiştir (Rajendran ve Vijayarangan,

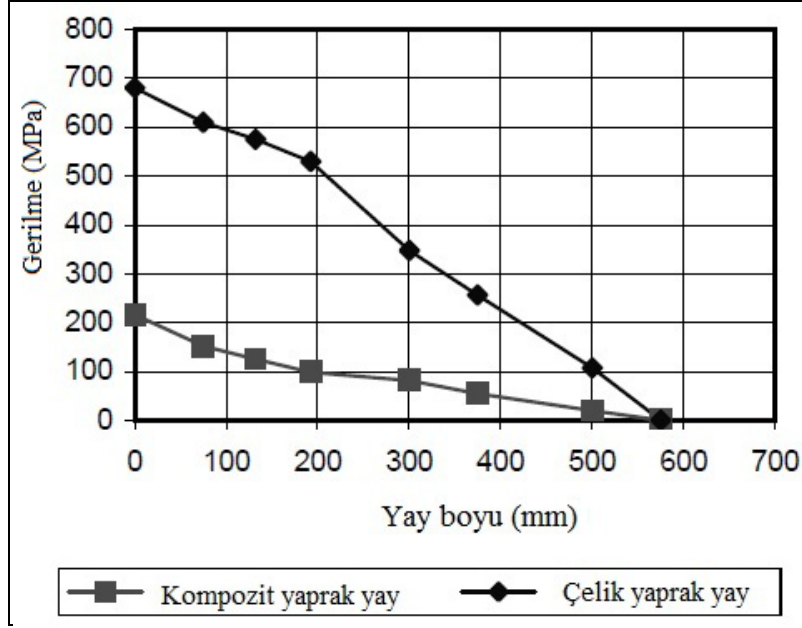
2001).

Bir jipde kullanılmak üzere çelik yaprak yaya (18,7 kg) denk niteliklerde üretilmek istenen polimer kompozit yaprak yay (3,5 kg) beklenen özellikleri yerine getirirken önemli ölçüde de hafiflik sağlamıştır. Diğer taraftan çelik yay E-camı/epoksi yaya göre daha iyi rijitliğe sahiptir, Şekil 5. Yaprak gözleri üretimde birleşik olarak ve yaydan ayrı olarak üretilip sonradan yapıştırarak iki farklı şekilde tasarlanmıştır. İkinci tasarımın kompozit yaprak yayın mukavemetini ve verimini arttırdığı saptanmıştır. Çelik yaprak yay ile kompozit yaprak yay araç üzerinde test edilmiştir. Sonuç olarak kompozit yaprak yayın daha esnek olduğu görülmüştür. Testler süresince kompozit yaprak yayın gürültüyü ve yol düzgünsüzlüklerini önemli ölçüde azalttığı bildirilmiştir (Al-Qureshi, 2001).

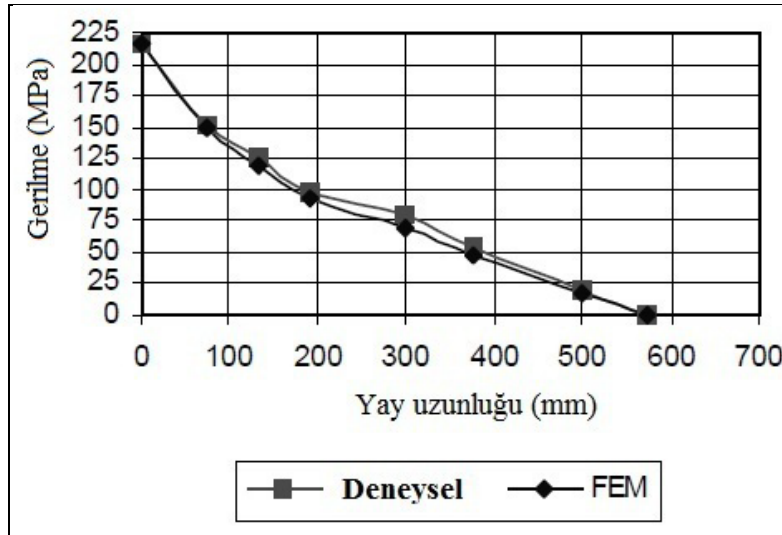


Şekil 5. Çok yapraklı çelik yay ile tek yapraklı kompozit yayların rijitlikleri (Al-Qureshi, 2001)

E-camı/epoksi kompozit yaprak yayı ile yapılan deneyler ve ömür analizi sonuçlarında çelik yaprak yaya nazaran % 67,35 daha az gerilme olduğu, % 64,95 daha rijit olduğu, % 126,98 daha yüksek doğal frekansa sahip olduğu ve % 68,15 daha hafif olduğu görülmüştür. Yaprak yayın analizi eğme yükü altında gerçekleştirilmiş olduğundan normal gerilme önemlidir. Kullanılan kompozit malzemenin boyuna bası mukavemeti, boyuna çekme mukavemetinden az olduğu için hasar boyuna bası gerilmesinden kaynaklanacaktır. Şekil 6'da kompozit yaprak yay ile çelik yaprak yayın statik test sonucu gösterdikleri gerilme grafikleri verilmiştir. Test sonuçlarında kompozit yaprak yayda 222 MPa maksimum bası gerilmesi görülürken, sonlu elemanlar analizinde bu değer 217 MPa olarak elde edilmiştir, Şekil 7 Buradan da test sonuçları ile analiz sonuçlarının uyduğu görülmektedir. Çelik yaprak yayda görülen maksimum gerilme ise 680,05 MPa değerindedir. Cam fiber/epoksi kompozitin bası mukavemeti 680 MPa iken çeliğin akma dayanımı 1175 MPa'dır. Buradan çelik yayın emniyet katsayısı 1,73 elde edilirken kompozit yayda bu değer 2,75 olmaktadır. Yorulma testi 20000 çevrim sürdürülmüş ve herhangi bir hasar görülmemiştir. Test süresince yayda görülen maksimum gerilme 240 MPa minimum gerilme 140 MPa olarak bildirilmiştir. Ömür analizi ile de kompozit yaprak yayın çelik yaya göre daha uzun yorulma ömrüne sahip olduğu belirtilmiştir (Kumar ve Vijayarangan, 2007).



Şekil 6. Kompozit ve çelik yaprak yayda oluşan gerilme değişimi (Kumar ve Vijayarangan vd., 2007)

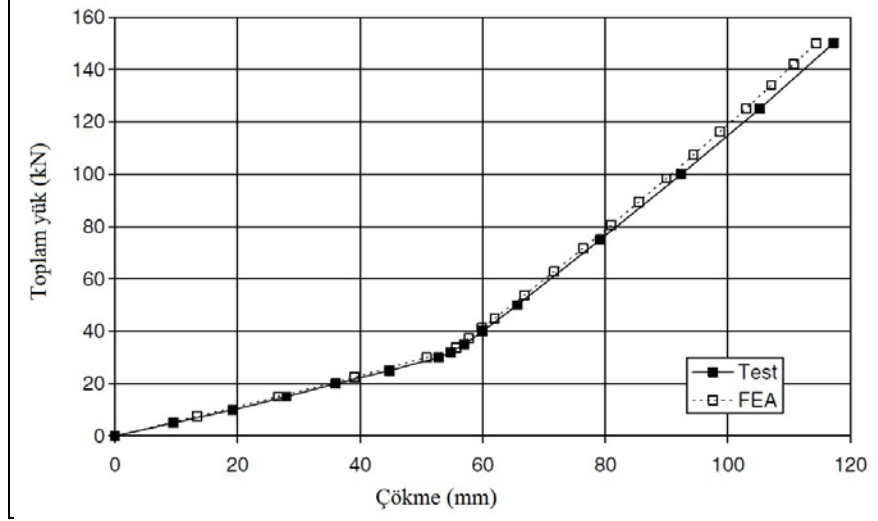


Şekil 7. Kompozit yaprak yayda oluşan gerilme değişiminin deneysel ve sonlu elemanlar sonuçlarının karşılaştırılması (Kumar ve Vijayarangan, 2007)

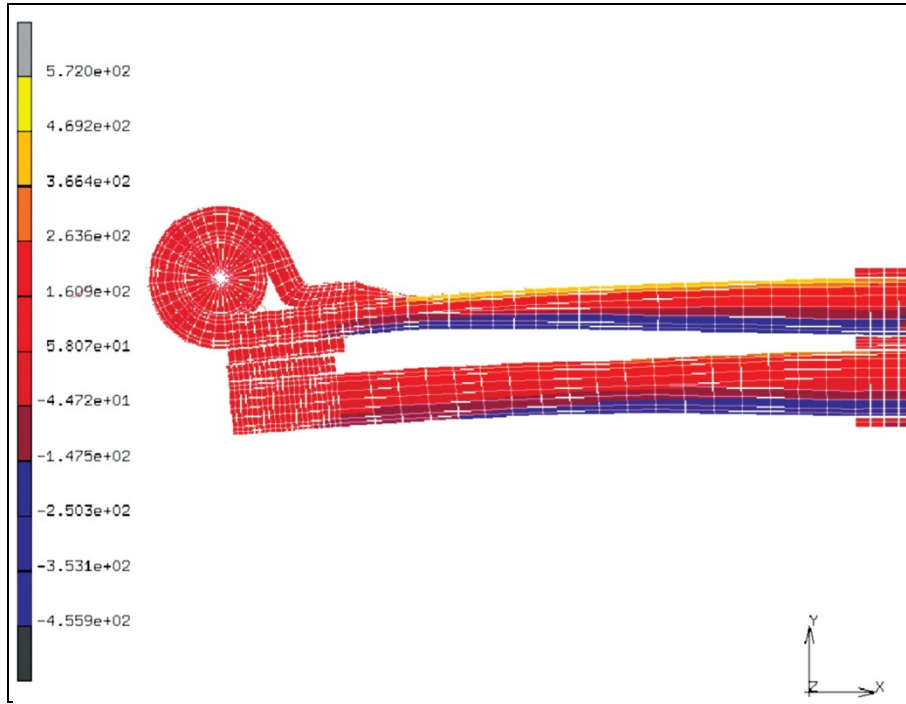
Güneş enerjisi ile çalışacak bir araçta kullanılmak üzere tasarlanan yaprak yaydan beklenen yay katsayısı 70 N/mm ve sistem ağırlığı 1300 g iken gerçekleşen kompozit yay katsayısı 87,6 N/mm ve sistem ağırlığı 1179 g olmuştur (Sancaktar ve Gratton, 1999).

Yük vagonlarında kullanılan 7 yapraklı çelik yayın yerine tasarlanan iki yapraklı E-camı/polyester kompozit yaprak yayın statik deney ile yay karakteristiğinde 35 kN yükte bir dirsek noktası oluşmuştur, Şekil 8. Bu dirsek noktasından önce yay katsayısı 586 N/mm iken sonrasında 1916 N/mm olarak belirlenmiştir. Bu dirsek noktası iki yapraklı yapının peş peşe devreye girmesinden kaynaklıdır. Karakteristikte oluşan dirseğin eğimi ise iki yaprak arasında yer alan sönümleyici kalınlığının değişimi ile değiştirilebilir. Yapılan sonlu elemanlar analizinde kompozit yay anisotropik elastik malzeme olarak modellenmiştir. Şekil 10'da 134 kN düşey yük etkisinde iken kompozit yaprak yayda fiber doğrultusunda oluşan gerilme dağılımı görülmektedir. Üstteki yayda test sonucu oluşan maksimum gerilme 572 MPa

değerinde ve göz uçlarında görülmüş iken alt yayda 331 MPa değerinde ve yay ortasındaki bağlantı kesitinde görülmüştür. Sonlu elemanlar analizinde ise maksimum çekme gerilmesi 600MPa, maksimum kesme gerilmesi ise 30 MPa'dan az olarak görülmüş ve böylece statik durumda emniyet katsayısı 1,5 den fazla olmuştur (Hou vd., 2005).

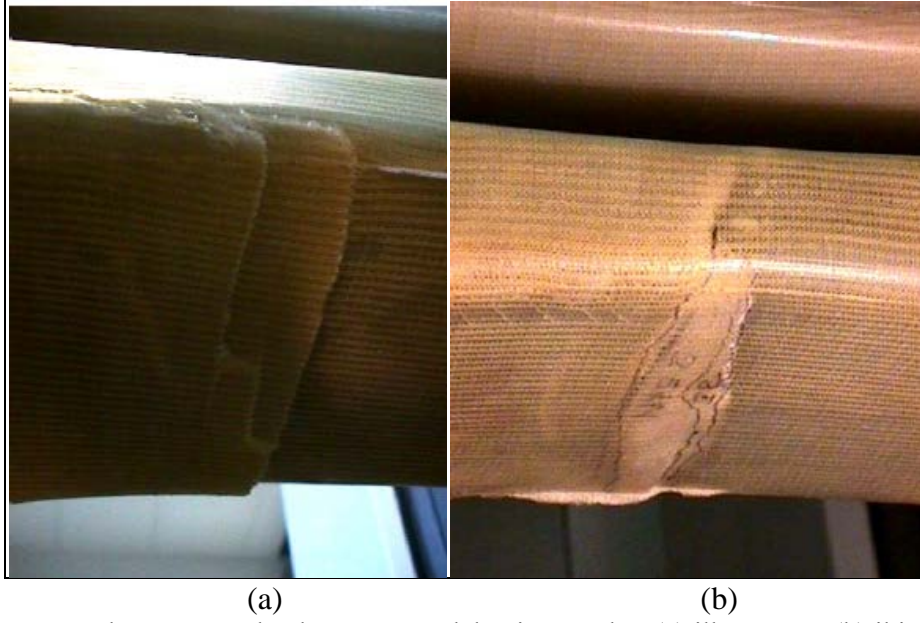


Şekil 8. Statik test sonucu ilk göz tasarımı için elde edilen yük/çökme grafiği (Hou vd., 2005)



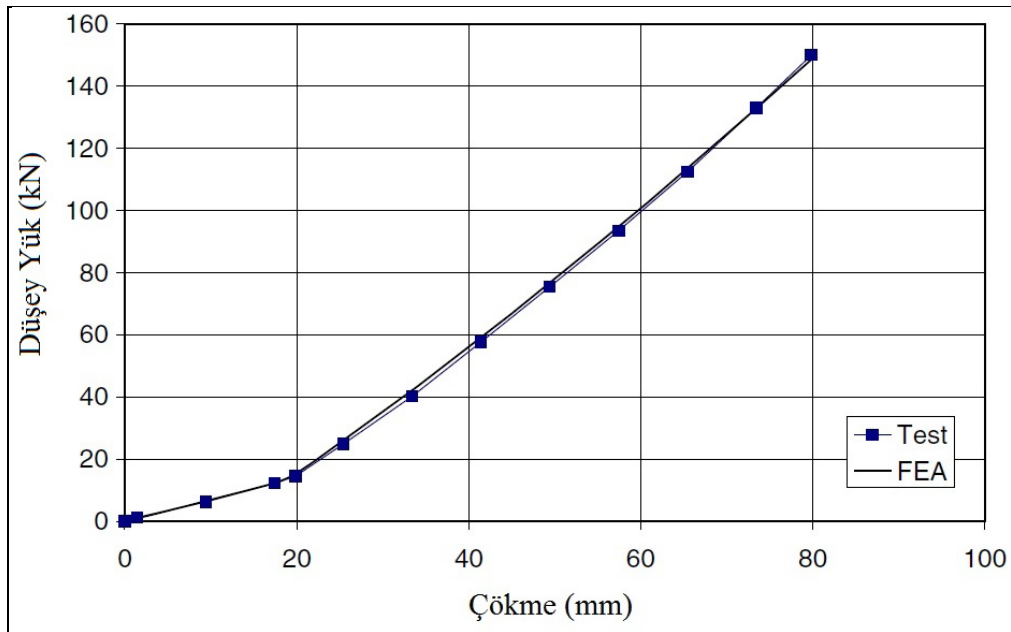
Şekil 9. 134kN düşey yük etkisinde fiber doğrultusunda gerilme dağılımı (Hou vd., 2005)

Bu çalışmanın devamı niteliğinde olan 3 yay gözünün tasarlandığı çalışmada, birleşik olarak tasarlanan yay gözlerinden ilk iki tasarım maksimum yük olan 150 kN statik yüke dayanabilmiş ancak yay gözleri ile yay gövdesi arasındaki kritik kesitte delaminasyonlar görülmüştür (Şekil 10).



Şekil 10. Göz tasarımlarının ucunda oluşan yüzey delaminasyonları (a) ilk tasarım, (b) ikinci tasarım (Hou vd., 2007)

İkinci göz tasarımındaki amaç kesme gerilmesinin fazla olduğu kesiti sararak desteklemektir. Bu şekilde yay kalınlığı aynı olmakla beraber yük/çökme grafiğinde oluşan dirsek de 20 kN seviyelerinde oluşmuştur. Statik test sonucunda kritik kesiti sarmanın, oluşan delaminasyonları engellemediği görülmüştür. Delaminasyonlar sarma tabakası ile yay yüzeyi arasında oluşmuştur. Üçüncü göz tasarımı da 150 kN statik yüke dayanmış ve göz ucu açık bırakıldığından kritik kesitteki tabakalararası yerel kesme gerilmelerinin oluşumu engellenmiştir. Bu nedenle herhangi bir delaminasyon ya da hasar görülmemiştir. Testler sırasında açık tasarlanan gözde aksa göre herhangi bir hareket (açılma) de görülmemiş yüklemeye bırakma boyunca sabit kalmıştır. Açık göz tasarımı ile yapılan testten ve analizden elde edilen yük yük/çökme grafiği Şekil 11 ile verilmiştir (Hou vd., 2007).



Şekil 11. Statik test sonucu açık göz tasarımı için elde edilen yük/çökme grafiği (Hou vd., 2007)

4. SONUÇ

Fiber takviyeli polimer kompozit yaprak yaylar ile yapılan çalışmalar, bu yayların hem mukavemet hem yorulma ömrü bakımından kullanımda olan çelik yayların yerini alabileceğini göstermiştir. Bunun yanında % 85'lere varan oranda hafiflik, % 126 oranlarında daha yüksek doğal frekans, daha yüksek darbe dayanımı, yaylanmaz ağırlığın azalması ile sürüş konforunda iyileşme kompozit yaprak yayın çelik yaprak yayaya göre en önemli üstünlükleridir. Çalışmalarda testlerin yanısıra uygulanan sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçlar testlerden elde edilen sonuçlarla uyumaktadır.

Takviye malzemesi olarak karbon fiber kullanılması mukavemeti arttırıcı etkide bulunmasına rağmen, cam fibere göre yüksek olan maliyetinin yanısıra, artan rijitlik yayın kendisinden beklenen esnekliği de kaybetmesine yol açabilir.

Bilindiği gibi matris malzeme olarak termoplastik reçineler, termoset reçinelere nazaran üstün mekanik özelliklere sahiptir. Ancak termoplastik reçine ile üretimin yüksek sıcaklık ve basınç ortamı gerektirmesi termosetlere göre büyük ölçüde üretim zorluğu ortaya çıkarmakta, üretim yapıldığı takdirde ise üretim maliyeti artmaktadır.

Yapılan çalışmalar göz önüne alınarak ileri çalışmalarda kompozit yaprak yay konusunda ele alınabilecek noktalar şöyle sıralanabilir:

- Kompozit malzemenin nem etkisi ile bozunduğu bilinmektedir. Yaprak yay gibi uzun ömürlü makina elemanları çalışma şartlarında neme maruz kalmaktadır (örneğin İzmir gibi kıyı şehirlerinde). Bu nedenle imal edilen bir kompozit yaprak yayın nem etkisinden sonra mekanik özelliklerinin nasıl değiştiğinin bilinmesi oldukça önemlidir. Bu nokta şuan literatürde bir eksiktir.
- E-camı fiber ile karbon fiber beraber takviye elemanı olarak kullanıldığı hibrit bir yapının tasarlanması ile yaprak yaydan beklenen esneklik yitirilmeden gerekli rijitlik elde edilebilir. Bu tasarım ile kötü yol koşullarından gelecek etkilere de (örneğin çakıllı yoldan sıçrayan bir çakıl gibi) dayanım arttırılabilir.
- Hibrit tasarlanan yapının yanısıra olumsuz çalışma koşullarına dayanımı arttırmak amacıyla fiberlere yüzey işleme uygulanması ve bu işlemin mekanik özelliklere etkisinin görülmesi yine literatürde eksik bir nokta olmakla beraber bilinmesi gereklidir.
- Kompozit yaprak yayda yay gövdesinden gözlere geçiş bölgesi kritik kesit olmuştur. Fiberlerin göz formunu oluştururken yön değiştirmesi, eğilmesi bu durumun oluşmasında önemli etkindir. Gözlerin bu dezavantajlı durumunu ortadan kaldırmak için fiberlerin olumsuz etkilenmeyeceği bir geometriye sahip yeni bir göz tasarımı yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Al-Qureshi H. A. (2001): "Automobile Leaf Springs from Composite Materials", J. Materials Processing Technology, Cilt 118, s.58-61.
- Hou J. P., Cherruault J. Y., Jeronimidis G., Mayer R. (2005): "Design, Testing, and Simulation of Fibre Composite Leaf Springs for Heavy Axle Loads", J. Strain Analysis, Cilt 40, 6, s.497-504.
- Hou J. P., Cherruault J. Y., Nairne I., Jeronimidis G., Mayer R. M. (2007): "Evolution of the Eye-End Design of a Composite Leaf Spring for Heavy Axle Loads", Composite Structures, Cilt 78, s.351-358.

- Landgraf R. W., Francis R. C. (1979): "Material and Processing Effects on Fatigue Performance of Leaf Springs", Society of Automotive Engineers (SAE), Technical Paper Series, 790407.
- Kumar Senthil M., Vijayarangan S. (2007): "Analytical and Experimental Studies on Fatigue Life Prediction of Steel and Composite Multi-leaf Spring for Light Passenger Vehicles Using Life Data Analysis", Materials Science (Medziagotryra), Cilt 13, No. 2, s.141-145.
- Rajendran I., Vijayarangan S. (2001): "Optimal Design of a Composite Leaf Spring Using Genetic Algorithms", Computers and Structures, Cilt 79, s.1121-1129.
- Ramakrishna S. (1997): "Microstructural Design of Composite Materials for Crashworthy Structural Applications", Materials and Design, Cilt 18, No. 3, s.167-173.
- SAE HS788 (1982): "Manual on Design and Application of Leaf Springs", Society of Automotive Engineers.
- SAE J1528 (1990): "Fatigue Testing Procedure for Suspension-Leaf Springs", Society of Automotive Engineers.
- Sancaktar E., Gratton M. (1999): "Design, Analysis, and Optimization of Composite Leaf Springs for Light Vehicle Applications", Composite Structures, Cilt 44, s.195-204.
- Shankar Shiva G. S., Vijayarangan S. (2006): "Mono Composite Leaf Spring for Light Weight Vehicle-Design, End Joint Analysis and Testing", Materials Science (Medziagotryra), Cilt 12, No. 3, s.220-225.
- Shokrieh M. M., Rezaei D. (2003): "Analysis and Optimization of a Composite Leaf Spring", Composite Structures, Cilt 60, s.317-325.
- Subramanian C., Senthilvelan S. (2009): "Development and Preliminary Performance Evaluation of Discontinuous Fibre Reinforced Thermoplastic Leaf Spring", J. Materials: Design and Applications", Cilt .223, s.131-142.
- Subramanian C., Senthilvelan S. (2010): "Effect of Reinforced Fiber Length on the Joint Performance of Thermoplastic Leaf Spring", Materials and Design, Cilt 31, s.3733-3741.
- Talib A. R. A., Ali A., Goudah G., Lah N. A. C., Golestaneh A. F. (2010): " Developing a Composite Based Elliptic Spring for Automotive Applications", Materials and Design, Cilt 31, s.475-484.