

# GERİNİM ÖLÇERLİ KUVVET DÖNÜŞTÜRÜCÜSÜ YAY ELEMANLARINDA ARANAN MALZEME ÖZELLİKLERİ

Yrd.Doç.Dr.Müh.Kenan URAL<sup>+</sup>, Y.Müh.Hakan Özgür ÖZBAY\*

<sup>(+)</sup> KO.Ü. Kocaeli Üniversitesi, Müh. Fak., Mak. Müh. Böl.

<sup>(\*)</sup> TÜBİTAK, Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME)

## ÖZET

*Gerinim ölçerli bir kuvvet dönüştürücüsünün veya benzer şekilde bir yük hücresinin en kritik mekanik parçası olan yay elemanı, uygulanan yüke reaksiyon gösteren ve bunu yaparken de yükün yarattığı etkileri, yük ölçümü amacı ile yerleştirilmiş olan gerinim ölçerler vasıtası ile düzgün bir şekil değişimi bölgesi üzerinde gösteren elemanlardır. Yay elemanının yük algı ve deformasyona bağlı konstrüktif özelliklerinin yanı sıra performansını belirleyen bir diğer temel parametre de imal edildiği malzeme ve bu malzemedeki beklenen mekanik, ısıl ve imalat özellikleridir. Bu tebliğde yay elemanlarında aranan temel malzeme özellikleri açıklandıktan sonra, dönüştürücü yay elemanları için malzeme seçim tablosu verilerek, tabloda yer alan yüksek ve düşük elastisite modüllü malzemelerin karşılaştırması yapılmıştır.*

## 1. GİRİŞ

Gerinim ölçerli bir kuvvet dönüştürücüsünün en kritik mekanik parçası olan yay elemanı, çok yüksek nitelikli yayların özelliklerini göstermek zorunda olduğu için, çoğu zaman şekilsel yapısından bağımsız “yay” olarak adlandırılır. Bu özellikler, sehim-kuvvet ilişkisinde, doğrusallık, düşük histerisiz, küçük sürünme ve düşük gevşeme olarak sıralanabilir. Bir dönüştürücü yay elemanını tanımlayan sıra dışı özellikler dışında, onları konvansiyonel yaylardan ayıran temel özellik; sehim miktarıdır. Sıradan bir yay, yük altında oldukça büyük sehimler gösterirken, tipik bir dönüştürücü yay elemanının sehimi, dönüştürücünün ebatları ne olursa olsun, yalnızca 0.1 mm civarındadır. Bu nedenle dönüştürücü elemanları, düşük elastikiyetli, yüksek hassasiyete sahip özel yaylardır [1].

Dönüştürücü yay elemanının bir çok açıdan hassas bir yay gibi davranış göstermesinin yanı sıra; gerinim ölçerlerin yerleştirileceği alanda, birim şekil değişiminin yeterince büyük ve düzgün olduğu yüzeylere sahip fiziksel yapıya sahip olmak zorundadır. Genellikle dönüştürücünün toplam sehiminin en aza indirilmesi gerektiğinden; gerinim ölçerlerin yapıştırıldığı alan hariç; tüm yapı içinde gerilme seviyesinin mümkün olan en düşük seviyeye indirebilmek için yay elemanı tasarımına titiz ve yoğun ilgi gösterilir.

Yay elemanının sehiminin en aza indirilmesinin temel nedeni, dönüştürücünün doğal frekansının en yüksek olması gerekliliğidir. Bir diğer neden ise yükleme anında yükü ileten ve yükü taşıyan tüm konstrüksiyonun da yay ile seri bağlanmış olmasıdır. Bir çok uygulamada, kuvvet dönüştürücüsü ve üzerindeki yük bileşiminin doğal frekansı en büyük yapılmaya çalışılır.



Dönüştürücü yay elemanının imal edileceği malzeme seçiminde büyük titizlik gösterilmesi şarttır. Çünkü, malzemenin sahip olduğu özellikler, imal edilecek olan dönüştürücünün konstrüksiyondan bağımsız performansını ve maliyetini belirleyecektir. Bu çalışma kapsamında malzeme seçim işlemi üç temel aşamalı olarak değerlendirilecektir :

- a) mekanik özellikler,
- b) ısı özellikler,
- c) imalat özellikleri.

## 2. MEKANİK ÖZELLİKLER

Kuvvet dönüştürücüsünün doğruluğunu belirleyen en önemli mekanik özelliklerin başında malzemenin elastik alandaki doğrusallığı gelmektedir. İdeali, dönüştürücünün nominal kapasitesine karşılık gelen yüke kadar olan yüklem alanında, yay malzemesinin mekanik gerilim ile birim şekil değişimi arasında tam doğrusal ilişkiye sahip olmasıdır. Ayrıca, bir çok dönüştürücü tasarımı için, gerilme/birim şekil değişimi ilişkisinde grafiğin eğiminin çekme yönünde olduğu kadar basma yönünde de aynı olması aranan bir özelliktir. Bir dönüştürücü çıkış sinyalinin doğrusallıktan sapması, malzeme davranımı yanında bir çok başka nedenlere de bağlı olabilir. Ancak, en yüksek doğruluğa ulaşabilmek için öncelikle doğrusal mekanik özelliklere sahip bir yay elemanı malzemesi ile tasarıma başlama zorunluluğu vardır.

Yay malzemesi, çalışılan tüm gerilme aralığı boyunca tam elastik davranış göstermelidir. Örneğin, histerisiz düşük olmalıdır. Böylelikle, her hangi bir ölçüm serisinde, hem artan hem de azalan ölçümler yapıldığında aynı gerilim için aynı birim şekil değişimini üretmelidir. Benzer şekilde, belirli bir yük uygulanıp zamanla sabit tutulduğunda, şekil değişimi de zamanla sabit kalmalıdır. Yani bir başka deyişle malzeme sürünme özelliği göstermemelidir. Malzeme, sabit deformasyon altında üzerindeki gerilimi de sabit tutabilmelidir. Bir diğer seçim kriteri ise ele alınan mekanik özelliklerin ardıl yüklemelerde zamanla kendisini tekrarlayabilmesidir [2], [3].

Metallerin, Young modülü, akma mukavemeti ve maksimum çekme mukavemeti gibi mekanik özelliklerini veren konvansiyonel tablolar, dönüştürücü yay elemanı olarak kullanılacak olan malzemelerin performansının tayininde doğrudan kullanılamazlar. Burada görülen değerler azami yüklem altında dönüştürücüde oluşan şekil değişimi seviyesinin çok ötesindeki değerler için geçerlidir. Özellikle aşırı yüklem esnasında göstereceği davranış ele alındığında, yay malzemesinin yapısal özellikleri çok önemli olabilir. Kuvvet dönüştürücülerinin, belirli bir hasar oluşmadan önce tam kapasitesinin üzerindeki yüklere de dayanması beklenmektedir. Bu tür beklentiler akma mukavemeti ve ilgili özelliklerin titizlikle değerlendirilmesini gerektirir. Eğer öngörülen aşırı yüklem altında herhangi bir hasar oluşumu engellenmek isteniyorsa, malzeme, dişli bağlantılar gibi gerilme yoğunluğunun bulunduğu bölgelerde hasar oluşumunu önlemek için yeterince sünek olmalıdır. Bu nedenle, sertliği HRc 50'nin üzerinde olan çelikten mamul yay elemanları çok nadirdir. Daha sert alaşımlar biraz daha iyi yay elemanı malzemesi olabilirler; ancak, bunun kırılma bir yapı oluşturacağı da unutulmamalıdır.

Bir kuvvet dönüştürücüsünün çok büyük sıklıkla kullanılması öngörülmesine rağmen, iyi tasarlanmış bir yay elemanında yorulma mukavemeti ikinci değerlendirme parametresi olarak yer almaktadır. Çünkü, bir gerilim ölçerinin yorulmaya karşı olan hassasiyeti sınırlayıcı bir parametredir. Yay elemanında, gerilim ölçerinin yerleştirildiği bölgede oluşan en büyük şekil değişimine bağlı olarak (ki bu şekil değişimi gerilim ölçerinin kullanım ömrünü belirler.) elemanda yorulma riski olmamalıdır. Bu genel prensibin bir istisnası, çift modlu kuvvet dönüştürücüleridir. Bunlar hem çekme hem de basma yüklemesinde kullanılmak üzere imal edilmişlerdir. Çok sayıda



ardıl ve ters yönlü yüklemeler yapılması öngörülüyor ise yay elemanını yorulmadan kaynaklanan hasara karşı korumak için mekanik tasarım ve malzeme seçimi aşamasında özenli çalışılmalıdır [4], [11], [12].

Şu ana kadar anılmamış olan, yay malzemesinin Young modülüdür. Bu sabit, temel olarak tasarlanan dönüştürücünün yüklenme sıklığının yoğun veya seyrek olmasına bağlı olarak belirli koşullar altında malzeme seçimindeki en önemli parametredir.

### 3. ISIL ÖZELLİKLER

Bir önceki kısımda açıklanmış olan mekanik özellikler, bir dönüştürücü için tipik çalışma koşullarında, yani oda sıcaklığı olarak tanımlanan  $\pm 40^{\circ}\text{C}$ 'de geçerlidir. Bu sınırların dışına çıktığında, mekanik özellikler genellikle malzeme seçimini etkileyecek kadar değişim göstermezler. Bir dönüştürücü çok yüksek veya çok düşük sıcaklıklarda kullanılmak üzere tasarlandığında, malzemenin çalışma sıcaklığındaki mekanik özellikleri değerlendirilir. Çok aşırı sıcaklıklar, seçilebilecek malzeme sayısını sınırlandırmaktadır.

Yay elemanının ısı transfer özellikleri, dönüştürücünün doğruluğunu ve tekrarlanabilirliğini belirleyen en önemli etkenlerdir. Yay elemanında oluşabilecek sıcaklık farklılıkları dönüştürücü çıkış sinyalinde düzensiz ve tekrar gerçekleştirilemeyen rahatsızlıklara sebebiyet verebilir. Sonuç olarak yay elemanı, mekanik özellikleri kadar sahip olduğu ısı transfer özellikleri de göz önünde bulundurularak tasarlanır. Herhangi bir tasarımda, içeriden veya dışarıdan etkiyen ısı girdilerinin etkisi altında eleman içindeki sıcaklık farklılıkları, malzemenin ısı iletkenliği ile ters orantılı olarak değişir. Dolayısı ile, ısı iletkenlik yay malzemesi seçiminde dikkate alınması gereken önemli bir özelliktir.

Malzemenin ısı genleşme katsayısı, her ne kadar yaygın olarak abaklarda yer alıyorsa da yay malzemesi seçiminde birinci dereceden etkin değildir. Dönüştürücü çıkış sinyali üzerinde, ısı genleşmenin birinci dereceden etkileri, normal olarak tam köprü devresinde kendinden sıcaklık kompanzasyonlu gerinim ölçerler kullanılarak büyük ölçüde ortadan kaldırılabilir. Kesit alanlarında, moment kollarında ve benzer geometrik parametrelerdeki sıcaklığa bağlı boyutsal değişimlerin yol açtığı daha üst seviyeli etkiler vardır. Bunlar  $60^{\circ}\text{C}$ 'lik bir değişimde % 0.1 ila 0.2 mertebesinde etkiye sahiptir. Bunların dönüştürücü çıkış sinyali üzerindeki etkilerinin sıcaklık değişiminden kaynaklanan diğer saplardan ayrılması mümkün değildir [5], [11].

Bir çok malzemenin Young modülü sıcaklık ile değişim gösterir. Metaller için her  $60^{\circ}\text{C}$ 'lik değişim için bu sabitteki azalma % 1-3 mertebesinde dir. Bu etki, sıcaklık yükseldikçe dönüştürücünün tam yükteki çıkış sinyalinin de artmasına neden olur. Dönüştürücülerde kullanılmak üzere sıcaklıkla değişim göstermeyen Young modülüne sahip özel alaşımlar düşünüldüyse de; soruna tam bir çözüm olmamıştır. Bunun nedeni ise gerinim ölçerinin k-sabitinin de sıcaklıkla değişmesidir. Bu da dönüştürücünün tam yükteki çıkış sinyalini doğrudan etkilemektedir. Sıcaklıktan kaynaklanan dönüştürücünün tam yükteki çıkış sinyalindeki değişimleri kontrol etmek için çeşitli pratik ve oldukça etkin yöntemler geliştirilmiştir. [6], [11]

### 4. İMALAT ÖZELLİKLERİ

Yay malzemesinin mekanik ve ısı özelliklerine ilaveten değerlendirme aşamasında ele alınması gereken imalatla ilgili çeşitli özellikler mevcuttur. Bunlardan en önemlisi işlenebilirliktir. Günümüz dönüştürücülerinin bir çoğu oldukça karmaşık formlarda yay elemanlarına sahip olacak şekilde tasarlanmaktadır. Yay elemanı tercihan tek parça malzemedan işlendiğinden girintili



çıkıntılı ve çok hassas işleme gerekmektedir. Bir çok durumda alaşımın işlenebilirliği, dönüştürücünün nihai performansını ve maliyetini belirlemektedir.

Sertleştirme işlemi esnasında herhangi bir çarpılma veya bozulmaya uğramama, bir alaşımda aranan temel işlenebilirlik özelliklerindedir. Potansiyel olarak yay malzemesi olmaya uygun bir çok alaşım yalnızca sertleştirilmeden önce işlenebilir. İstenilen mekanik özelliklerin oluşması için yüksek sıcaklıkta bir ısıl işlem gerekiyor ise; orijinal şekil üzerinde ciddi çarpılmalar ve bozulmalar oluşabilir. Bu ihtimal özellikle yüksek ısıl işlem sıcaklıklarından sonra suya veya yağa daldırılan alaşımlar için geçerlidir. Böylesi alaşımlar, eğer eleman konstrüksiyonu hem kalın hemde ince kesitler içeriyorsa nadiren kullanılırlar.

Bazı dönüştürücü tasarımlarında kaynak veya lehim yoluyla birden fazla elemanın yay elemanına bağlanması, veya yay elemanının birden fazla parçadan imal edilmesi gerekebilir. Böylesi bir durumda malzeme özellikleri doğal olarak uygulamaya uygunluğu etkileyecektir. Yay malzemesinin seçimine etkiyen bir diğer etken de malzemenin öngörülen imalat koşullarına uygun miktar, şekil ve ebatta ticari olarak mevcut olup olmadığıdır. Her ne kadar ikincil olarak değerlendirilse de, malzeme maliyetleri yapılacak olan seçimi etkilemektedir [7], [8], [9], [10].

## 5. YÜKSEK VE DÜŞÜK ELASTİSİTE MODÜLLÜ MALZEMELERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Hiç bir yay elemanı tek başına her türlü uygulama için uygun olamayacağından, mekanik, ısıl ve imalat özellikleri bir arada değerlendirilerek malzeme seçimi yapılır. Belirli bir uygulama için en uygun yay malzemesi, dönüştürücünün başarısını belirleyen çeşitli kriterlerle uygulamaya özel öncelikleri karşılıklı olarak değerlendirilerek belirlenir. Buradaki sınırlamalar, yük kapasitesi, aranan doğruluk seviyesi, şekil ve boyut, işletme koşulları, ön görülen imalat miktarı ve maliyettir.

Dönüştürücü yay elemanında özel olarak aranan özellikler, malzeme seçimi işleminde Young modülüne özel bir önem kazandırmaktadır. Bu amaçla, yay elemanı olarak uygun olabilecek çeşitli malzemeleri yüksek veya düşük elastisite modüllü malzemeler olarak sınıflandırmak uygun bir yaklaşımdır. Uygulamaları birbirinden ayıran kesin bir çizgi olmadığından yüksek elastisite modüllü malzemeler (çelik) genel olarak büyük kuvvet dönüştürücüleri için, düşük elastisite modüllü malzemeler (Alüminyum ve ferritik olmayan malzemeler) ise küçük kuvvet dönüştürücülerinde kullanılır.

Dönüştürücü yay elemanının çok küçük esnekliğe sahip olması gerekmektedir. Aynı zamanda da gerinim ölçerlerin yerleştirileceği yerlerde yeterince yüksek (1000  $\mu\text{m}/\text{m}$  - 1500  $\mu\text{m}/\text{m}$ ) birim şekil değişimleri olmalıdır. Yüksek kapasiteli dönüştürücülerde boyutları uygun oranlarda seçilmiş çelik elemanlarla bu koşulları yerine getirmekte bir sorun yoktur. Ancak kapasite azaldıkça gerinim ölçerlerin yerleştirildikleri kısımlarda malzeme kalınlığı azaltılarak; gerekli birim şekil değişimi seviyesine ulaşılır. Gerinim ölçerlerin yerleştirildikleri kısımlarda çok ince kesitlerin varlığı, dönüştürücü performansını olumsuz yönde etkileyen çeşitli sonuçlara yol açmaktadır.

İnce malzeme kesitlerinde gerinim ölçer, yapıştırıldığı bölgede yay elemanının belirgin oranda mukavemetinin artmasına neden olur. Bu durum özellikle eğmeye çalışan yay elemanlarında görülür. Kiriş kalınlığı azaldıkça gerinim ölçerlerin yerleştirildikleri tüm kesitdeki kalınlığın büyük kısmı gerinim ölçere ait olur ve bu durumda gerinim ölçer ızgaraları kiriş yüzeyinden nispeten uzaklaşmışlardır. Gerinim ölçer ızgaraları ile yay elemanı yüzeyi arasındaki malzeme plastik matristir. Sonuçta dönüştürücü elemanı plastik bir yapı ile bölgesel olarak



güçlendirilmiş olup; bu kompozit yapı, uygulanan kuvvet ile gerinim ölçer çıkış sinyali arasındaki zamana bağlı ilişkinin olduğu sürünme göstermektedir.

Gerinim ölçerlerin yerleştirildikleri ince kesitler, eleman içerisinde ısı transferini olumsuz yönde etkilerler. Gerinim ölçer tarafından üretilen ısının büyük bir kısmı gerinim ölçer ızgaralarından yay elemanı yüzeyine ve buradan da elemanın içine doğru yayılır. Gerinim ölçer yerleştirildiği bölgedeki uygunsuz ince kesitlerde bu ısı akışı belirli bir sıcaklık farkı yaratabilir ve bu fark gerinim ölçer bulunduğu noktada daha da büyüktür. Böylesi bir durum sadece gerinim ölçer çıkış sinyalini değil, aynı zamanda da, kesitte ısı gerilmeler yaratarak; bölgesel bir şekil değişimi alanı da yaratabilir. Bu oluşum çözümü oldukça sorunlu olan performans problemlerine yol açar.

İnce kesitle ilgili olarak diğer sorunlar yay elemanının imalatında ortaya çıkabilir. Bir çok karmaşık eleman tasarımları girintili çıkıntılı hassas imal usulleri gerektirmektedir ve kesitte kalıntı gerilmeler veya bölgesel deformasyonlar yaratmadan çok ince kanatların imali kolay değildir. İmalattan kaynaklanan deformasyonların doğru olarak ölçülmesi oldukça güçtür ve bunlar fark edildiğinde parçayı hurdaya atmaktan başka çare yoktur. Kesitlerde oluşan kalıntı gerilmelerin tahribatsız muayene usulleri ile belirlenmesi hemen hemen imkansızdır. Yapıda kalıntı gerilmeler mevcut ise; bu durumdan dönüştürücünün performansı olumsuz yönde etkilenmektedir. Seri imalata geçildiğinde kalıntı gerilmeler her bir dönüştürücüde farklı sonuçlara yol açabilmektedir.

Düşük kapasiteli yay elemanlarında daha kalın kesitler elde etmenin en etkili yollarından birisi, alüminyum alaşımları gibi düşük elastisite modülüne sahip malzeme kullanımıdır. Alüminyum alaşımları genellikle karakteristik yay elemanı olarak düşünülmeseler de; yay elemanı uygun olarak boyutlandırıldığında, bu konumdaki işlevlerini başarı ile yerine getirmektedir. Sonuç olarak alüminyum alaşımlı yay elemanları yaygın olarak düşük kapasiteli kuvvet dönüştürücülerinde kullanılmaktadır [11].

## 6. MALZEME SEÇİMİ

Dönüştürücü yay elemanı malzemesi seçiminde kullanılmak üzere genel amaçlı Tablo 1 hazırlanmıştır. Tablodaki malzemeler üç ayrı gruba ayrılmışlardır : Yüksek elastisite modüllü malzemeler, düşük elastisite modüllü malzemeler ve diğerleri. Malzemelerin ilk olarak mekanik özellikleri, ardından ise doğrusallık, histerisiz, sürünme gibi özellikleri için 1 den 10'a kadar puanlanmış performans değerlendirilmeleri yer almaktadır. Bu puanların yüksekliği o özelliğin de istenen seviyeye yakınlığının göstergesidir [11].

Tabloda yer alan tüm değerler normal koşullar altında kullanılan malzemeler için nominal, oda sıcaklığı değerleridir. Burada verilen tablo hazırlanırken bir çok kaynağa başvurulmuş, zaman zaman aynı malzeme için çelişkili değerlere rastlanmıştır. Dolayısıyla; bu tablo, öncelikle malzeme seçiminde kullanılmalı, ardından o malzemenin mekanik özellikleri imalatçı firmadan güncel değerler olarak alınmalıdır. Hatta imkan varsa tüm bu değerler akredite laboratuvarlar tarafından sertifikalandırılmalıdır. Malzemelerin birbirlerine göre göreceli değerlendirmelerindeki puanlama daha çok imalatçı ve tasarımcıların tecrübelerine dayanmakta olup, genel bir fikir vermesi amaçlanmıştır.



Tablo 1. Dönüştürücü Yay Elemanları İçin Malzeme Seçim Tablosu, [11], [13]

MALZEME	MEKANİK ÖZELLİKLER						PERFORMANS ÖZELLİKLERİ										NOTLAR		
	E [GPa]	$\sigma_y$ [MPa]	$\alpha$ [ppm/C]	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	T <sub>kalınım</sub> [max/C]	$\lambda$ [W/mfC]	$\epsilon$ [%]	HRC	TC	L	H	C	MC	M	HD	CR		WS	LC
<b>Yüksek Elastisite Modüllü Alaşımlar</b>																			
4140	207	1380	11.7	7.84	204	39	12	42/45	3	8	7	7	9	5	3	1	5	6	çok iyi
E4340	207	1449	11.3	7.84	260	37	12	43/46	3	8	8	8	8	5	3	1	5	8	mükemmel
18 (Ni) 250 Marajin	186	1691	10.1	8.01	316	20	7-10	48/49	2	8	7	7	4	5	8	2	8	5	iyi, nadir kul
410 pasl	200	966	10.8	7.76	204	25	15	39	2	7	6	6	7	4	2	6	2	6	nadir kullanılır
630 pasl (17-4 PH)	197	1277	10.8	7.76	204	20	14	41/44	2	7	7	7	6	6	8	7	7	3-4	veygen kullanılır
631 pasl (17-7 PH)	200	1518	10.3	7.65	204	19	6-7	46/48	2	8	7	7	6	6	8	7	7	5	veygen kullanılır
632 pasl (PH 15-7 Mo)	200	1518	9	7.67	260	16	6	47	2	8	8	8	4	6	8	7	7	5	mükem., nadir kul
SI5500 pasl (15-5 PH)	197	1276	10.8	7.76	204	20	14	41/44	2	7	7	7	6	6	8	7	7	5-6	630'ungedisişi
<b>Küçük Elastisite Modüllü Alaşımlar</b>																			
2014-T6 AL	73	414	22.3	2.80	93	155	10	B135	8	6	7	6	5	8	9	3	3	6	iyi
2024-T4/T351 AL	73	317	22.7	2.80	93	121	18	B120	7	6	7	6	5	8	9	3	3	6	iyi, veygen kul
2024-T81 AL	73	448	22.7	2.80	121	150	8	B128	8	7	8	7	5	8	9	3	3	6	en iyi Al alaşımı
6061-T6 AL	69	276	23.2	2.71	66	167	14	B95	8	5	4	4	6	7	8	4	5	5	ferla değil
7075-T6 AL	72	483	23.2	2.80	38	121	10	B150	7	7	6	6	5	8	8	3	2	5	yüksek sıcak. zayıf
Be-Cu 25 (C17200)	117	1173	16.7	8.25	121	108	2-3	40/42	7	8	8	8	2	5	9	3	4	7	mükemmel, pahalı
6 Al4V Titanyum	114	1139	8.8	4.43	149	7	12	40	1	7	7	7	2	3	2	8	4	5	özel uygulamalarda
<b>Diğer Malzemeler</b>																			
AISI 304 pasl çelik	193	1035	17.3	8.03	121	16	4-5	39	2	5	4	4	7	3	(B)	8	5	6	zayıf yay malzeme
Ni-Span-C alaşımı	193	1242	7.74	8.14	121	13	9	37/38	1	8	8	8	3	3	4	3	5	7	çok iyi, pahalı
AZ31B Mg alaşımı	45	221	26.1	1.77	38	94	15	B73	6	3	2	2	6	8	(B)	1	7	5	çok zayıf yay malzeme
Seramik Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (99+%)	380	449	5.94	3.1	260	37	(A)	Mats9	3	7	8	8	1-3	1	(B)	10	-	7	özel uygulamalarda
Lamine epoksi cam	41	587	9/14	1.80	37/94	0.3	-	-	0	5	4	3	5	3	(B)	4	-	3	özel, dışılık doğ uy

E : Elastisite modülü  
 $\sigma_y$  : Akma Mukavemeti  
 $\alpha$  : Isıl genleşme katsayısı  
 $\rho$  : Yoğunluk  
T<sub>kalınım</sub> : Max kul. sıcaklığı  
 $\lambda$  : Isıl ilekenlik katsayısı  
 $\epsilon$  : Uzama yüzdesi  
HRC : Rockwell sertliği  
B : Brinell sertliği  
TC : Isıl ilekenlik  
L : Doğrusallık  
H : Histeresiz  
C : Sürünme  
MC : Malzeme maliyeti  
M : İşlenebilirlik  
HD : Sertleştirme çarpılması  
CR : Korozyon direnci  
WS : Kaynağa uygunluk  
LC : İmalat homojenliği  
(A) : sünek aralıkta değil  
(B) : ısıt işleme sertleşmez



**a. Yüksek elastisite modüllü alaşımlar :** 4140 ve E4340 takım çelikleri yıllardır yüksek kapasiteli kuvvet dönüştürücülerinin yay elemanlarında kullanılmaktadır. Dönüştürücünün boyutlarının büyük olduğu ve sertleştirme ısıl işlemi gerektiğinde herhangi bir çarpılma oluşmayan bu çelikler oldukça iyi birer çözümdürler. Marajin çelikleri de bugün için kullanılmakta olan en popüler yüksek elastisite modüllü yay malzemeleridir. Bunlar sertleştirilmeden önce rahatça işlenebilir, ardından düşük sıcaklıkta ısıl işlemler ile çok küçük çarpılmalarla nihai özelliklerine kavuşurlar. Bu çeliklerin oksidasyona karşı dirençleri de, bir çok dönüştürücü tasarımındaki en önemli üstünlüklerinden birisidir. Ancak bu çeliklerin en önemli sakıncası düşük ısıl iletkenlik katsayısına sahip olmaları ve imalatdan çıkan her bir kütüğün farklı değere sahip olmasıdır.

**b. Düşük elastisite modüllü alaşımlar :** Günümüzde en yaygın kullanılan düşük elastisite modüllü malzemeler alüminyum alaşımlarıdır. Diğerleri içinde en yaygın olarak kullanılanları 2024-T6 ve 2024-T351 kodlu alaşımlardır. Ancak tümü içinde en iyi özelliklere, temel olarak 2024-T4'dün 190°C civarında yaşlandırıldığı 2024-T81 kodlu alaşım sahiptir.

Toplam performans değerlendirildiğinde Be-Cu 25 düşük elastisite modüllü malzemeler içinde en iyisidir. Malzemenin pahalı olması yanında, işlenirken de sıcaklığın Berilyum üzerinde olumsuz etkileri olduğu düşünülerek gerekli önlemler alınmalıdır. Çeşitli Titanyum alaşımlarının da yay malzemesi olarak iyi sonuç vermelerine rağmen, fiyatlarının yüksekliği ve ısıl işlemden sonra belirgin çarpılmaların oluşması en büyük sakıncalarıdır. Ayrıca tüm bu olumlu özellikleri, çok düşük ısıl iletkenlik katsayısına sahip olmaları nedeniyle bir anda önemini yitirmektedir.

**c. Diğer malzemeler :** Mg alaşımları düşük elastisite modüllü uygulamalar için çeşitli imkanlar sunmaktadır. Ancak, şu an için mevcut Mg-alaşımları, çok zayıf yay özellikleri göstermeleri ve mekanik özelliklerinin zamanla değişmesi sebebiyle nadiren kullanılmaktadırlar.

18-8 kodlu paslanmaz çelik mükemmel oksidasyon direncine sahip olmasına rağmen ısıl işlemlerle sertleştirilemediğinden çok sınırlı bir uygulama alanı bulmuştur.

Ni-Span-C alaşımı özellikle hassas yaylar için geliştirilmiştir. Uygun bir ısıl işlemle elastisite modülü geniş bir sıcaklık aralığında değişmez duruma gelebilmektedir. Ancak bu özelliği gerinim ölçer uygulamalarında çok büyük öneme sahip değildir. İlk değerlendirmede mekanik özellikleri açısından iyi bir yay malzemesi imiş gibi gözükse de yüksek maliyet ve işlenmesinin zorluğu nedeniyle pek tercih edilmemektedir.

Fiber esaslı kompozit malzemeler, her ne kadar yapılarındaki plastik zamana bağlı değişimler yaratsa da; günümüz yapısal uygulamalarında her geçen gün daha fazla yer almaktadır. Bu alanda elde edilen gelişmelerle, başlangıçta küçük kuvvet dönüştürücülerinin düşük ve orta sınıfta doğruluğa sahip olanları için kullanılabileceklerdir [10].

Çok yüksek doğruluğun beklendiği metrolojik çalışmalarda kullanılmak üzere seramik kompozit malzemelerden imal edilmiş yay elemanlarına sahip kuvvet dönüştürücüleri tasarımı üzerinde son yıllarda yoğun çalışmalar başlamıştır. Bu yönde bir çalışmanın UME-Kuvvet Ölçümleri Laboratuvarı'nda da yapılması öngörülmektedir.



## KAYNAKLAR

- [1] BAUMANN, E., 1976. Elektrische Kraftmeßtechnik, VEB Verlag Technik Berlin, Germany
- [2] BAUSCHKE, H., 1968. Kraftmeßtechnik, Deutsches Amt für Meßwesen und Warenprüfung, Berlin-Bereich Metrologie, DDR
- [3] BRAY, A., BARBATO, G., LEVI, R., 1990. Theory and Practice of Force Measurement, Academic Press, ISBN 0-12-128453-0
- [4] HBM-Kottinger Baldwin Meßtechnik GmbH.-Germany. Ürün Katalogları, 1995
- [5] HOLISTER, G.S., 1967. Experimental Stress Analysis, Cambridge University Press
- [6] HOLMAN, J.P., 1994. Experimental Methods for Engineers, McGrawHill Book Company, ISBN 0-07-029666-9
- [7] HOFFMAN, K., 1976. An Introduction to Strain Gage Techniques by Practical Experiments. HBM Publication, VD 76004e, Germany
- [8] HOFFMAN, K., 1973. Measuring Elementary Load Cases With Strain Gages. HBM Publication, VD 73002e, Germany
- [9] Measurements Group - Vishay - USA. Ürün katalogları, 1995
- [10] Measurements Group - Vishay - USA. Technotes, 1988 - 1989
- [11] Modern Strain Gage Transducers, 1981 - 1984. Epsilonics, Measurements Group Inc., USA
- [12] ÖZBAY, H.Ö., 1996. Metrolojide Kullanılan temel ve Genel Terimler Sözlüğü, 2. Basım, UME 97-004
- [13] TOK, T., ÖZBAY, H.Ö., 1994. SI-Uluslararası Birimler Sistemi, UME 94-007