

ELYAF SARMA İŞLEMİNDE KULLANILAN SÜREKLİ KARBON ELYAF İLE ALÜMİNYUM MAKARA ARASINDAKİ DİNAMİK SÜRTÜNME KATSAYISININ TEORİK VE DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ

THE THEORY BASED AND EXPERIMENTAL DETERMINATION OF DYNAMIC COEFFICIENT OF FRICTION BETWEEN ALUMINIUM PULLEY AND CONTINUOUS CARBON FIBER THAT USES IN FILAMENT WINDING PROCESS

Garip GENÇ^{1,a}, Nihat AKKUŞ^{2,b}, Ersin TOPTAŞ^{2,c}

¹Marmara Üniversitesi, Tek. Bil. Mes. Yüksekokulu, Makine Bölümü, Göztepe Kampüsü, 34722, İSTANBUL

²Marmara Üniversitesi, Tek. Eğt. Fak., Mekatronik Bölümü, Göztepe Kampüsü, 34722, İSTANBUL

^a[ggenc@marmara.edu.tr](mailto:genc@marmara.edu.tr), ^bnakkus@marmara.edu.tr, ^cetoptas@marmara.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, elyaf sarma işleminde kullanılan sürekli karbon elyaf ile elyaf sarma makinelerinin ön gerilme tertibatlarında bulunan makaralar arasında ortaya çıkan dinamik sürtünme kuvvetine bağlı olarak dinamik sürtünme katsayısı teorik ve deneysel olarak araştırılmıştır. Kompozit malzemeler, dayanımlarının yoğunluklarına bölünmesi sonucu bulunan performans katsayıları incelendiğinde standart çeliklere göre çok yüksek performansa erişebilmeleri nedeniyle endüstride önemli kullanım alanlarına sahiptirler. Kompozit malzemelerin en önemli üretim yöntemlerinden bir tanesi elyaf sarma işlemidir. Elyaf sarma işleminde üretime etki eden birden çok parametre vardır. Önemli parametrelerden birisi de sarım esnasında elyaf üzerinde bulunması gereken ön gerilme kuvvetidir. Bu ön gerilme kuvveti, ön gerilme ünitesi tarafından sarım esnasında sarım yolunu takip ederken elyafı çekmek suretiyle oluşturulur. Böylece sarım esnasında oluşması muhtemel boşluklar önlenmiş olmaktadır. Kırılgan bir yapıya sahip olan karbon elyaf, ön gerilme işleminden etkilenmektedir. Bunun önemli sebeplerinden biri, ön gerilme ünitesinde kullanılan alüminyum makaralar ile elyaf arasında oluşan dinamik sürtünmedir. Bu dinamik sürtünmenin ölçülebilmesi, elyafın mekanik değerlerinin nasıl etkilendiğinin öngörülebilmesi açısından büyük bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, sarım esnasında ortaya çıkan sürtünme kuvvetinin ölçülebilmesi için bir ön gerilme düzeneği tasarlanmış ve üretilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Karbon Elyafının Sürtünme Katsayısı, Ön Gerilme, Elyaf Sarma Teknolojisi (FW), Sürekli Karbon Elyaf

ABSTRACT

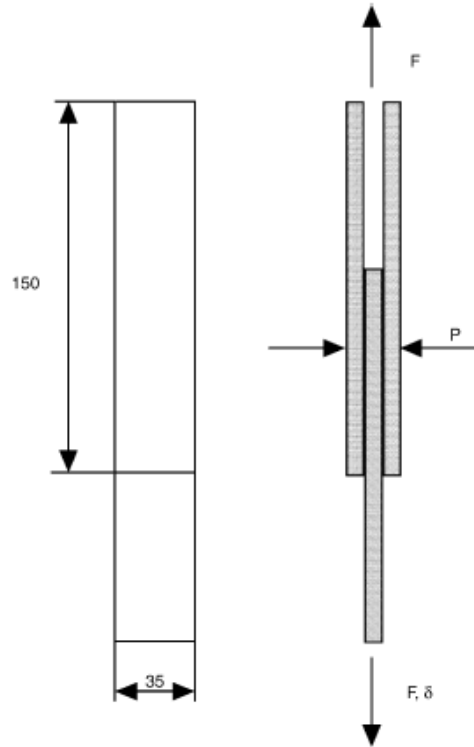
In this paper studied coefficient of friction between continuous carbon fiber, which uses in the filament winding, and aluminium pulley that uses in the pre tension unit of filament winding machine. Owing to have high performance of composite materials, which finding by division of tension to density, are widely uses in the industrial application than standard steel. Filament winding process is one of the most important production methods for composite materials. During filament winding process many parameter affect to product mechanical properties. One of the important parameter is pre tension load which must be under the carbon fiber during winding process. This pre tension load constitute by pulling the carbon fiber during filament winding process at the pre tension unit. Thus during filament winding process handicapped gap between fiber. But fragile carbon fiber affect from the pre tension load. One of the most causation of this affect is the dynamic friction between carbon fiber and aluminium pulley. To measure this dynamic friction is very important for estimate how affect carbon fiber mechanical properties. In this study, pre tension system designed and produced to measure friction load that occurs during winding process.

Key Words: coefficient of friction of carbon fiber, pre tension, filament winding, continuous carbon fiber

1. GİRİŞ

Elyaf sarma teknolojisi ile üretimi yapılan endüstriyel ürünlerin başında özellikle yüksek basınçlı tüpler ve boru şeklindeki simetrik elemanlar gelmektedir. Bu tür yüksek basınç tüplerinin (özellikle hidrojen yakıt teknolojisinde) kullanımı ve önemi gün geçtikçe artmaktadır. Bu tüplerde aranan en önemli özellikler yüksek basınca karşı dayanım ve hafifliktir. Bu tüplerin dayanımının artırılması için yapılan en önemli işlemlerden birisi elyaf sarma teknolojisi ile tüp üzerine karbon elyaf sarmak yoluyla takviye etmektir. Sarım esnasında tüp üzerine sarılan karbon elyaflar arasında oluşması muhtemel boşlukların önüne geçebilmek için kullanılan karbon elyafın üzerinde belli bir gerginlik bulunması gerekir. Bu gerginliğin istenilen değerlerde olabilmesi için elyaf sarma makinelerinde ön gerilme ünitesi bulunmaktadır. Ön gerilme ünitesinde bulunan makaralar ile kullanılan karbon elyaf arasında sürtünme meydana gelmektedir. Elyaf sarma teknolojisi ile imalatta karbon elyafın sarım işlemi esnasında dayanım kaybına uğradığı bilinmektedir. Ortaya çıkan bu dayanım kaybının nedenlerinden bir tanesi karbon elyafların maruz kaldığı sürtünmedir.

Bu çalışma ile ilgili literatür incelemesi yapıldığında sürekli karbon elyaf malzeme kullanılarak kuru elyaf ile alüminyum makara arasındaki dinamik sürtünme katsayısı üzerine herhangi bir araştırma bulunmamaktadır. Ancak tabaka halinde bulunan kompozit karbon elyaf ve cam elyafların sürtünme katsayısı ile ilgili birden çok araştırma bulunmaktadır. Bu çalışmalar özellikle farklı matris malzemesi kullanılarak elde edilen kompozit elyaflar üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu çalışmalara örnek olarak, J. Schon [1], şekil 1.'de gösterildiği gibi birbirine civata ile bağlanmış alüminyum iki malzeme arasından karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemenin çekilmesi esnasında ortaya çıkan sürtünme kuvveti üzerine deneysel bir çalışma yapmıştır ve sürtünme katsayısının çeşitli parametrelere bağlı olarak 0,23 – 0,68 aralığında değiştiğini ifade etmiştir.



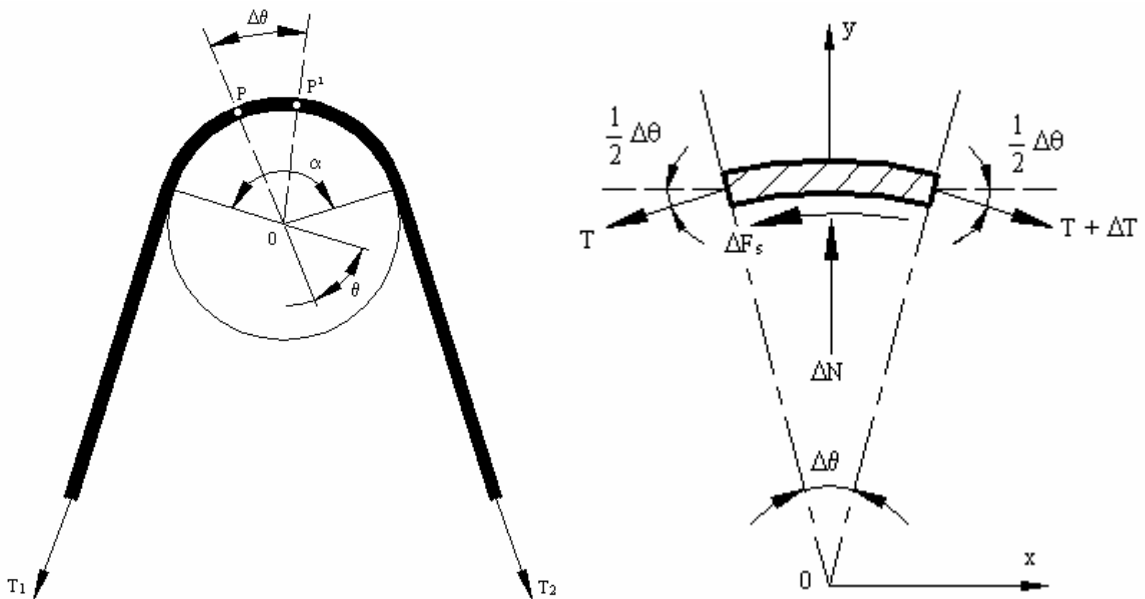
Şekil 1. Dıştaki İki Parçası Alüminyum ve İçteki Parçası Kompozit Olan Sürtünme Denej Düzeneginin Şematik Gösterimi[1]

J. Schon başka bir çalışmasında[2], aynı şekilde birbirine civata ile bağlanmış alüminyum iki malzeme arasından karbon elyaf takviyeli epoksi malzemenin çekilmesi esnasında ortaya çıkan sürtünme kuvveti, karbon elyaf üzerinde sürtünmeden kaynaklanan aşınma ve yorulma değerlerinin belirlenmesi için elektron mikroskop kullanarak deneysel bir çalışma yapmıştır. J. Schon bir diğer çalışmasında da [3], levha halindeki elyaf takviyeli epoksi malzemeler arasında ortaya çıkan sürtünme ve aşınma mekanizmalarının elektron mikroskop kullanarak incelenmesi ile ilgili bir çalışma yapmıştır. T. Sekido ve arkadaşları [4], Kamyon iskeleti için FRP uygulamaları ile ilgili elyaf kompozit malzemeler kullanmışlardır. Chen ve Tsai [5], Tek yönlü sürekli elyafları, kompozit yapıların tasarımında kullanıp analizi ve optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. N. Akkuş ve arkadaşları [6], reçine katkılı elyaf malzemelerin örülmesi üzerine çalışmış ve bu örgü yöntemi ile elde ettikleri kirişin düğümleri üzerinde gerçekleşen şekil değiştirmeler üzerinde çalışmışlardır. Yine Akkuş ve Kawahara [7], ince kompozit boruların boğumlarını elyaf malzemelerle güçlendirip düğüm davranışlarını ve mukavemetlerini incelemiştirler. A. Hurez ve arkadaşları [8], elyaf katkılı polimer kirişlerin, birleşme noktalarını ve eğimli örülmüş kirişlerin gerilme-şekil değiştirme ve katılık formülasyonu üzerine çalışmışlardır. Akkuş ve Genç [9], Ankastre kompozit (FRP) kirişte, farklı bir sarım tekniği uygulayarak kiriş boyunca ortaya çıkan gerilmelerin ve birim şekil değişikliğinin kontrolü üzerinde çalışmışlardır.

Bu çalışmada ise karbon elyaflar ile ön gerilme ünitesinde kullanılan alüminyum makaralar arasında ortaya çıkan dinamik sürtünme katsayısı deneysel ve teorik olarak belirlenmiştir. Böylece elyaf sarma işlemi esnasında karbon elyafların dayanım özelliklerini etkileyen sürtünme değeri hesaplanabilecek ve önemli bir imalat parametresi belirlenebilecektir.

2. KARBON ELYAF İLE MAKARA ARASINDAKİ SÜRTÜNMENİN MODELLENMESİ

Şekil 1.'de kendi ekseninde serbest dönebilen makara ve sarım esnasında üzerinden geçen karbon elyaf bulunmaktadır. Sarım işlemi T_2 yönünde çekilerek gerçekleştirilmektedir. Sarım esnasında servo motor tarafından çekilen elyaf üzerinde T_2 gerilme kuvveti ve ön gerilme sistemi tarafından oluşturulan T_1 ön gerilme kuvveti oluşmaktadır.



a. Serbest Çizim Diyagramı

Şekil 2. Ön Gerilme Sisteminde Bulunan Makara ile Karbon Elyaf Arasındaki Sürtünmenin Modellenmesi

Karbon elyaf sürtünmesinin bulunabilmesi için T_1 ve T_2 arasındaki bağıntının kurulması gerekir. Burada α açısı, karbon elyaf ile makaranın temas ettiği yüzeyin merkez açısı olup her zaman radyan cinsinden ölçülür. Eğer elyaf makaraya n defa tam devir yapacak olursa, $\alpha=2\pi n$ radyan olur. Çekme kuvveti T_2 ; ön gerilme kuvveti T_1 kuvvetinin yanı sıra elyafın makara üstündeki sürtünmesini de karşılaması gerekir ki bu nedenle $T_2 > T_1$ olmalıdır. Bu amaçla şekil 1.'de alınan P ve P' noktaları arasındaki $\Delta\theta$ merkez açılı yay elemanının şekil 1.a.'da gösterilen serbest çizim diyagramı çizilir. Burada makara tespit milinden elyafa etkiyecek ΔN normal kuvveti ile ΔF_s sürtünme kuvveti söz konusudur. Hareketin tam başlayacağı anda bu kuvvetler arasındaki ilişki statik sürtünme katsayısına bağlı olarak;

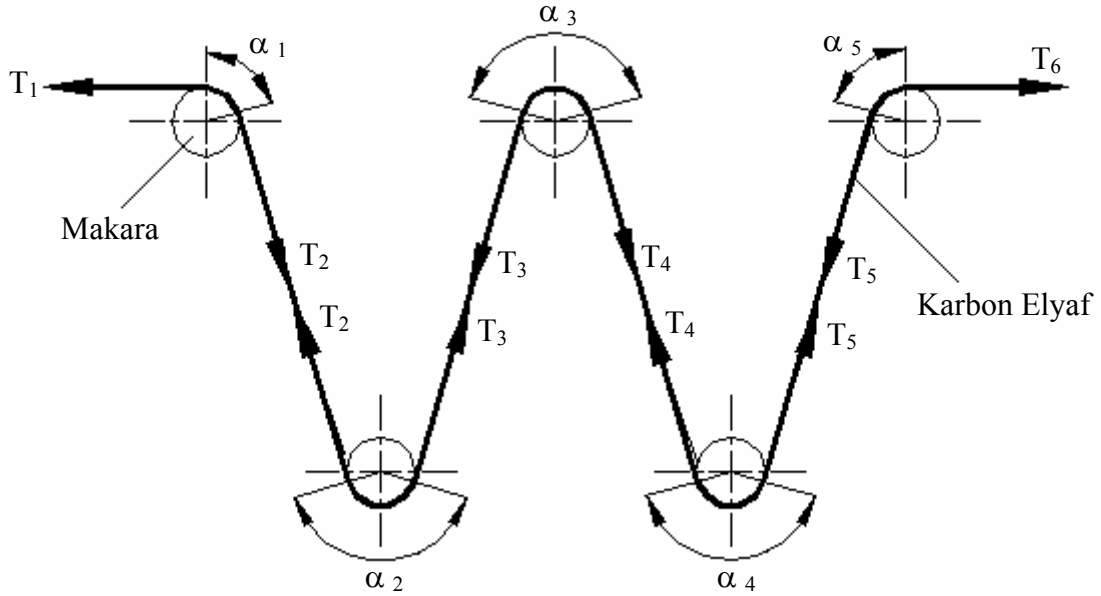
$$\Delta F_s = \mu_s \cdot \Delta N \quad (1)$$

bağıntısı şeklinde yazılabilir. Şekil 2.'de gösterildiği karbon elyafın makaraya sürtüdüğü dairesel yayın merkez açısı θ olarak tanımlanır ve gerekli düzenlemeler yapılır ise;

$$T_2 = T_1 e^{\mu\theta} \quad (2)$$

bulunur. Burada T_1 Ön Gerilme Kuvveti, T_2 Çekme Kuvveti, μ Sürtünme Katsayısı, θ Temas Açısı olarak tanımlanmıştır.

Ancak elyaf sarım düzeneği incelendiğinde ön gerilme ünitesinde şekil 3.'te gösterildiği gibi aynı özelliklerde 5 makara olduğu görülmektedir. Sarım esnasında kullanılan karbon elyafın bu makaralar arasından geçtiği göz önüne alınır ise denklem 2.'de elde edilen denklem her bir makara için düzenlenir.



Şekil 3. Elyaf ile Alüminyum Makara Arasındaki Sürtünmenin Belirlenmesinde Ölçülen Parametreler

Karbon elyaf T_6 yönünde çekilen karbon elyaf belli konumlarda sabitlenmiş makaralar arasından geçmektedir. Karbon elyafın makaralara temas açıları θ_1 , θ_2 , θ_3 , θ_4 ve θ_5 olarak tanımlanmıştır.

Denklem 2.'de sürtünme katsayısının hesaplanabilmesi için gerekli düzenlemeler dinamik sürtünme için yapılır ise;

$$T_2 = T_1 \cdot e^{\mu \cdot \theta_1} \quad (2)$$

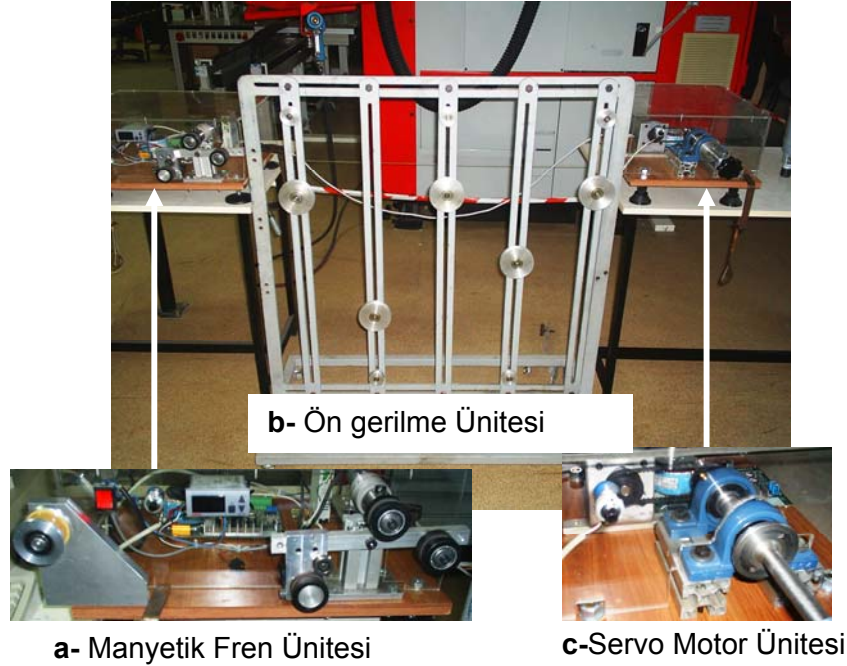
$$T_5 = T_1 \cdot (e^\mu)^{\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5} \quad (3)$$

denklemini elde edilir.

Denklem 3. kullanılarak karbon elyaf ile ön gerilme sisteminde bulunan makaralar arasında gerçekleşen sürtünme katsayısı hesaplanmıştır. Sürtünme kuvvetinin hesaplanabilmesi için sarım düzeneğinde ayarlanan ön gerilme kuvveti (T_1) ile birlikte ön gerilme sisteminin çıkışında ölçülen çekme kuvvetinin (T_6) de ölçülmesi gereklidir.

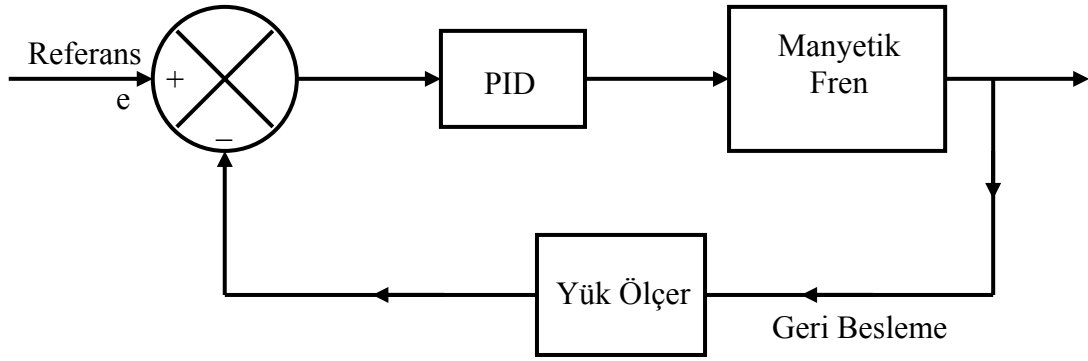
3. DİNAMİK SÜRTÜNME PARAMETRELERİNİN ÖLÇÜMLERİNDE KULLANILAN PID KONTROLLÜ ELYAF SARMA SİSTEMİ

Elyaf sarma teknolojisi ile üretilen ürünlerin imalatında kullanılan elyaf sarma makinesinin bir ünitesi de ön gerilme ünitesidir. Ön gerilme ünitesinin görevi, sarım esnasında sarımı gerçekleştiren elyaf üzerinde sabit bir gerginlik miktarının ayarlanması ve böylece ürün üzerine sarılan elyaflar arasında boşlukların oluşmasını engellemektir. Şekil 3.'te PID kontrollü bir elyaf sarma sistemi gösterilmektedir. Tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen sistem 3 ana bölümden oluşmaktadır.



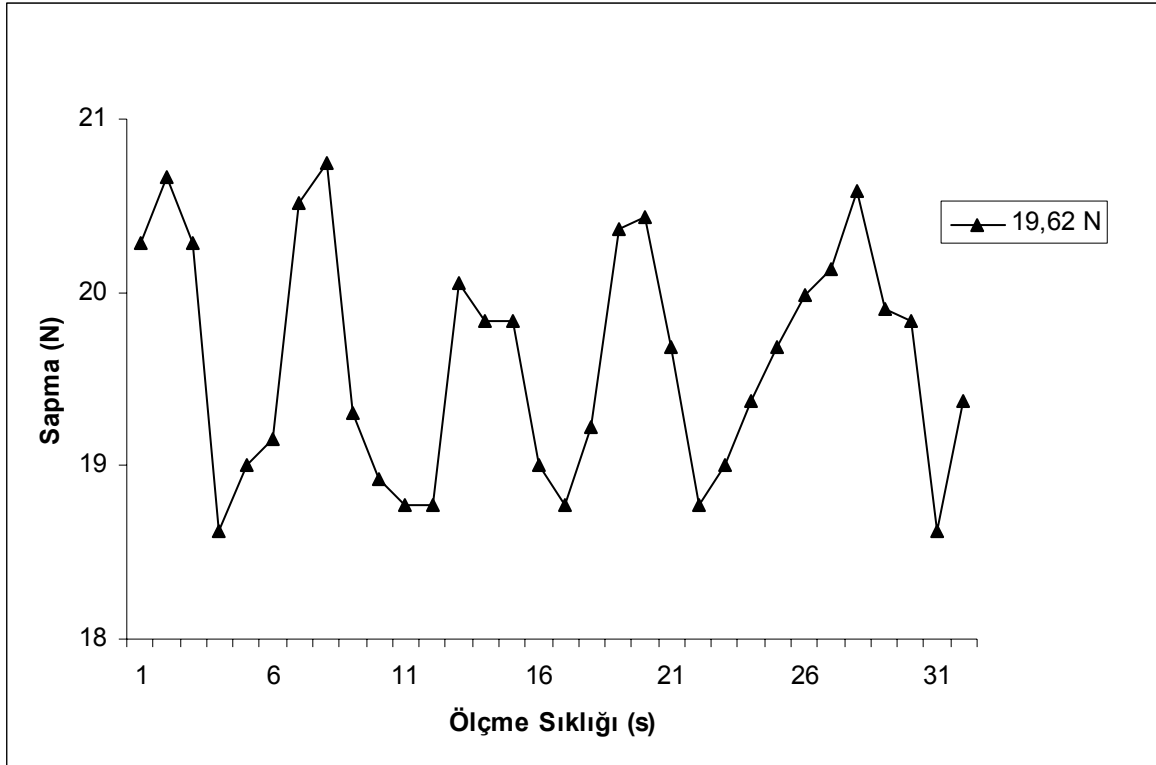
Şekil 4. PID Kontrollü Elyaf Sarma Sistemi

Birinci bölüm elyafın sarım esnasındaki gerginliğini PID kontrollü manyetik fren sistemi ile ayarlayan ve sarım esnasında elyaf üzerindeki gerginlik miktarını sayısal olarak gösteren bölümdür. (Şekil 4.a.) İkinci bölüm ise ön gerilme ünitesidir. (Şekil 4.b.) Bu ünite sarım esnasında makaralar arasından geçen elyaf üzerinde belirli bir gerginlik miktarı ayarlanmaktadır. Üçüncü bölüm ise üzerine sarım yapılacak olan tüpün bağlandığı servo motor ünitesidir. (Şekil 4.c.) Burada tüpün dairesel hareketi makaranın bağlı olduğu servo motora bağlıdır.



Şekil 5. PID Kontrollü Manyetik Fren Sistemi Kapalı Çevrim Blok Diyagramı

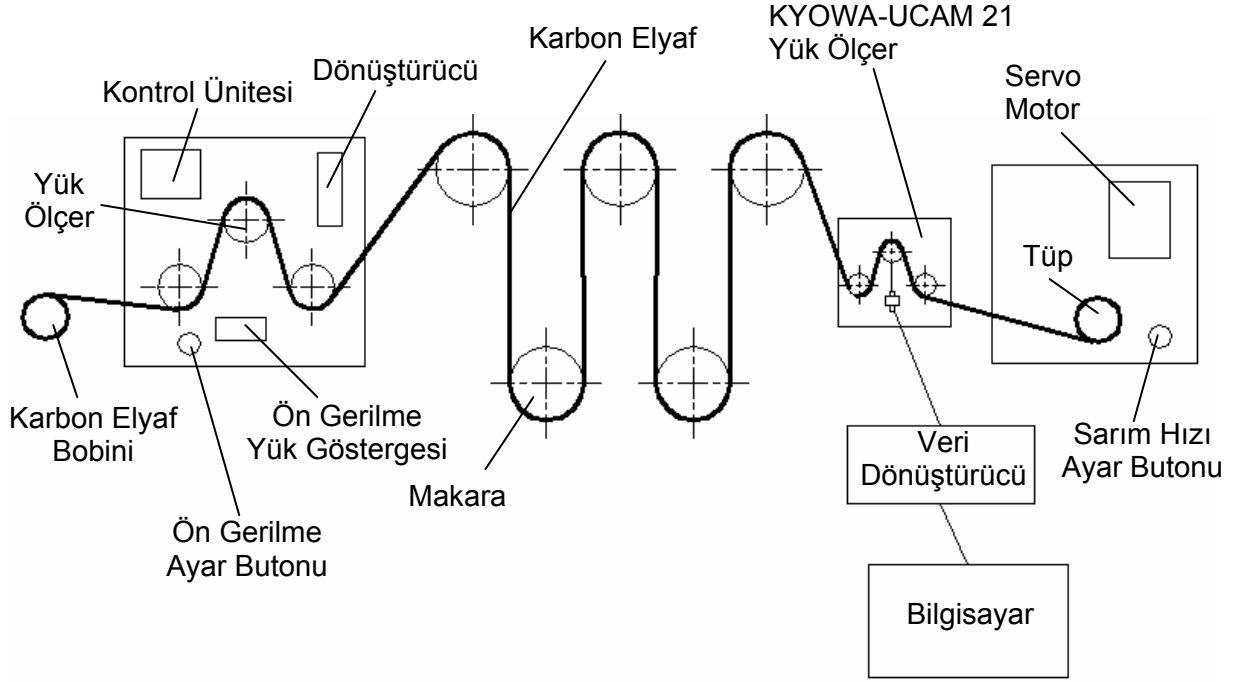
Şekil 5.'te PID kontrollü manyetik fren sistemi kapalı çevrim blok diyagramı gösterilmiştir. Sarım esnasında yük ölçerden yük 0-10 V aralığında volt cinsinden ölçülen ön gerilme değeri referans değeri olarak PID kontrolöre hata sinyali olarak iletilir. İletilen hata sinyalinin değerine bağlı olarak sistemde geri besleme yapılır. Eğer gelen volt değeri ayarlanan volt değerinden küçük ise kontrol ünitesi manyetik frenin sıkmasını ve sarma esnasındaki ön gerilme yükünün artmasını sağlar. Gelen volt değeri ayarlanan volt değerinden büyük ise kontrol ünitesi manyetik frenin rahat dönmesini ve ön gerilme yükünün azalmasını sağlar. Bu döngü sarım boyunca hata sıfırlanana kadar devam eder. Böylece sarım esnasında ön gerilme yükünün ayarlanan değerde sabit kalması sağlanır.



Şekil 6. PID Kontrollü Elyaf Sarma İşlemi Esnasında Elyaf Üzerindeki Ön Gerilmenin Değişimi

19,62 N'luk ön gerilme yükünün zamana bağlı olarak sarım esnasındaki değişimi şekil 5.'te verilmiştir. Burada açıkça görülmektedir ki sarım düzeneği ± 1 N hassasiyetle ön gerilme yükünü sabit tutabilmektedir.

PID kontrollü bu sistemin hassasiyeti dinamik sürtünme katsayısının belirlenmesinde yapılacak olan parametre ölçümlerinin de hassasiyeti olacaktır.



Şekil 7. Elyaf Sarma Sisteminin Şematik Gösterimi

Şekil 6.'da dinamik sürtünme parametrelerinin ölçülebilmesi için tasarlanan elyaf sarma sisteminin şematik gösterimi verilmiştir. Dinamik sürtünme parametrelerinden T_1 ayarlanan ön gerilme parametresidir ve şekil 7.'de gösterilen ön gerilme yük göstergesinden okunan değerdir. T_6 parametresi ise elyafın makaralardan çıkarken üzerinde bulunan gerilmedir. Bu parametrenin ölçümü için şekil 6.'da gösterilen KYOWA-UCAM 21 ölçüm sistemi kullanılmıştır. KYOWA-UCAM 21 yük ölçerden ölçülen değer veri dönüştürücüden bilgisayara aktarılarak kayıt edilmiştir.

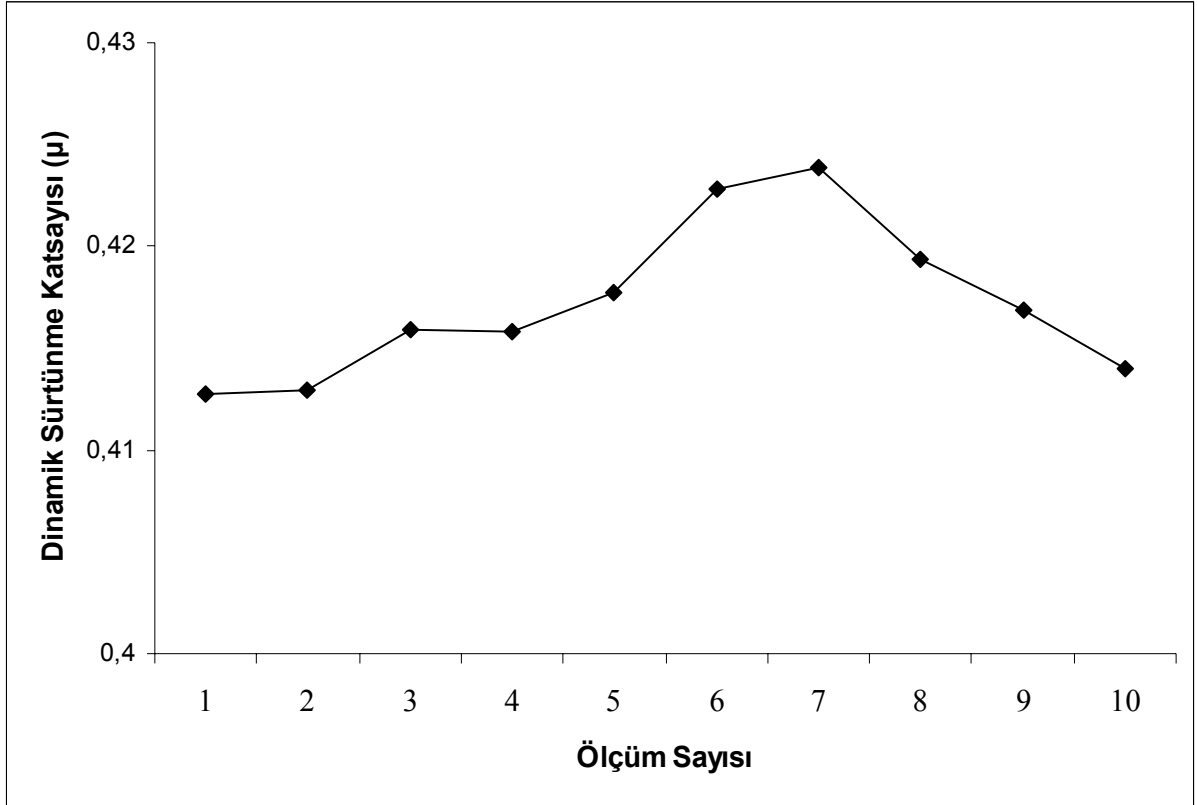
Tablo 1. Ölçülen Parametre Değerlerine Bağlı Sürtünme Katsayısının Sayısal Değerleri

Ölçüm No	Ön Gerilme Kuvveti T_1 (N)	Çekme Kuvveti T_2 (N)	Toplam Sarım Açısı (α_T) (Rad)	Dinamik Sürtünme Katsayısı (μ_d)
1	1,2753	88,746	10,28	0,41270
2	1,2753	88,974	10,28	0,41295
3	1,2753	91,712	10,28	0,41590
4	1,2753	91,598	10,28	0,41578
5	1,2753	93,423	10,28	0,41770
6	1,2753	98,442	10,28	0,42279
7	1,2753	99,583	10,28	0,42391
8	1,2753	95,020	10,28	0,41935
9	1,2753	92,625	10,28	0,41687
10	1,2753	89,887	10,28	0,41395

Tablo 1.'de verilen değerler incelendiğinde aynı ön gerilme kuvveti için 10 adet ölçüm yapıldığı görülmektedir. Her ölçümde çekme kuvvetleri arasında PID sistemin hassasiyetine bağlı olarak dalgalanma gözlemlenmiştir.

4. SONUÇ

Şekil 8.'de PID kontrollü sistem kullanılarak karbon elyaf ile alüminyum makara arasındaki dinamik sürtünme katsayısı için 10 adet ölçüm yapıldığı ve her bir ölçüm için hesaplanan değerin değişimi gözlemlenmektedir.



Şekil 8. Karbon Elyaf ile Alüminyum Makara Arasındaki Dinamik Sürtünmenin PID Kontrollü Sistem ile Ölçümü

Ancak PID kontrollü sistemin hassasiyetine bağlı olarak ölçümler arasında belli bir dalgalanma gözlemlenmektedir. Bu noktadan hareketle karbon elyaf ile alüminyum makara arasındaki dinamik sürtünme katsayısı (ortalama çekme kuvveti dikkate alınarak) $\mu_d=0,41726$ olarak hesaplanmıştır.

Bu çalışma ile karbon elyaf ile alüminyum makara arasında gerçekleşen dinamik sürtünme katsayısı belirlenmiş olmaktadır. Böylece elyaf sarma teknolojisinde kullanılan karbon elyafların mekanik özelliklerine etki eden önemli üretim parametrelerinden bir tanesi belirlenmiş olmaktadır. Ayrıca sarım işlemi esnasında istenilen ön gerilme kuvvetinin ayarlanması ile birlikte ortaya çıkan sürtünme kuvvetinin de hesaplanması mümkün olmaktadır.

4. REFERANSLAR

[1]. Schon, J., "Coefficient of Friction For Aluminum in Contact With a Carbon Fiber Epoxy Composite", Tribology International 37 (2004), pp 395–404

[2]. Schon, J., "Coefficient of Friction and Wear of A Carbon Fiber Epoxy Matrix Composite", Wear 257 (2004), pp 395–407

- [3]. Schon, J., “*Coefficient of Friction of Composite Delamination Surfaces*”, *Wear* 237_2000, pp 77–89
- [4]. Sekido.T., “*FRP Application to Truck Bodies*” , Proceedings of 7th Euro – Japanese Symposium on Composite Materials and Transportation, 1999, pp 302-307
- [5]. Chen.H., and Tsai,S.W., “*Analysis and Optimum Design of Composite Grid Structure*” , *J. of Composite Materials*, Vol. 30, 1996, pp, 503
- [6]. Akkus, N., Verchery,G., Kanemoto, Y., Kawahara,M., and Hurez, A., “*Inter-Laced Fibers / Light – Curing resin Composite Structures*”, In: Proceedings of ACCM-2000 Conference, Kyongju, Korea, August 2000, pp 211-216.
- [7]. Akkus, N., Kawahara,M., “*Bending Behaviors of Thin Composite Pipes with Reinforcing Nodes*”, *Materials Science Research International*, Vol. 6, No. 2, pp. 131-135, June 2000
- [8]. Hurez, A., Akkus, N., Verchery,G., and Kawahara,M.,“*Design and Analysis of Composite Structures with Interlaced Fibres*”, *Composites: Part A* 32 , pp 1455-1463, 2001
- [9]. Akkuş, N., Genç, G., “*Ankastre Kompozit Kirişte Gerilme-Şekil Değişirme Kontrolü*”, *Uluslar arası 1. Mesleki Eğitim Teknolojileri Konferansı, İstanbul, Türkiye, 5-7 Eylül, 2005.*