



AĞAÇ MALZEMEDE YORULMA PERFORMANSI ÜZERİNE ARAŞTIRMALAR

Nurgül TANKUT*, Mustafa ZOR
Bartın Üniversitesi, Bartın Orman Fakültesi, 74100/BARTIN

ÖZET

Ahşap, binalardan mobilyaya, spor araç gereçlerinden ambalaj malzemesi olmak üzere birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Çevre dostu ürünlere talep arttığından dolayı, günümüzde ahşaba olan ilgi de artmaktadır. Bu talepten dolayı, diğer malzemeler gibi kullanılıp kullanılmayacağı birçok araştırmaya konu olmaktadır. Bugüne kadar, yorulma ömrü iyileştirme teknikleri birçok endüstride başarılı şekilde uygulanmaktadır. Daha çok gemi yapımında araştırılan yorulma iyileştirme teknikleri bu alana ilgiyi arttırırken, ahşap malzeme ve yorulma ilişkisi üzerine çalışmalar oldukça sınırlı sayıdadır. Dolayısıyla bu çalışmanın amacı, ağaç malzemenin yorulma performansı hakkında temel bilgi edinmek ve belirli yüklemeler altında ağaç malzemede oluşan yorulma üzerine yapılan çalışmaları incelemektir.

Anahtar Kelimeler: Ağaç Malzeme, Yorulma ve Yorulma Performansı

RESEARCH ON FATIGUE PERFORMANCE OF WOOD MATERIAL

ABSTRACT

From buildings to furniture, through sport equipment, wood has always been widely used. Wood attracts more and more interest nowadays, as the demand on environment friendly products rises. Because of this demand, whether it will be used other materials or not has been a matter for a great deal of researches. To date, fatigue life improvement techniques have been successfully applied in several industries. Whereas the fatigue improvement techniques in the field of construction of ships promote the interest in this area, the studies that are based on the correlation between wood materials and fatigue are very limited. Therefore, this purpose of this study to obtain basic information about the fatigue performance of wood material and examine the studies which are related to fatigue of wood material under the certain loadings.

Keywords: Wood Material, Fatigue and Fatigue Performance

1. GİRİŞ

Ağaç malzeme, insanların kullandığı çeşitli yapı malzemeleri içerisinde en eski olanıdır. Çağımızın getirdiği teknik yeniliklere ve çok sayıdaki yeni malzeme ile rekabetine rağmen, sahip olduğu üstün özellikleri nedeniyle günümüzde birçok kullanım alanında önemini korumaktadır. Ağaç malzemenin kolay işlenmesi, ısı ve sese karşı iyi bir yalıtıcı olması, doğal yapısından kaynaklanan tekstür, renk özellikleri, yorulma direncinin çelik ve betona karşı yüksek oluşu, yangına karşı dayanımının iyi olması, diğer malzemelere göre estetik olmasından dolayı bu malzemeye karşı olan talep her geçen gün daha da artmaktadır. Bu talebin karşılanabilmesi ancak, ormanların bilinçli bir şekilde kullanılmasıyla mümkündür.

Ahşap esaslı paneller, ambalaj, merdiven basamakları, mobilya, kaplama ve döşeme çatı zemin kaplaması dâhil olmak üzere birçok kullanım alanına sahiptir. Özellikle zemin kaplaması olarak kullanıldığında ahşap malzemeler sünmeye ve yorulma yüklemesine maruz kalmaktadır.

Ahşap esaslı paneller viskoelastiktir ve genel olarak rijitliği ve sünme özelliklerine göre yapıda kullanılmaktadır. Ahşap esaslı malzemelerin sünme performansı üzerine geniş araştırmalar 1974'den beri BRE'de (Building Research Establishment) yürütülmektedir. BRE'de yonga levhanın yavaş çevrimsel yorulması değişik çevresel faktörler altında incelenmiştir (Dinwoodie vd., 1995).

Yer döşemeleri, sünme yüklemelerinin yanı sıra yorulma yüklemesine de maruz kalmaktadır. Araştırmalarda, farklı ahşap esaslı panellerin yorulma performansları incelenmiştir. Örneğin, Bath Üniversitesi'nde yapılan çalışmada yonga levhanın döngüsel yorulma performansı için S-N diyagramı elde edilmiştir ve daha sonra yonga levhanın sürekli yorulma diyagramı kaydedilmiştir (Thompson vd., 1994; Bonfield vd., 1994). Sonraki dönemde, yonga levhanın eğilmedeki performansı üzerine yorulma yüklemelerinin etkisi de araştırılmıştır (Thompson, 1996).

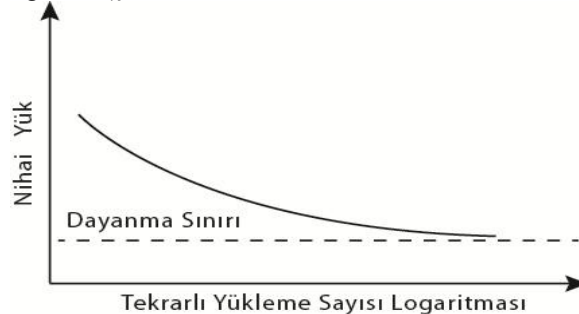
Serviste, odun komponentleri aşırı dış yüklemeler, rutubet hareketi, yüksek ısı, çürüme ve böcek saldırılarından olumsuz etkilenmektedir. Bu faktörlerin bazıları tasarım, fabrikasyon tekniğinde kullanılan yöntemler sayesinde ihmal edilebilir seviyeye indirgenebilir. Ahşapta yıkım süreçleri hakkında bilgiyi 1900'lerin başında uçak mühendisleri ve yakın zamanda yapı mühendisleri kendi amaçları için kullanmışlardır. Ahşabın içindeki doğal zarar genellikle çeşitli boyutlarda çatlamlara sebep olur. Çatlamış bölümlerdeki analiz kırılma mekaniğinde incelenmektedir. Zararın kademeli olarak büyümesi yorulmayı meydana getirmektedir. Hücresel yapılarla güçlü biçimde sıralanmış ahşap ya da diğer materyaller lokal veya daha yüksek seviyede gerilme yoğunluklu bölgelerin gelişimi için açık durumdadır. Bunun sonucunda gerilme yoğunlaşması kırılmayı, çatlakları geliştirmektedir (Smith vd., 2003 ve Tsai ve Ansell, 1990).

2. YORULMA DAYANIMI

Malzeme yavaşça artan yükler altında deneylere tabi tutulduğu zaman, belirli bir sınır gerilmesinde dayanımı sona erip kopmaktadır. Bulunan bu gerilme değerine malzemenin *statik dayanımı* adı verilir. Aynı malzemeyi, zorlayan gerilmeler zaman ile değişecek olursa, malzeme kopma değerinin altındaki bir gerilmede, sünek de olsa plastik şekil değiştirmeden dolayı kırılır. Bu olaya *yorulma* denilir. Başka tanım ile periyodik olarak inip çıkan yüklere veya strese tabi olan malzemelerde, zamanla ilerleyen hasarlara yorulma denmektedir. Yorulma hasarı kümülatiftir. Yükleme ortadan kalksa da malzeme eski haline dönemez.

Yükleme ve boşaltmanın periyodik olarak çok sayıda tekrarı sonucunda cisim içinde oluşan karmaşık termik ve mekanik olaylar nedeniyle, cisimde çözülme, yıpranma ve ayrışmalar meydana gelir. Bu olayın nedeni yükün şiddetinden çok onun, periyodik olarak uzun bir süre değişmesinden ileri gelmektedir. İç mekanizması oldukça karışık olan bu olayda malzeme belli yük altında yorulma direncine maruz kalmaktadır. Malzemelerde yorulma, tekrarlı yüklemelere maruz kalmış yapısal elemanlar için ortak bir problemdir (Bao vd., 1996).

Yorulma deneylerindeki önemli öğelerden birisi *zaman*'dır. Bir malzemenin yorulma özelliklerini belirlemede dayanma sınırındaki (fatigue endurance) bulgular çok önemlidir. Dayanma sınırı teorik olarak kırılmanın olmadığı tekrarlardaki gerilme değeridir (Şekil 1).



Şekil 1 Tekrarlı yüklemelerde dayanma sınırı (Bodig ve Jayne, 1982)

Yorulma analizinin temel amacı, malzemenin ömrü süresince ne kadarlık bir çevrime dayanabileceğini karakterize etmektir. Geleneksel olarak, yorulma belirlenen gerilme seviyesindeki yıkımı, salınım yüklerinin sayısı tarafından tanımlanmaktadır. Ahşapta direnç, yükleme süresinin bir fonksiyonudur (örneğin sürekli deformasyonlar veya yüklemenin sonucunda ortaya çıkan yıkımlar). Aynı zamanda direnç, nihayetinde ahşapta yorulmayı meydana getirebilmektedir. Böylece, ahşabın direnci yükün *süresine* dolayısıyla yıkımda döngü sayısı ve yükün sıklığına bağlı bulunmaktadır. Ahşapta yorulma ile ilgili farklı iki ana yaklaşım bulunmaktadır. Bunlar;

A) Yıkımda çevrim tekrarların yorulma değeri, (*Wöhler diyagramı*)

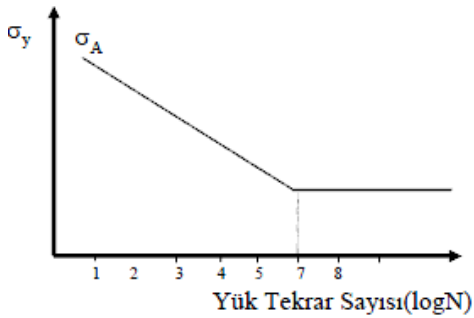
Yorulma deneyi ile bir malzemenin belirli bir tekrar sayısı için güvenle dayanabileceği gerilme sınırı saptanır. Hazırlanan numunelere belirli büyüklükte tekrarlı gerilme uygulanır ve bu gerilme etkisinde kırılmanın olduğu (*N*), tekrar sayısı ölçülür. Değişik gerilme genlikleri ile bunlara karşı gelen *N* kırılma tekrar sayıları bir eğri halinde çizilir. Bu yorulma eğrilerine (*S - N*) veya *Wöhler eğrileri* denir.

Wöhler eğrileri yorulma direncini belirli gerilme seviyesinde kırılmaya sebep olan kritik tekrar sayısı (*N*) olarak tanımlar ve şu şekilde gösterilebilir:

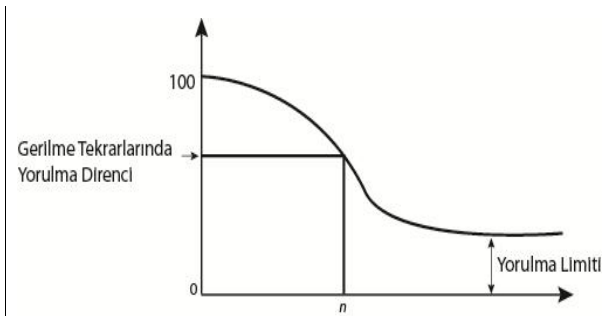
$$\log(N) = A + B \times \log(S)$$

Burada A ve B katsayıları bir tekrardaki minimum ve maksimum gerilme düzeylerinin oranına bağlıdır.

Yükten elde edilen gerilme (*S*) ile çevrim sayısı (*N*) arasında ilişki kurularak aşağıdaki Wöhler yorulma eğrisi ortaya çıkartılmaktadır (Şekil 2 ve Şekil 3).

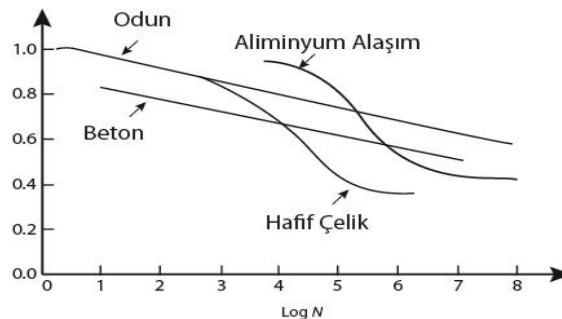


Şekil 2 Wöhler diyagramı



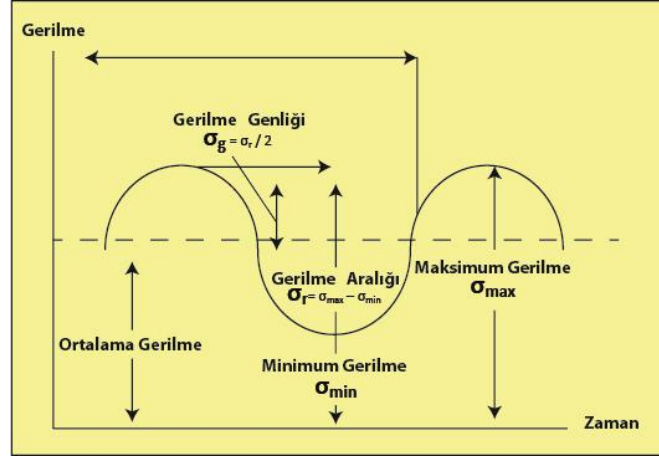
Şekil 3 Yıkımda çevrim sayısına karşı gerilme seviyesi

B) Yükün süresi tarafından elde edilen yorulma değeri, (*Madison diyagramı*) (Clorius vd., 2009).



Şekil 4 Hafif çelik, aliminyum alaşım, beton ve ahşap için gerilme seviyesine karşı yorulma

Yorulma deneylerinde genel amaç, farklı sabit gerilmeler altında malzemenin kaç çevrim sonunda kırılacağı belirlenmesidir. Şekil 5'te örnek olarak verilen yorulma diyagramında $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = 0,1$ olarak alınmıştır.



Şekil 5 Yorulma Diyagramı

Gerilme-zaman grafiğinden elde edilen yorulma diyagramındaki parametreler aşağıda kısaca tanımlanmıştır.

Çevrim: Gerilme-zaman eğrisinin periyodik olarak tekrarlanan en küçük parçasına denir.

Max Gerilme: Uygulanan gerilmeler arasında en büyük olan gerilmeye (σ_{max}) denir.

Min Gerilme: Uygulanan gerilmeler arasında en küçük olan gerilmeye (σ_{min}) denir.

Gerilme Aralığı: Maksimum gerilme ile Minimum gerilme arasındaki farktır. ($\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min}$)

Gerilme Genliği: Gerilme aralığının yarısıdır. ($\sigma_g = \sigma_r / 2$)

3. YORULMA DAYANIMINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER VE YORULMA ANALİZİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER

Genel olarak malzeme üzerinde yorulma dayanımını etkileyen faktörler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Malzemenin çekme dayanımı
- Malzeme boyutu
- Ortalama gerilmenin varlığı ve seviyesi
- Ortam şartları
- Yüzey pürüzlülüğü
- Sıcaklık

Hansen'e (1991) göre ahşap esaslı elemanlarda yorulma özelliklerine etki eden faktörler:

- Tür, yetişme yeri, yoğunluk, vb.
- Test ürününün ebatları,
- Rutubet,
- Etki eden yük (basma, çekme, eğilme, vb.), yük seviyesi, R oranı, frekans (tekrar/dakika).
- Diğer faktörler (sıcaklık, kimyasal muamele, vb.)

Yorulma analizinde kullanılan üç yöntem; şekil değiştirme ömrü, gerilme ömrü ve kırılma mekaniğidir (Dai ve Zhang, 2007).

Şekil değiştirme ömrü (Strain Life): Yorulmanın düşük tekrar (çevrim) sayılarını karakterize eden ve çatlak başlangıcını kapsayan metottur. Düşük sayılı çevrimler bu yüzden Low Cycle Fatigue (LCF) olarak da tanımlanmaktadır. LCF genellikle 10^5 ve daha düşük çevrimleri kapsar. Günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Gerilme ömrü (Stress Life): Malzemenin toplam ömrünü araştırır, çatlak başlangıcını ve ilerleyişini kapsamaz. S-N diyagramına dayanır ve genellikle yüksek çevrimleri içerdiği için High Cycle Fatigue (HCF) olarak da tanımlanır. 10^5 ve üzeri çevrimleri kapsar.

Kırılma mekaniği (Fracture Mechanics): Kırılma öncesi oluşan çatlakların ilerleme hızları ve çatlağın kritik büyüklüğe erişmesi için gereken ömrü tayin eden bir yaklaşımdır.

4. AĞAÇ MALZEMEDE YORULMA ANALİZİ İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Yorulma olayı, ilk defa 1850–1860 yılları arasında Wöhler tarafından incelenmiş ve teknoloji ilerledikçe mühendislik uygulamalarında daha fazla önem kazanmıştır. Otomotiv ve uçak endüstrisindeki parçalar ile kompresör, pompa, türbin gibi makinelerin parçaları ile ahşap yapıların belli bölgelerinde görülen mekanik hasarların yaklaşık % 90'ı yorulma sonucunda olmaktadır (Anonim, 1996).

Bir malzeme uzun süreli çevrimsel strese maruz kaldığında yorulma meydana gelmektedir. Köprüler, binalar, evler gibi yapı malzemeleri servis sırasında döngüsel yüke maruz kalmaktadır. Ahşap ve ahşap kompozitler büyük yapı malzemeleridir ve bu nedenle bunlarda oluşan yorulma, daha güvenli ahşap yapılar tasarlanması aşamasında büyük önem arz etmektedir. Ahşap ve ahşap kompozitlerde yorulma, çevre ve yükleme koşulları dikkate alınarak incelenmektedir. Dalga yükleme ve frekans yükleme gibi yükleme koşullarının etkileri çeşitli çalışmalarda bildirilmiştir. Marsoem vd. (1987), üçgen ve kare dalga formundaki masif odunun çekme yorulmasını incelemiş ve sonucunda kare formunun en fazla zarar gördüğünü ortaya koymuştur. Benzer bir sonuçta masif odunun basınç yorulmasında elde edilmiştir (Gong ve Smith, 2003). Kohara and Okuyama (1993, 1994a, 1994b), masif ağaç malzemenin gerinim enerji kaybı davranışını temel alarak, çekme direncinde yorulma ömrü üzerine dalgalı yüklemeye bağımsız bir yorulma ömrü kriteri önermiştir. Yükleme sıklığı, aynı zamanda ahşap ve ahşap kompozitlerinin yorulma ömrünü de etkilemektedir.

Bütün bu çalışmalarda belirli gerilim seviyeleri için kırılmadaki çevrim sayılarının yükleme frekanslarının artması ile uzamasına rağmen, yorulma ömrünün frekansa bağlılığının farklı gerilim düzeylerinden etkilendiği sonucuna varılmıştır (Okuyama vd. 1984, Thompson RJH vd., 1996, Clorius CO vd. 2000, Ando K vd, 2005, Sugimoto T ve Sasaki Y 2006).

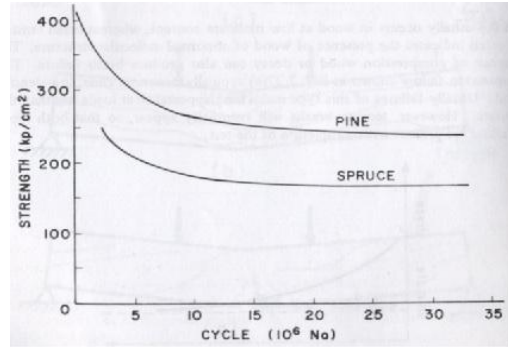
Yorulma, nispeten düşük büyüklükte streslerin sürekli tekrarlanmasıyla malzemenin bozulması olarak tarif edilir. Geleneksel olarak da S-N (stres düzeyine karşı döngü sayısı) diyagramı ile temsil edilir. Ahşap ve ahşap kompozitler için yıkımda gerilme seviyesi ve döngü sayısı arasında lineer bir ilişki olduğu bulunmuştur (Cai, Z. vd., 1996; Lam, F. 1992 ve McNatt, J. D. ve Laufenberg, T. L. 1991.).

Spesifik olarak yorulma, yükün zamanla olan davranışı olarak da ifade edilmiştir. Birçok deneysel programlar uygulanmış ve farklı hasar birikim kanunları, kerestelerde yükleme süresini biçimlendirmek için ortaya çıkarılmıştır (Barrett, J. D. ve Foschi, R. O. 1978; Barrett, J. D., 1974; Foschi, R. O. ve Yao, F. Z. 1986a; Foschi, R. O. ve Yao, F. Z. 1986b; Gerhards, C. C., 1979; Foschi, R. O., Folz B ve Yao, F. Z. 1989).

Örneğin, Nagasawa vd. (1981), lamine edilmiş tutkallı birleştirmelerde eğilme yorulma direnci davranışını incelemişlerdir. Tutkallı birleştirmeler yorulma limitinde statik eğilme direncinin 1/5 i ile 1/3 ü kadar olduğunu bulmuştur. Tutkallı birleştirmelerin eğilmeye yorulma davranışı deformasyon şiddetinin orantılı limitten daha fazla olduğu zaman tutkalların mekaniksel özelliklerine de yansımaktadır (Ota, M., 1967).

Wöhler eğrileri ahşap malzemeler için Eckelman (1987), Bonfield (1991), Bonfield ve Ansell (1991), Clouris (2002), Thompson vd. (2002), Dai ve Zhang (2007) gibi birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır.

Şekil 6'da Çam ve Ladin odunları için Wöhler eğrileri gösterilmiştir.



Şekil 6 Çam ve Ladin odunu için Wöhler eğrisi (Gerilme-Tekrar sayısı grafiği)

Döşemeli çerçeve mobilyaların mukavemet tasarımı yapılırken, eleman malzemelerinin yorulma direnç özelliklerinin dikkate alınması gerekir, zira çerçevelerdeki çoğu yıkımların sebebi yorulma ile alakalıdır (Eckelman, C.A. ve Zhang, J., 1995).

Makaslama yüküne maruz yapısal kontrplağın yorulma direnci üzerine dalga formlu yüklemenin etkisi araştırılmıştır. Çevrimsel kesme yüklemesi, %50-90 gerilim seviyelerindeki üç köşeli ya da kare dalga formundaki kontrplak örneklerine uygulanmıştır. Tüm gerilme seviyesinde, kare dalga formundaki yorulma ömrü, üç köşeliye göre daha düşük değer göstermiştir (Sugimoto, T. ve Sasaki, Y., 2006).

Binalar ağırlık olarak statik yüklere maruz kalmasına rağmen, köprülerdeki hareketli trafik yüklemeleri yorulma etkisine neden olabilmektedir. Yük çevrim sayısı ve yük büyüklüğü köprü alanındaki trafik modeline bağlı olmaktadır. Bununla birlikte günümüz itibarıyla ahşap birleştirmelerin yorulma direnci ve tasarım kodları hakkında sınırlı sayıda bilgi bulunmaktadır. Kreuzinger, H ve Mohr, B. (1994) tarafından bu konuda araştırma yayınlanmıştır. Yapılan bir çalışmada, 4 kavelalı 3 farklı bağlantı elemanı ile liflere paralel olarak test edilmiş ve öngörülen yük çevrim sayısından sonra statik direnç belirlenmiştir. Civata bağlantılarının yorulmasına değinilmiş (Kreuzinger, H ve Mohr, B., 1994) ve (Abendroth R.E. ve Wipf, T.J., 1989) çeşitli yüklemeye koşulları altında ahşap materyalinin yorulma davranışı test edilmiştir (Clorius, C.O, vd., 1996).

Metal bağlayıcılar ve uygulamaları ile odunda kırılma ve yorulma ilişkileri saptanmıştır (Smith, I., vd. 2003). Büyük açıklıklı ahşap karayolu köprülerinin kullanımını genişletmek için ahşap yapılarda kavelalı birleştirmelerin, yorulma üzerine etkilerini belirlemede daha fazla veriye ihtiyaç olduğu belirtilmiştir. Mevcut tasarım kuralları sınırlı ve yetersiz yada yazılı olmayan kaynaklardan oluşmakta olduğu eklenmiştir.

Şeker akçağacı (*Acer saccharum*) odunları ile elde edilen 60 mm boyunda, 9,5 mm çapında kavelalarla, üre formaldehit tutkalı kullanılarak yapılan çift kavelalı T-tipi birleştirmelerin yorulma direnci deneylerinde; birleştirmenin yorulma limiti statik mukavemetinin 1/6'sı kadar bulunmuştur (Eckelman C. A, 1970).

Tekrarlı yüklemeler altında dayanma sınırı; Ladin (*Picea Excelca*, *Picea Sitchensis*), Çam (*Swedish*, *Finnish*) ve Douglas Göknarı ağaç türlerinde 15.7 – 41.2 N/mm² arasında, Dişbudak (*Fraxinus excelsior*), Huş (*Betula verrucosa*, *betula pubescens*), Meşe (*Quercus alba*) ve Ceviz (*Juglans regia*) ağaç türlerinde ise 22 – 41.2 N/mm² arasında bulunmuştur (Bodig ve Jayne 1982).

Ahşap esaslı malzemeler üzerine yorulma testleri, lameller makaslama, aksenal çekme/basınç ve eğilme şeklinde uygulanmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken konu yer döşemelerinde ahşap esaslı panellerin direk olarak kullanılmasından kaynaklı eğilme yorulmalarıdır. Ahşap laminelere yorulma hasarı, basınç direncinde yüzey yüklemesi üzerinde oluşmaktadır. Yapılan çalışmalar aksenal yüklemeler üzerinde dikkat çekmektedir (Bonfield 1991, Bond 1994 ve Hacker 1995). Dinamik Elastikiyet Modülü'nün, kompozit materyallerde ortak yorulma testleri sırasında düşmesinin beklenebileceği vurgulanmaktadır (Yang vd., 1992; Ye, L. 1989; Ferreira vd., 1999; Hwang ve Han, 1989).

Zhang vd. (2003), sabit çevrimsel eğilme yüklemelerine maruz bırakılan iki pinli kavelalı birleştirme kullanılarak hazırlanan T-tipi kenar birleştirmelerin yorulma ömrünü araştırmıştır. Yıkımların döngü sayısının uygulanan momentle ilişkilendirmek amacıyla matematiksel gösterimi de geliştirilmiştir. Zhang vd. (2006), tek taraflı çevrimsel kademeli eğilme yüklemelerine maruz bırakılan, metal bağlayıcı ile birleştirilmiş çam kontrplağında birleştirmelerin eğilmedeki yorulma ömrü üzerine çalışma yapmışlardır. Statik moment kapasitesi ve yorulma testleri neticesindeki yüklenme seviyeleri arasında güçlü ilişki olduğunu vurgulamışlardır.

Tsai ve Asell (1990); yonga levhanın yorulma performansı, lamine ahşabın performansına göre daha düşük değer göstermektedir (Kyanka 1980, Kollman ve Krech 1961, Gillwald 1966). Güçlendirme işlemleri ile ahşap esaslı panellerde yorulma performansını araştırmaya ihtiyaç olduğu belirtilmiştir.

Tanaka ve Suzuki (1984), dört farklı reçine içeren yonga levha uygulamasında yorulma ömrünün arttığı gözlemlenmiştir. Tutkal bağının direnç artırması neticesinde yorulma direncinde de artışlar görülmüştür. Clad ve Schmit (1981), reçine yoğunluklu yonga levhanın yorulmada üstün bir davranış gösterdiğini vurgulamıştır. Kyanka (1980), lamine ahşap ve yonga levhanın yorulma performanslarını karşılaştırmıştır. Bao ve Eckelman (1995), MDF, OSB ve yonga levhanın yorulma dirençlerini belirleyerek, mobilyada mukavemet tasarımında kullanılmak üzere kabul edilebilir tasarım gerilmesi değerlerini hesaplamışlardır. Yapılan çalışmada, T-tipi 2 pinli kavelalı birleştirmenin yorulma performansı, çevrimsel yorulma yüklemelerine maruz bırakılmıştır. Birleştirmelerde kırmızı meşe, sarı kavak, titrek kavak, kontrplak, ESL (engineering strand lumber) ve yonga levha test edilmiştir. Yonga levha kullanılan birleştirmeler, diğer test numunelerine göre daha zayıf bir yorulma ömrü göstermiştir (Zhang, J. vd., 2001).

McNatt (1970) yaptığı çalışmasında sert lif levhada farklı yüklenme şartları altında yorulma davranışlarını incelemiştir. Çekme ve makaslama testlerinde malzemenin % 40-45 düzeyindeki yüklemelerde 10 milyon tekrarda kırıldığı saptamıştır. Elde edilen S-N eğrilerinin masif ahşap malzemenin liflere paralel çekme ve tutkal makaslama örneklerindeki benzer olduğu sonucuna varmıştır. Yorulma süreci esnasında, çevrimsel deformasyonlar konsol eğilmeli yapılara uygulandığında ahşap ve lamine ahşap malzemede sıcaklıkta hızlı bir yükselme ve dinamik gerilmenin azalması gözlemlenmiştir (Nakano, T. 1997; Nakano, T. and Mototani, Y. 1996, 1999).

Makaslama yüklemesi altında, odun esaslı malzemelerin yorulma performansları üzerine incelemeler yapılmıştır (Sugimoto vd. 2006). Masif odunun çekme, burulma ve basınç yorulmalarının, yüklenme sıklığı ve yüklenme dalga boyununa bağlı olduğu belirtilmiştir (Okuyama vd. 1984; Marsoem vd. 1987; Kohara ve Okuyama 1994; Clorius vd. 2000. Gong ve Smith 2003; Ando vd. 2005).

Eckelman (1987), OSB için farklı yüklemeler altında yorulma özelliklerini araştırmıştır. Çalışmada eğilme direncinin % 40 düzeyinde yapılan bir yüklemelerde malzemenin bir milyon tekrarı kırılmadan aştığı görülmüştür. Ancak eğilme direncinin % 55 düzeyinde yapılan tekrarlı yüklemeler yorulma ömrünü büyük ölçüde azaltmıştır. Sonuç olarak, emniyet gerilmelerinin eğilme direncinin yüzdesi yerine yorulma direnci ile tahmin edilmesi gerektiği belirtilmiştir. Cai vd. (1996), OSB örnekleri üzerinde % 80 yüklenme seviyesinde yapılan deneylerinde 1 Hz ve 0.5 Hz'ler arasında kırılmada tekrar sayıları bakımından istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulamamıştır.

Tsai ve Ansell (1990), tarafından yapılan çalışmada, yorulma ömrünün ağaç türünden bağımsız olduğu, rutubetin yorulmayı hızlandırıcı etkisi olduğu ve geri çevrimli yüklemelerde daha düşük olduğu sonucuna varmıştır.

OSB, MDF ve yongalevhanın kenar yönünde eğilme yorulma deneylerinde % 40 eğilme direnci seviyesinde yapılan yüklemelerde 200 000 tekrara kadar direncini koruduğu belirtilmiştir (Bao ve Eckelman, 1995). Thompson vd. (2002), çalışmasında MDF'nin yorulma performansının OSB ve yongalevhalarla göre çok daha düşük olduğunu bulmuştur. Düşük yüklenme seviyelerinde belirtilen malzemelerin yorulma performansları arasında bir fark bulunmamıştır. Thompson vd. (1996), diğer bir çalışmada ise eğilme direncinin % 30-80'i seviyesinde yüklenen yongalevha örneklerinde yüklenme sıklığı (frekans) 0.015-0.15, 0.15-3 ve 3-15.0 Hz aralıklarında denemiştir. Sonuç olarak, frekansın yükselmesi ile kırılmadaki tekrar sayısının yükseldiği bulunmuştur.

Clouris vd (2000), tarafından ladin örneklerinde liflere paralel basma testlerinde % 80 yükleme seviyesi ve 0.01 ile 10 Hz arası dört farklı frekansta yapılan çalışmada, frekansın yükselmesi ile kırılma için gerekli tekrar sayısının arttığı bulunmuştur.

5.SONUÇ VE ÖNERİLER

Ağaç malzemenin kullanım yerlerindeki mekanik etkilere karşı koyma kabiliyeti hakkında güvenilir bir fikir elde edilebilmesi için sürekli yüklemelere karşı direncinin de muhakkak bilinmesi gerekmektedir. Pratik tecrübe ve yapılan araştırmalar gösteriyor ki, malzeme kısa sürede devam eden belirli bir yüke karşı koyabildiği halde aynı yükün uzun ve sürekli bir şekilde tesir etmesi halinde buna karşı koyamadan kırılmaktadır. Böylece ağaç malzemesinin kullanılabilirliği ve direnci hakkında daha iyi hüküm verebilmek için gerilme ve şekil değiştirme (deformasyon) den başka zaman faktöründe göz önünde tutulması gerekmektedir. Böylece malzemenin sürekli ve uzun süreli yüklemelere karşı durumunu bilmeden o malzemenin direnç özellikleri hakkında ayrıntılı bilgi edinmek mümkün değildir. Yorulma, özellikle mobilya çerçevelerinde yıkımların ana nedenidir, bu sebeple ahşap çerçevenin yorulma direncinin belirlenerek tasarım aşamasında ortaya koyulması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Abendroth R. E. and Wipf, T.J. 1989. Cyclic Load Behavior of Bolted Timber Joint. Journal of Structural Engineering, Vol. 115, No. 10, pp. 2496–2510.
- Ando K, Yamasaki M, Watanabe J, Sasaki Y. 2005. Torsional fatigue properties of wood (in Japanese). Mokuzai Gakkaishi, 51.98–103.
- Anonim, 1996. Boeing, Advanced Composite Repair For Engineers. Commercial Airplane Group, 34-37. USA.
- Bao, Z. and Eckelman C. A. 1995. Fatigue Life and Design Stresses for Wood Composites Used in Furniture, Forest Product Journal, 45,7/8,:59-63.
- Bao, Z., and Eckelman, C., A. 1995. “Fatigue Life and Design Stress For Wood Composites Used in Furniture”, Forest Product Journal, 45 (7/8) : 59–63.
- Bao, Z., Eckelman C. A., Gibson H. 1996. Fatigue Strength and Allowable Design Stresses for Some Wood Composites Used in Furniture, Holz als Roh- und Werkstoff, 54, 377-382.
- Barrett, J. D. 1974. Effect of size of tension perpendicular to grain strength of Douglas-fir. Wood and Fiber Science 6 (2) :126-143.
- Barrett, J. D. and Foschi, R. O. 1978. Duration of load and probability of failure in wood. Part II: constant ramp and cyclic loading, Ibid. 515-532.
- Bodig, J. and Jayne, B. A. 1982. Mechanics of Wood and Wood Composites. Van Nostrand Reinhold Company Inc., New York, pp. 176-229.
- Bond, I. P. 1994. The fatigue design of commercial wood composite wind turbine blades. PhD Thesis, University of Bath.
- Bonfield, P. W., Hacker C. L., Ansell M.P., Dinwoodie J. M. 1994. Fatigue and creep of chipboard.Part 1. Fatigue at R=0.01. Wood Sci Technol 28:423–435.
- Bonfield, P. W. 1991. Fatigue evaluation of wood laminates for the design of wind turbine blades, PhD thesis, University of Bath.
- Cai, Z., Bradtmueller, J. P., Hunt, M. O., Fridley, K. J. and Rosowsky, D. V. 1996. ‘Fatigue behaviour of OSB in shear’, Forest Products Journal, 46 (10):81-86.
- Clad, W and Schmidt-Hellera, C. 1981. Fatigue testing of particleboard 2: supplementary tests. HOLZ ROH Werkst, 39:241-248.
- Clorius, C. O., Pedersen, M. U., Hoffmeyer, P., Damkilde, L. 1996. Fatigue Damage in Wood International COST 508 Wood Mechanics Conference, May, 14-16.
- Clorius, C. O., Pederson M. U., Hoffmeyer P., Damkilde L. 2009. An experimentally validated fatigue model for wood subjected to tension perpendicular to the grain. Wood Sci. Tech. 43:343-357.
- Clorius, C. O., Pederson M.U., Hoffmeyer P., and Damkilde L. 2000. Compressive fatigue in wood. Wood Science and Technology Vol. 34, pp. 21-37.
- Dai L., Zhang J. 2007. Fatigue Performance of Wood Composites Subjected to Edgewise Bending Stresses, Forest Products Journal, 57(11).

- Dinwoodie, J. M. 1981. *Timber its Nature and Behaviour*, Van Nostrand Reinhold Co. Ltd., Workingham, UK.
- Dinwoodie, J. M., Paxton B. H., Bonfield P. W., Mundy J. S. 1995. Fatigue and creep in chipboard. Part 2: the influence of slow cyclic fatigue on the creep behaviour of chipboard at a range of stress levels and moisture contents. *Wood Sci Technol* 29:64–76.
- Eckelman, C. A. 1970. The Fatigue strength of two-pin moment-resistance dowel joints, *Forest Products Journal*, (4): 43-48.
- Eckelman, C. A. 1987. Bending strength, Fatigue Strength, Stiffness and Allowable Design Stresses for Engineered Strand Lumber, Oriented Strand Lumber Plus, and Engineered Strand Panel, Unpublished report, Department of Forestry and Natural Resources, Purdue University, West Lafayette, IN.
- Eckelman, C. A., and Zhang, J. 1995. Uses of the General Service Administration performance test method for upholstered furniture in the engineering of upholstered furniture frames. *Holz als Roh- und Werkstoff* 53: 261-267.
- Ferreira, J. A. M., Costa, J. D. M., Reis, P. N. B. and Richardson, M. O. W. 1999. *Comp. Sci. and Tech.* 59, 1461.
- Foschi, R. O. and Yao, F. Z. 1986a. Duration of load effect and reliability based design (single member) in Proceedings of IUFRO Wood Engineering Group Meeting, Italy.
- Foschi, R. O. and Yao, F. Z. 1986b. ‘Another look at three duration of load models’, in *Ibid.* Florence, Italy.
- Foschi, R. O., Folz, B. and Yao, F. Z. 1989. ‘Reliability-based design of wood structures’, Structural Research Series, Report Number 34. Department of Civil Engineering University of British Columbia, Vancouver. BC.
- Gerhards, C. C. 1979. Time-related effects of loading on wood strength. A linear cumulative damage theory, *Wood Science and Technology* 11(3):139-144.
- Gillwald, W. 1966. Investigations on the fatigue resistance of multiple layer particleboard. *Int J. Fract* 6:445–449.
- Gong, M., Smith I. 2003. Effect of waveform and loading sequence on low-cycle compressive fatigue life of spruce. *J Mater Civil Eng* 15:93–99.
- Hacker, C. L. 1995. Fatigue damage in wood composites. PhD Thesis, University of Bath.
- Hansen, L. P. 2010. Experimental Investigation of Fatigue Properties of Laminated Wood Beams. Timber Engineering Conference, London, pp: 3742.
- Hwang, W. B. and Han, K. S. 1989. In *Composite Materials: Fatigue and Fracture*, Vol. 2, edited by P. A. Lagace (ASTM, Philadelphia) p. 87, ASTM STP102.
- Kohara, M. and Okuyama T. 1994b. Mechanical responses of wood to repeated loading VIII – variation of energy loss behaviors with species. *Mokuzai Gakkaishi* 40:801–809.
- Kohara, M., Okuyama T. 1993. Mechanical responses of wood to repeated loading VI – energy-loss partitioning scheme to predict tensile fatigue lifetime. *Mokuzai Gakkaishi* 39:1226–1230.
- Kohara, M., Okuyama T. 1994a. Mechanical responses of wood to repeated loading VII – dependence of energy loss on stress amplitude and effect of wave forms on fatigue lifetime. *Mokuzai Gakkaishi* 40:491–496.
- Kollman, F. and Krech H. 1961. Fracture range and resistance of particleboard. *Int J Fract* 16:113-118.
- Kreuzinger, H and Mohr, B; 1994. Holz und Holsverbindungen unter nicht vorwiegend ruhenden Einwirkungen, Technische Universität, Institut für Tragwerksbau, München.
- Kyanka, G. H. 1980. Fatigue properties of wood and wood composites. *Int J of Fract* 16:609–616.
- Lam, F. 1992. ‘Performance of laminated veneer wood plates in decking systems’, Ph.D. thesis, University of British Columbia, Vancouver.
- Marsoem, S. N, Bordonné P. A, Okuyama T. 1987. Mechanical responses of wood to repeated loading II – effect of waveform on tensile fatigue. *Mokuzai Gakkaishi* 33:354–360.
- McNatt, J. D. 1970. Design Stress for Hardboard – Effect of Rate, Duration and Repeated Loading, *Forest Products Journal*, 20(1), 53-59.
- McNatt, J. D. and Laufenberg, T. L. 1991. Creep and creep-rupture of plywood and oriented strandboard, Proceedings of the International Timber Engineering Conference, London, 3:457-464.

- Möhler, K. and Maier, G. 1973. Untersuchungen über das Dauerschwingverhalten von Holzverbindungen. Karlsruhe TH, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau, Forschungsbericht.
- Nagasawa, C., Kumagai, Y, Ono, M. 1981. Mokuzai-gakkaishi, 27, 541.
- Nakano, T. 1997. Holzforschung, 51, 309.
- Nakano, T., Mototani, Y. 1996. Wood Sci Technol, 30, 347.
- Nakano, T.; Mototani, Y. 1999. Zairyo, 48, 235.
- Okuyama T., Itoh A., Marsoem S. N. 1984. Mechanical responses of wood to repeated loading I – tensile and compressive fatigue fractures. Mokuzai Gakkaishi 30:791–798.
- Ota, M. and Tsubota, Y. 1967. Mokuzai-gakkaishi, 13, 131.
- Smith I., Landis, E., Gong, M. 2003. Fracture and Fatigue in Wood. British Library Cataloguing in Publication Data. England.
- Sugimoto, T. 2006. Effect of Loading Waveform on the Fatigue of Structural Plywood in Shear Through Thickness, Graduate Student, Graduate School of Bioagricultural Sciences, Nagoya University. Nagoya, Japan.
- Sugimoto, T. and Sasaki Y. 2006. Effect of loading frequency on fatigue life and dissipated energy of structural plywood under panel shear load. Wood Sci Technol 40:501–515.
- Sugimoto, T., Yamasaki M. and Sasaki Y. 2006. Fatigue and hysteresis effects in wood-based panels under cyclic shear load through thickness. Wood and Fiber Science, Vol 38, (in press).
- Tanaka, A. and Suzuki M. 1984. Bending fatigue strength of particleboard. Mokuzai Gakkaishi 30:807–813.
- Thompson, R. J. H. 1996. Fatigue and creep in wood-based panel products. PhD Thesis, University of Bath.
- Thompson, R. J. H., Ansell M. P., Bonfield P. W., Dinwoodie J. M. 2002. Fatigue in Wood-Based Panels. Part 1: The Strength Variability and Fatigue Performance of OSB Chipboard and MDF, Wood Science and Technology, 36, 255–269.
- Thompson, R. J. H., Bonfield P. W., Dinwoodie J. M., Ansell M. P. 1996. Fatigue and creep in chipboard. Part 3. The effect of frequency. Wood Sci Technol 30:293–305.
- Thompson, R. J. H., Bonfield P. W., Hacker C. L., Dinwoodie J. M., Ansell M. P. 1994. Creep and fatigue of chipboard in flexure. In: Proceedings of the pacific timber engineering conference, Gold Coast, Australia, pp 521–530.
- Tsai, K. T. and Ansell M. P. 1990. The fatigue properties of wood in flexure. J Mat Sci 25:865–878.
- Yang, J. N., Lee, L. J. and Sheu, D. Y. 1992. Composite Structures 21, 91.
- Ye, L. 1989. Composite Science and Technology 36, 339.
- Yıldızhan, H. 2008. Polimer Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Y. Lisans Tezi, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü. Isparta.
- Zhang, J., G. Li and T. Jr. 2003. Bending fatigue life of two-pin dowel joints in furniture grade pine plywood. Forest Prod. J. 53 (6): 1-7.
- Zhang, J., Quin, F. and Tackett, B. 2001. Bending fatigue life of two-pin dowel joints constructed of wood and wood composites. Forest Prod. J. 51(10):73-78.
- Zhang, J., Yu, Y., and Quin, F. 2006. Bending fatigue life of metal-plate-connected joints in furniture-grade pine plywood. Forest Prod. J. 56(11/12): 62-66.