
SERİ

B

CİLT

**52
53**

SAYI

**2
1-2**

**2002
2003**

İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ

ORMAN FAKÜLTESİ

DERGİSİ



F.1

YANGINDA ODUN VE ODUN ESASLI ÜRÜNLERİN PERFORMANS KARAKTERİSTİKLERİ VE TERMAL DEGREDASYONU

Prof.Dr. Yener GÖKER¹⁾
Ar.Gör. Nadir AYRILMIŞ¹⁾

Kısa Özet

Bu çalışmada odun ve odun esaslı ürünlerin yangında performanslarının belirlenmesinde önemli karakteristikleri olan tutuşabilirliği, ısı yayılma oranı, alev yayılma indeksi, duman ve zehirli gaz oluşumu, kömürleşme oranı irdelenmiş ve odunun ana bileşenleri olan selüloz, hemiselüloz ve ligninin termal degradesyonu ele alınmıştır. Ayrıca, yanmayı geciktirici kimyasalların bu performans karakteristikleri üzerine olan etkisi incelenerek kullanım yerinde odun ve odun esaslı ürünler üzerindeki etkileri ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Yanma, Yanmayı geciktirici, Odun, Termal degradesyon

PERFORMANCE CHARACTERISTICS AND THERMAL DEGRADATION OF WOOD AND WOOD BASED PRODUCTS IN FIRE

Abstract

In this study, it was evaluated important performance characteristics of wood and wood based products, which are ignitability, heat release rate, flame spread index, smoke and toxic gases and, charring rate. Thermal degradations of cellulose, hemicellulose and, lignin which are individual components of wood were investigated. Moreover, it was evaluated effect of fire retardant chemicals on this performance characteristics and determined effects on wood and wood based products in service.

Keywords: Fire, Fire retardant, Wood, Thermal Degredation

1. GİRİŞ

Yangın hemen hemen her binada meydana gelebilecek büyük bir tehlikedir. Hatta, yangına karşı en iyi bir şekilde korunmuş olan ahşap yapılarda dahi yangın tehlikesi tamamen ortadan kaldırılamamaktadır. Yangınlar sonucu önemli ölçüde can ve mal kayıpları her yıl gittikçe artmaktadır. Avrupa'da her yıl bir milyon insandan 10-20 kişi yangınlardan ölmektedir (ANONİM 2003).

¹⁾ İ.Ü. Orman Fakültesi Odun Mekaniği ve Teknolojisi Anabilim Dalı

Amerika Birleşik Devletleri'nde yapılan bir araştırmada yapılarda yangına temel oluşturan nedenler önem sırasına göre aşağıdaki gibi sıralanmaktadır (LEAO 1993);

- a. Isıtma cihazları (% 24.6)
- b. Sigara, pipo vb. (% 18.5)
- c. Elektrik kontakları (% 13.8)
- d. Çocukların dikkatsizliği (% 10.5)
- e. Yanıcı sıvıların dikkatsiz kullanımı (% 9.2)
- f. Mutfaqlarda (yemek pişirme sırasında) gösterilen dikkatsizliktir (% 6.7)

Odun ve odun esaslı malzemeler, esas itibariyle karbon ve hidrojen içeren organik bileşiklerden meydana geldiklerinden yanıcı maddeler sınıfına girmektedirler ve onları tam anlamı ile yanmaz hale getirmek genelde mümkün değildir. Bina inşaatında kullanılan malzemelerde alevin yayılması ve nüfuzu az olduğu takdirde o malzemenin elverişli olduğu kabul edilmektedir. Odun ve odundan yapılmış malzemelerde biçim ve ölçüler yanmanın şiddetinde önemli rol oynarlar. İnce ve kuru bir kaplama levha kolayca alev aldığı halde masif odun veya yongalevha üzerine yapıştırılır ya da kontrplak haline getirilirse bu özelliği kaybolmaktadır. Böylece yüzeyin hacme oranı, yanıcı malzemelerin onların tutuşmaması için bir ölçüdür. Oran büyüdükçe odunun tutuşma kabiliyeti artmakta ve alev çabuk yayılmaktadır. Kaba lifli yüzeyler bu oranı artırmaktadır.

Odunun yanmasını geciktiren kimyasallar iki ana gruba ayrılmaktadır. Birincisi reaktif grup olup kimyasal davranış göstermektedirler. Bu davranışlar; organik malzemenin degradasyon sıcaklığını düşürmesi, odun yüzeyi boyunca ilerleyen alevlerin oranını düşürmesi, kömürleşme oranını arttırması, yanıcı gazların oluşumunu azaltması ve uçucu maddelerin kompozisyonunu değiştirmesi bunun sonucu olarak da toplam yanma ısısını düşürmesidir. Örnek olarak, chlorendic asit, tetraphtalic asit, polyhydric alkoller gibi. İkincisi ise katılım grubu olup fiziksel davranış göstermektedirler. Bu davranışlar; levhanın denge rutubet miktarını arttırması ve daha düşük sıcaklık derecelerinde hidroliz olayını başlatmasıdır. Yanmayı geciktirici kimyasalların en önemli fiziksel davranışı, kimyasaldan yanıcı olmayan gazların yayılması ve ısı absorpsiyonu etkisiyle odunun tutuşması için gerekli olan süreyi uzatmasıdır. Örnek olarak, monoamonyum fosfat, diamonyum fosfat, amonyum bileşikleri, boron bileşikleri, çinko klorit vb. (LEAO 1993).

Tablo 1'de çeşitli kimyasallarla muamele edilmiş orta yoğunlukta liflevhadan yayılan yanıcı olmayan (inert) gazların miktarı ki aslında su buharı beher m² levha için verilmiştir. Herhangi bir muameleye tabi tutulmamış levha 6-7 dakika sonra tutuşmaktadır. Farklı tip yanmayı geciktiriciler ise ısı absorpsiyonu ile tutuşma süresini 1 ila 5 dakika kadar uzatmaktadır. Levhadan yayılan yanıcı olmayan gaz hacmi beher m² için maksimum 2.6 m³'e kadar çıkmaktadır. Tablodaki değerler beher m² için 2 kg kimyasal ile muamele edilmiş orta yoğunlukta liflevhalar için hesaplanmıştır. Levhanın ısıtıcı kaynaktan verilen 15kW/m² (kilowatt/metrekare) ısı enerjisi ile tutuştuğu ve tutuşma sıcaklığının 380°C olduğu tespit edilmiştir. Ana sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir (LEAO 1993).

Tablo 1: Çeşitli Yanmayı Geciktirici Kimyasalların Orta Yoğunlukta Lif Levhanın Tutuşma Süresine Etkisi ve Levhadan Çıkan İnert Gaz Hacmi (LEAO 1993)

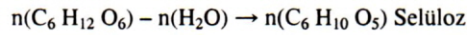
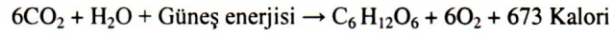
Yanmayı geciktirici kimyasal	Isı absorpsiyonu nedeniyle tutuşma uzama süresi		Levhanın 1 m ² 'sinden (380°C) yayılan yanıcı olmayan gaz hacmi m ³
	Dakika	%	
Diamonyum fosfat (NH ₄) ₂ HPO ₄	5	75	1.9
Monoamonyum fosfat NH ₄ H ₂ PO ₄	3.5	55	1.2
Sodyum metasilikat Na ₂ SiO ₃ .5H ₂ O	3	45	2.0
Sodyum disilikat Na ₂ Si ₂ O ₅	1	15	0.0
Borik asit H ₃ BO ₃	4.5	70	2.6
Borax Na ₂ B ₄ O ₇ ·H ₂ O	3.5	55	2.5

Yanmayı geciktirici kimyasalların odunun yanması esnasında fonksiyonları aşağıdaki şekilde sıralanabilir; a) kömürleşmiş tabakanın oluşumunda b) yanıcı özellikteki uçucu gazların, su buharı ve karbondioksit gibi tutuşmayan gazlarla yer değiştirmesinde c) odun yüzeyinde perdah gibi bir bariyer tabakası oluşturmasında d) odun yüzeyinde şişme özelliği gösteren bir köpük bariyeri meydana getirmesinde e) odundan gaz çıkışı safhasında serbest radikal oluşumuna engel olmasıdır. Bahsedilen bütün durumlarda kimyasallar odun yüzeyindeki tutuşma ile alevin yayılmasını kontrol ederek odun ve odun esaslı malzemelerden yayılan ısı oranını düşürmek için formüle edilerek uygulanırlar.

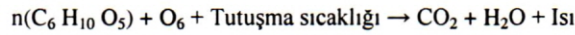
2. YANMA OLAYININ GERÇEKLEŞMESİ

Yanma kimyasal bir olay olup yüksek sıcaklık derecelerinde oluşmakta ve fotosentez ile depo edilmiş 673 kalori değerindeki ısı enerjisi açığa çıkmaktadır. Kısaca yanma, fotosentezin tersi bir olaydır. Bu olayların kimyasal reaksiyonları aşağıdaki gibidir (ASLAN 1998).

Fotosentez:



Yanma:



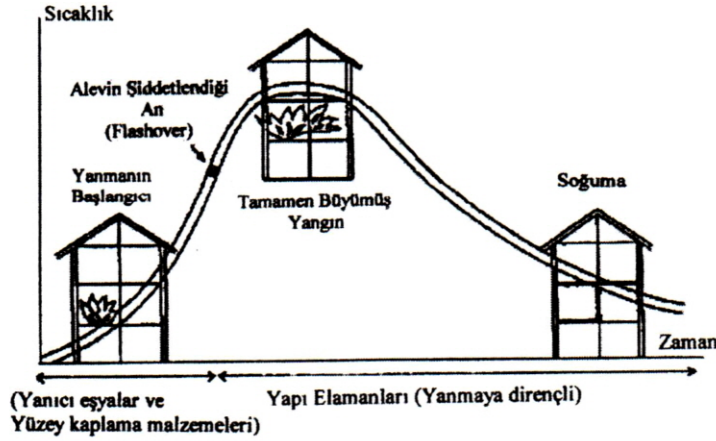
Fotosentez olayında enerjinin oluşması yavaş olmasına karşın yanma olayında enerji çok çabuk açığa çıkmaktadır.

Ne çeşit olursa olsun yanmanın meydana gelebilmesi için yanıcı madde-oksijen-tutuşma sıcaklığı üçlününün varlığı ve bunların uygun bir ortamda bulunmaları gerekir. Eğer bu üçlüden herhangi birisi olmazsa yanma olayı gerçekleşmez. Sıcaklık, oksijen ve yanıcı madde

dengeindeki değişiklikler ise yangının şiddetini belirler. Bir yangının çıkmasına engel olmak veya mevcut bir yangını durdurmak için bu üç öğeden birini ortadan kaldırmak ya da aralarındaki dengeyi bozmak gerekmektedir.

Odunun yanmasında alev, odun yüzeyinden uzakta oluşan gaz ortamında meydana gelmektedir. Yanmanın devamı alevlerden yeterli ısının malzemenin yüzeyine taşınmasıyla mümkündür. Aksi takdirde yanma durmaktadır. Bu nedenle büyük ağaç konstrüksiyon tipleri yangına doğal olarak dayanıklı olmaktadır. Bu gazlar odun yüzeyinden serbest kalıp havayla karıştığında ortamın sıcaklığına bağlı olarak bir alev kaynaklı veya kaynaklı tutuşabilmektedir.

Yapılarda oda gibi kapalı ortamlarda meydana gelen yangınlar, başlangıç safhası ve tamamen büyümüş safha ve soğuma safhası olmak üzere olmak üzere üç farklı aşama içermektedir (Şekil 1). Yangının başlangıcında oda içerisindeki mobilyalar ve yüzey kaplama malzemeleri Giriş bölümünde bahsedilen nedenlerden dolayı tutuşabildiğinden yangının büyümesine sebep olan en önemli faktörlerin başında gelmektedirler. Ayrıca yangının başlangıç safhasında bina veya odaların iç duvar ahşap kaplama malzemeleri bu safhada özellikle çıkış koridorlarında önemli bir rol oynamaktadır. Yanmayı geciktirici kimyasallar en iyi etkiyi yangının ilk çıktığı anlarda yani alevin şiddetlendiği noktaya ulaşmadığı safhada göstermektedir.



Şekil 1: Sıcaklık ve zamana bağlı olarak yapılarda meydana gelen yangınlarda üç önemli safha vardır: a) Yanmanın başlangıcı b) Tamamen büyümüş yangın c) Soğuma safhası (ANONİM 2003).

Konutlarda kullanılan her türlü yanıcı eşya ve yüzey kaplama malzemeleri yangın için önemli bir neden oluşturmaktadır. Şekil 1'de görüldüğü üzere yangın ilk olarak konutun içinde bulunan eşyalardan başlamaktadır. Alevlerin büyümesi birçok faktöre bağlı olup bunlar; eşyaların yanıcılığı, havalandırma olup olmaması, odanın şekli ve bir dereceye kadar da duvar ve tavanların termal özellikleridir. Yanma bir süre ilerlediğinde alevler gittikçe büyüyerek bir anda şiddetlenmekte (veya kuvvetlenmekte) ve odanın içerisindeki eşyaların hemen hemen tamamı yangına dahil olmaktadır. İşte bu noktaya alev şiddetlenme veya kuvvetlenme noktası denmektedir. Alevin aniden kuvvetlendiği noktaya (flashover) ulaşan yangınlarda yanmakta olan malzemelerin yaydığı ısı, etrafta bulunan diğer yanıcı malzemelerin tutuşabilmesi için gerekli olan ısı değerini verdiği için yangın bir anda bulunduğu ortamı sarmakta ve odanın içerisinde yangının bir anda tamamen büyümesine neden olmaktadır. Bu noktada ortamın sıcaklığı

maksimuma ulaşmaktadır. Genellikle bu tip yangınlarda kapı veya pencere açıklıklarından hava akışı olmaktadır. Ancak, odanın içerisinde henüz yanmamış haldeki yanıcı gazları dışarı uzaklaştırmak için yeterli bir havalandırma bulunmuyorsa bu gazlar oda içerisinde hemen yanacağından yangının alev kuvvetlenme noktasına normalden daha kısa sürede ulaşmasına neden olmaktadır. Binada esas yük taşıyan ve bölme görevi yapan yapı elemanları alev şiddetlenme noktasından sonra yanmaya başlamaktadır. Bir süre sonra alevler azalmaya başlamakta ve sonunda soğuma safhasına geçmektedir. Tablo 2'de çeşitli tip odun ve odun esaslı levhaların yangında alev şiddetlenme noktasına ulaşma süreleri verilmiştir (GREXA 2000).

Tablo 2: Çeşitli Tip Odun ve Odun Esaslı Levhaların Yangında Alev Şiddetlenme Noktasına Ulaşma Süreleri (GREXA 2000).

Malzeme Cinsi	Kalınlık mm	Yoğunluk kg/m ³	Alev Şiddetlenme Noktası sn
Douglas Göknarı kontrplağı (Yanmayı geciktirici kimyasal ile muamele edilmiş)	11.8	563	879
Douglas Göknarı kontrplağı	11.5	537	474
Meşe kontrplağı	13	479	174
Çam kontrplağı (Yanmayı geciktirici kimyasal ile muamele edilmiş)	11	606	621
Çam kontrplağı	11	605	330
Yongalevha	13	794	216
OSB	11	643	180
Sert liflevha	6	1026	255
Ladin kereste	17	479	606

Tablo 2'de görüldüğü üzere yanmayı geciktirici kimyasal ile muamele edilmiş Douglas Göknarı kontrplağının alev kuvvetlenme noktası herhangi bir muameleye tabi tutulmamış Douglas Göknarı kontrplağının ortalama 2 katı kadardır. Odun, genellikle kullanım yerinde yanmayı geciktirici olarak görev yapan % 5-15 denge rutubet oranına sahip olduğundan bu rutubet iyi bir izolasyon özelliği göstermektedir. Odun, yangında çevresine yanıcı malzemelerin tutuşmasında etkili olan ve kcal/kg (kilokalori/kilogram) birimiyle ölçülen enerjiyi vermektedir. Bu enerjinin büyük miktarı odundaki rutubet uzaklaştırmak için harcanmakta ve ortama verilen su buharı odundan ayrılan yanıcı gazların miktarını azaltmaktadır.

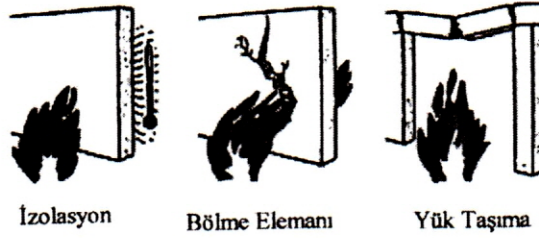
3. ODUNUN YANGINDA PERFORMANSINI BELİRLEMEDE ÖNEMLİ OLAN KRİTERLER

Bugün dünyada binaların iç kısımlarında kullanılan odun ve odun esaslı ürünlerin yangının büyümesine olan katkısını belirlemede; odunun rutubet miktarı, yoğunluğu ve ısı iletkenliği gibi fiziksel özelliklerinin yanı sıra 6 ana kriter de değerlendirilmektedir (Şekil 2). Bunlar; a) tutuşabilirlik b) alevin aniden kuvvetlenerek yayılmasına neden olan ısı yayılma oranı c) alev yayılma indeksi d) duman ve zehirli gazlar e) alevin kuvvetlenme noktası (flashover) f) kömürleşme oranıdır. İlk dördü yangında son derece önemli olup süre ile birlikte ifade edilmektedir. Bu kriterler aynı zamanda odunun yangında performansını değerlendirmede kullanılmakta olup her biri bu bölümün alt başlığında ayrıntılı olarak açıklanacaktır.



Şekil 2: Binalarda duvar ve tavan kaplamaları gibi yapı elamanlarının yanmaya karşı dayanımını belirlemede önemli performans karakteristikleri (ANONİM 2003).

Yanma testleri iki kategori altında toplanabilmektedir. Bunlar, a) bir malzemenin yangında veya yüksek ısı altında nasıl reaksiyon gösterdiği, b) malzemenin yanmaya karşı dayanımı veya direncidir. Birinci grup testlere tutuşabilirlik, alev yayılma indeksi, ısı yayılma oranı ve yanma ürünleri (zehirli gazlar gibi) dahil olmakta ve genellikle yanıcı malzemelere uygulanmaktadır. İkinci grup testler yapılarda yük taşıyan malzemelerin (duvarlar, tavanlar, kapılar ve döşemeler gibi) performansını değerlendirmeye yöneliktir. Şekil 3'de binalarda izolasyon, bölme ve yük taşıma görevi yapan yapı elamanlarının yangında performans karakteristiklerinin önemi verilmiştir (ANONİM 2003).



Şekil 3: Binalarda izolasyon, bölme ve yük taşıma görevi yapan yapı elamanlarının yangında performans karakteristiklerinin önemi (ANONİM 2003).

Şekil 3’de görüldüğü gibi izolasyon malzemelerinde yanmakta olan yüzeydeki sıcaklığın diğer yüzeye iletimi, bölme elamanlarında alevin yanan yüzeyden diğer yüzeyde ortaya çıkması, yük taşıyan yapı elemanlarında ise yangında yüksek sıcaklık etkisiyle çökme durumu önemlidir (ANONİM 2003).

Amerika Birleşik Devletleri Orman Ürünleri Laboratuvarında (Madison, WI.) yanıcı malzemelerden yayılan ısıyı ölçmek için çeşitli testler geliştirilmiştir. En son ve en modern olanı koni kalorimetre olarak bilinen oksijen tüketme kalorimetre testidir (ASTM E 1354 Test Metot, 1994). Bu test birbirini izleyen temel özelliklerini tespit etmede kullanılmakta olup sonuçta sırasıyla; birim alandan yayılan ısı yayılma oranı, toplam ısı yayılma oranı, tutuşma süresi, kütle kaybı miktarı, toplam kütle kaybı miktarı ve duman oluşumu oranı hesaplanmaktadır. Isı yayılma oranını hesaplamak için numunenin yanması sebebiyle oksijen tüketimi ölçümü metodu kullanılmaktadır.

3.1 Odunun Tutuşabilirliği

Odun yeterli oksijene sahip atmosfere ve sıcaklığa maruz kaldığında tutuşmaktadır. Tutuşmanın iki tipi olup bunlar alev kaynaklı ve alev kaynaksız yanmadır. Alev kaynaklı yanma bir kıvılcım veya alev gibi herhangi bir alev kaynağının varlığında meydana gelmektedir. Alev kaynaksız tutuşma ise herhangi bir alev kaynağının olmadığı bir ortamda meydana gelmektedir. Odun yüzeyi bir yangında veya ısıtıcı cihazından gelen enerji veya ısı akışıyla tutuşmaktadır. Bu enerji veya ısı akışı konveksiyon veya radyasyon (ışınım) komponentlerinin her ikisi ile birlikte olabilmektedir. Koni kalorimetre cihazı kullanılarak yapılan bir araştırmada odunun 10-13 kW/m² (kilowatt/metrekare)’de tutuştuğu tespit edilmiştir (WHITE/DIETENBERGER 2002). Odunun tutuşabilirliği üzerine bir çok araştırma yapılmıştır. Bu araştırmaların sonuçlarından odunun tutuşmasını etkileyen temel faktörler aşağıda sırasıyla verilmiştir (LEAO 1993).

- a. Alev kaynağının mevcut olup olmaması
- b. Alevin büyüklüğü ve pozisyonu
- c. Isıtma metodu ve oranı
- d. Isıya maruz kalma oranı
- e. Ortamda bulunan hava oranı
- f. Hava akımı ve türbülans
- g. Test numunesinin büyüklüğü
- h. Isıya maruz kaldığı alan
- i. Malzemenin termal özelliği
- j. Malzemenin yoğunluğu, rutubet miktarı, kimyasal oluşumu ve termal degradasyonu
- k. Kimyasal muamelenin uygulanma şekli

Yanıcı malzemeler yapılarda meydana gelen yangınlar sonucu tutuştuğlarında yakınlarında bulunan diğer yanıcı malzemeleri tutuşturmak için gerekli olan ısıyı sağlayarak yangının büyümesine neden olacak ısı enerjisini ortama verirler. Odunun kalori değeri 17000 kJ/kg (kilojoule/kilogram) ile 22500 kJ/kg arasındadır. Ortalama 18600-19750 kJ/kg olduğu belirtilmektedir. Bu kalori değerinin yarısı veya üçte ikisi odunun yanması esnasında alevle ortama verilirken geri kalanı ise kor halinde yanma sırasında serbest kalmaktadır.

Tutuşma sıcaklığı, çevre şartları ve sıcaklığa maruz kalma şiddetine bağlı olarak, odunla ilgili birçok faktörden etkilenmektedir. Bu faktörler, ağaç türü, yoğunluk, rutubet miktarı, malzeme kalınlığı ve yüzey alanı, yüzey absorpsiyonu, piroliz (odunun yüksek sıcaklık sonucu kimyasal yapısının geri dönüşümsüz bozulması) karakteristikleri, ısı iletkenliği, spesifik ısı ve ekstraktif madde miktarıdır. Odun tutuştuğunda yüzeyinde alevin ilerleme hızı büyük ölçüde odunun ısı iletimine ve ısı kapasitesine bağlıdır. Bunlar tabii ki anatomik özelliklere bağlı olan yoğunlukla doğrudan ilişkilidir. Bu konuda yapılan birkaç çalışma ile yoğunluk ve alev yayılma (yangının büyümesi) arasında ters bir ilişki tespit edilmiştir (LEAO 1993).

STAMM (1955) normal oda sıcaklığında bazı yapı malzemelerinin ısı iletkenlik değerlerini aşağıdaki gibi tespit etmiştir (Tablo 3).

Tablo 3: En Yaygın Kullanılan Yapı Malzemelerinin Normal Sıcaklıklarda Isı İletkenlik Değerleri (STAMM 1955).

Malzeme	Btu in/sq ft h °F	W/mK
Alüminyum	1400	208
Çelik	315	45.4
Çimento, kum ve taş kırıkları	11-16	1.5-2.3
Tuğla	4.8	0.69
Alçı	3.0	0.43
Odun (liflere paralel) (0.35-0.70 g/cm ³ arası)	1.6-2.9	0.23-0.42
Odun (liflere dik) (0.35-0.70 g/cm ³ arası)	0.65-1.15	0.09-0.165
Asbestos levha (Amyant)	0.8	0.115
İzolasyon liflevhası	0.27-0.32	0.039-0.046

Btu in/sq ft h °F: British termal unit inch/foot kare saat derece Fahrenheit.

W/mK: Watt/metre derece Kelvin.

Tablo 4'de yangında yapılarda kullanılan odun ve odun esaslı ürünler için ortalama güvenli uzaklıklar hakkında bazı değerler vermiştir. Yanmakta olan bir yapının karşısında yer alan diğer bir yapının toprak (zeminden) seviyesinden çeşitli yüksekliklerinde yer alan bazı odun ve odun esaslı ürünlerin tutuşmaları için gerekli olan maksimum mesafeleri hesaplanmıştır. Örneğin toprak seviyesinden 20.4 m yükseklikte alev kaynağından 70.1 m'de tutuşurken, 19.8 m'de kendiliğinden tutuşmaktadır. Ayrıca Tablo 4 incelendiğinde zeminden 11.3 m'ye kadar tutuşma için gerekli maksimum uzaklık artmakta bu noktadan sonra azalmaktadır (LEAO 1993).

Tablo 4: Yangında Yapılardan Ortalama Güvenli Uzaklıklar Hakkında Bazı Değerler (LEAO 1993).

Malzeme	Toprak (zemin) seviyesinden değişik yüksekliklerde alev kaynağından maksimum uzaklıklar (m)			
	20.4	11.3	1.8	0
Odun (kendiliğinden tutuşma)	19.8	21.3	16.7	12.2
Liflevha (kendiliğinden tutuşma)	19.8	22.8	18.3	13.7
Odun (alev kaynaklı tutuşma)	70.1	70.1	70.1	70.1
Boyanmış odun (alev kaynaklı tutuşma)	33.5	36.6	32.0	30.5

Organik maddelerden olan odun ve odun esaslı malzemeler belirli sıcaklık derecelerinin üstündeki değerlerde tutuşma ve yanma özelliklerine sahiptir. Ağaç malzeme uygun koşullar altında 150°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda uzun süre bekletilirse tutuşabilmektedir. Ancak, organik yapı malzemesi ve bu arada ağaç malzeme için tutuşmanın meydana geldiği en kritik sıcaklık derecesi 220 °C ve üzeri olup (BERKEL 1970) genel olarak yüzey tutuşma sıcaklığının 260-290 °C arasında olmaktadır. Tutuşma sıcaklığı rutubet miktarı ile yoğunluğuna son derece bağlıdır (WHITE/DIETENBERGER 2002). İğne yapraklı ve yapraklı ağaç odunlarının termal degradasyonu arasında önemli bir farklılık vardır. Kuru iğne yapraklı ağaç odunları için tutuşma sıcaklığı, kuru yapraklı ağaçlardan daha yüksektir. Bu fark iğne yapraklı ağaç odunlarında daha fazla lignin bulunmasıyla açıklanabilmektedir. Odunun tutuşma sıcaklığı, çok sayıda değişkene bağlı olarak geniş ölçüde değişmektedir. En önemli değişkenler (ANONİM 1969);

- Ağaç malzemenin anatomik özelliklerine ve yoğunluğuna
- Ağaç malzemenin fiziksel karakteristiklerine (boyut, form ve rutubet miktarı)
- Isıtma oranı ve süresi
- Isı kaynağının niteliği
- Oksijen miktarı

3.2 Odunun Isı Yayılma Oranı

Odunun yanıcılığını ölçmede kullanılan diğer bir yöntemde ısı yayılma oranının tespitidir. Isı yayılma oranı bir malzemenin yanabilirlik derecesini ve potansiyel yanma tehlikesini gösteren bir indikatör olması nedeniyle önemlidir. Bir oda içerisinde alevin yayılmasında ve yanmanın büyümesinde kritik bir faktördür. Bu ölçüm malzemelerin (kalın, ince, muamele edilmiş veya edilmemiş) nisbi ısı dağılımını değerlendirir. Bu metotla spesifik bir malzemeyi yakmak için gerekli olan süre ve gazın miktarı ölçülmektedir. Metot, Ohio State Üniversitesinde geliştirilmiş (OSU aparatı) ve Amerikan Orman Ürünleri Laboratuvarında oksijen tüketme değerini kullanarak ısı yayılma oranı ve alev kaynaklı tutuşma zamanını ve sıcaklığını tespit etmek için modifiye edilmiştir. "koni kalorimetre" cihazı en yaygın kullanılan ısı yayılma oranı tespit aparatı olup oksijen tüketme metoduna dayalı olarak çalışmaktadır (ASTM E 1354). OSU aparatı sabit bir noktadan yayılan ısı enerjisi ve kontrol edilebilen hava şartlarına maruz kalan odun numunesinin (10 cm x 10 cm) yanmasıyla birim alanından yayılan ısı yayılma oranını ölçmek amacıyla dizayn edilmiştir.

Tablo 5 çeşitli iğne yapraklı ve yapraklı ağaç türü odunları için 1, 3 ve 5 dakika süreleri sonunda ortalama ve tepe (maksimum) noktası ısı yayılma oranlarını vermektedir. Isı yayılma

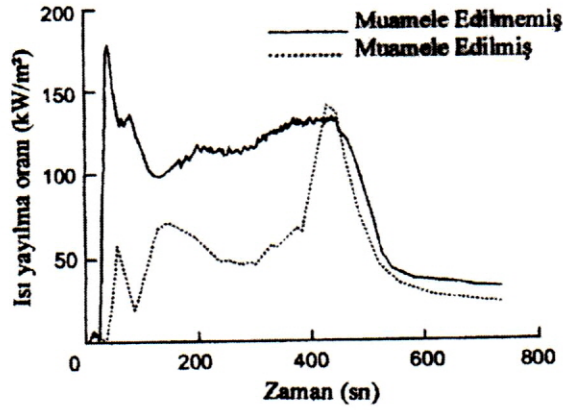
oranı, test işleminde alev kaynağından odun numunesine verilen ısı akışının şiddetine bağlı olup artan ısı enerjisi ile az miktarda doğrusal olarak artmaktadır. Benzer sonuçlar koni kalorimetre testinde de elde edilmiştir

Tablo 5: Bazı Ağaç Türlerinin Isı Yayılma Oranları, Ortalama Yanma Isıları ve Tutuşma Süreleri¹⁾
(WHITE / DIETENBERGER 2002).

Ağaç türü	Yoğunluk (Tam kuru) (kg/m ³)	Isı yayılma oranı (kW/m ²) (kilowatt/m ²)				Ortalama yanma Isısı (MJ/kg) (Megajoule/kg)	Tutuşma Süresi (sn)
		Tepe noktası	60 sn	80 sn	300 sn		
<i>Pinus resinosa</i>	526	209	163	143	132	12.9	24
<i>Pinus strobus</i>	359	209	150	117	103	13.6	17
<i>Juniperus virginiana</i>	-	175	92	95	85	11.7	25
<i>Sequoia sempervirens</i>	408	227	118	105	95	13.2	17
<i>Betula Sp.</i>	618	218	117	150	141	12.2	29
<i>Acer Sp.</i>	626	218	128	146	137	11.7	31
<i>Quercus Sp.</i>	593	214	115	140	129	11.4	28

¹⁾ Veriler koni kalorimetre cihazında 50 kW/m² ısı enerjisinde elde edilmiştir.

Şekil 4'de yanmayı geciktirici kimyasal ile muamele edilmiş ve edilmemiş kontrplaklara ait tipik ısı yayılma oranı grafiği görülmektedir.



Şekil 4: Yanmayı geciktirici kimyasal ile muamele edilmiş ve edilmemiş kontrplakların ısı yayılma oranı
(WHITE/DIETENBERGER 2002).

Şekil 4’de görüldüğü üzere grafik ilk olarak keskin bir tepe noktası ile başlamakta ve odun numunesinin yüzeyi kömürleştiğinde (izolasyon görevi gördüğünden) ısı yayılma oranı minimum değere düşmektedir. Termal dalga odunun kalınlığı boyunca diğer yüzeyine ulaştığında odunun diğer (arka) yüzeyi ikinci bir tepe noktasına hatta ilk ısı yayılma noktasından daha yüksek bir noktaya çıkmasına neden olan piroliz sıcaklığına ulaşmaktadır. Birçok yanmayı geciktirici kimyasal ile muamele edilmiş odun esaslı ürünler için birinci ısı yayılma tepe noktası azalabilmekte veya elimine edilebilmektedir. Isı yayılma oranı odunun artan rutubet miktarı ile azalmakta ve uygulanan yanmayı geciktirici muamele nedeniyle önemli ölçüde düşme göstermektedir.

3.3 Odunun Alev Yayılma İndeksi

Alev yayılma indeksi yanıcı bir malzemenin yüzeyinin uzunluğu boyunca orijin noktasından alevlerin ne kadar hızla yayıldığını ifade eden bir faktör olup, alevin ilerlemesine bağlı zaman-mesafe ilişkisinden hesaplanmaktadır. Yanıcı malzemelerin yüzeyinden yayılan alevler yanmanın büyümesinde çok önemli bir etken olduğundan alev yayılma indeksi yangının tehlikesini tahmin etmede faydalı bir yoldur. Alev yayılma indeksiyle ilgili test sonuçları denemeye konu olan malzeme haricinde test yöntemine önemli ölçüde bağlıdır. Malzemenin pozisyonu, alevin ilerleme yönü, ısı kaynağının şiddeti, hava akışı test sonuçlarını değiştirebilmektedir.

Alev yayılma indeksi, malzemelerin yüzey yanma karakteristiklerini tespit eden Amerika Birleşik Devletleri ASTM E-84 (1995) standardında yer alan yanma deneyine göre belirlenmektedir. Odun esaslı malzemelerin maksimum alev yayılma indeksleri, bina içerisinde bulunış miktarlarına, yerlerine ve yangın söndürücü bulunuşuna göre farklı olmaktadır. ASTM E-84 (1995) testinde amyant malzemenin (yanmaz taş) alev yayılma indeksi 0 değeri ve kırmızı meşenin alev yayılma indeksi 100 değeri olarak kabul edilmekte olup diğer ürünlere kıyas oluşturmaktadır. Bu standarda göre odun ve odun esaslı malzemelerin alev yayılma indeksi 3 sınıfa ayrılmış olup, değerler Tablo 6’da verilmiştir (WHITE/DIETENBERGER 2002).

Tablo 6: Odun ve Odun Esaslı Ürünlerin Alev Yayılma İndekslerine Göre Sınıflandırılması (ASTM E-84) (WHITE/DIETENBERGER 2002).

Malzeme Sınıfı	Alev Yayılma İndeksi	Kullanım Yerleri
I veya A	0-25	Etrafı kapalı dikey yöndeki çıkışlar
II veya B	26-75	Çıkış koridorları
III veya C	76-200	Diğer oda ve alanlar

Herhangi bir koruyucu işlem görmemiş değişik ağaç türlerinin kerestelerinin alev yayılma indeksleri 60 ila 230 değerleri arasında değişmektedir (ANONİM 2001). Kereste, kontrplak ve diğer odun esaslı malzemeler nispeten dar bir sınır içerisinde değişen alev yayılma indeksi gösterirler. Bu malzemelerin aralarındaki farklılık; yoğunluk, kalınlık, yüzey karakteristikleri, ve kimyasal oluşum gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır. Eğer malzeme homojen yapıda ise 6.3 mm’den daha büyük kalınlıklarda alev yayılma indeksinin hemen hemen malzeme kalınlığından bağımsız olduğu ifade edilebilmektedir. Kalınlığı 10 mm ve üzeri olan herhangi bir koruyucu işlem görmemiş kereste, Sınıf III kullanım yerleri alev yayılma indekslerini karşıladığından genel olarak kabul görmektedir. Sınıf I ve II kullanım yerleri için odun esaslı ürünlerin genellikle yanmayı geciktirici kimyasalla muamele edilmesi gerekmektedir. Sadece birkaç ağaç türü Sınıf II kullanım yerinin alev yayılma indeksine sahip olup, Sınıf I kullanım yerinin gereksinimlerini karşılamak için kimyasalla muamele edilmesi gerekmektedir. Bir iki tropik ağaç türünün Sınıf I

kullanım yerini karşıladığı tespit edilmiştir. Odunun içerdiği rutubet miktarı da onun tutuşmasını ve dolayısıyla alev yayılma indeksini etkilemektedir. Çam, Maun ve Kavak cinslerini kullanarak yapılan bir çalışmada tam kuru rutubet miktarında alev yayılma indeksleri sırasıyla 420, 210 ve 320 olarak tespit edilirken yine aynı numuneler % 50 bağıl nemde denge rutubetine ulaştıklarında bahsedilen değerlerin 140, 90 ve 200 'e düştüğü, bağıl nem % 80 'e çıkarıldığında oluşan denge rutubetinde ise alev yayılma indekslerinin sırası ile 70, 60 ve 210'a indiği belirlenmiştir. Ayrıca, Çam ve Maun cinslerinde rutubet artışı ile alev yayılma indeksi önemli ölçüde düşme gösterdiği Kavak da ise % 50 ve 80 bağıl nemlerde beklenmedik şekilde bir artma görülmüştür. Benzer çalışmalar liflevhalarda da yapılmış ve % 1 rutubet miktarında 353, % 7 rutubet miktarında 236 ve % 12 rutubet miktarında 156 alev yayılma indeksi değerleri elde edilmiştir. Rutubet miktarı aynı zamanda odunun kalori değerine de etkilemektedir. Yaş bir odun parçası kuru bir odun parçasından daha az bir ısı vermekte ve artan rutubet miktarı ile ısı değerinde hızlı bir azalma olmaktadır (LEAO 1993).

Odun esaslı kompozit ürünlerinde alev yayılma indeksleri oldukça değişim göstermektedir. Örneğin 4 adet talaşlevha üzerinde yapılan bir çalışmada alev yayılma indekslerinin 71 den 189 a kadar değiştiği tespit edilmiştir. AYRILMIŞ ve ark. (2002) tarafından yapılan bir çalışmada Kavak yongalarından yapılan OSB levhaların alev yayılma indekslerinin 60-100 arasında değiştiği tespit edilmiştir.

Odunun yoğunluğu, tutuşmasından daha çok alev yayılması ve yanmanın büyümesi ile ilişkilidir. Doğal haldeki odunun yoğunluğu arttıkça alev alma (tutuşma) süresi de buna bağlı olarak uzamakta ve yanmaya karşı koymayı ifade eden alev yayılma indeksi azalmaktadır. Ancak aynı haldeki ince levha ürünlerinde bu ilişki geçerli olmayıp ısı levhanın diğer yüzeyine hemen ulaştığından levha yoğunluğu azaldıkça alev yayılma indeksi artış (odun üzerinde alev yayılması daha kısa sürede olmakta) göstermektedir. ASTM E-84 standardında bazı yapraklı ağaç türlerinin alev yayılma indeksleri verilmiştir (WHITE 2002). Yoğunluk arttıkça yanma hızı hiperbolik bir şekilde azalma göstermektedir. Tutuşma için gerekli olan süre ise parabol şeklinde artmaktadır. Örneğin çok hafif olan Balsa odununun yanma hızı Çamdan 3, Meşeden 5 ve Dünyada en ağır tür olan Pelesenkten 10 defa daha yüksektir. Tablo 7'de bazı ağaç türlerinin alev yayılma indeksleri verilmiştir (WHITE 2002).

Tablo 7: Bazı Ağaç Türü Odunlarının Alev Yayılma İndeksleri (WHITE 2002).

Ağaç Türleri	ASM E-84 (Alev Yayılma İndeksi)
<i>Betula alleghaniensis</i>	105-110
<i>Quercus Sp.</i>	100
<i>Liquidambar styraciflua</i>	140-155
<i>Juglans nigra</i>	130-140
<i>Liriodendron tulipifera</i>	170-185
<i>Eucalyptus marginata</i>	26
<i>Eucalyptus pilularis</i>	51
<i>Prunus serotina</i>	76
<i>Ulmus Sp.</i>	76
<i>Carya Sp.</i>	84
<i>Acer Sp.</i>	104
<i>Populus Sp.</i>	170-185

Odundan ayrılan yanıcı gazların verdiği ısı enerjisinin miktarı ölçülebilmektedir. Bu ısı enerjisi yanma esnasında odun yüzeyinde oluşan alevlerin miktarı ile doğrudan ilişkili olup, değeri ne kadar yüksekse alevler o derece büyük olmakta ve dolayısıyla da alev yayılma indeksi artmaktadır. Aksine bu değer ne kadar düşükse alevin büyüme tehlikesi de o kadar az olmaktadır (BELLISSON 1972).

3.4 Duman ve Zehirli Gazlar

Yangında en önemli problemlerden biri de duman ve zehirli gaz oluşumudur. Duman terimi sık sık piroliz ürünleri ve yangın ortamındaki havanın karışımı ifade eden anlamda kullanılmaktadır. Odun yüksek sıcaklığa maruz kaldığı takdirde duman meydana getirmektedir. Bu bağlamda duman, gazlar, küçük katı partiküller ve sıvı damlaları içermektedir. Ayrıca, duman potansiyel bir tehlikedir. Çünkü yangının büyümesine neden olduğu gibi öldürücü ve zehirli gazlar içerdiğinden yangın sırasında insanların etraflarını görmesine ve yangın yerinden uzaklaşmasına engel olmaktadır. Solunum sisteminde de tahrişe sebebiyet vermektedir.

Yanıcı malzemelerden yanma esnasında çıkan dumanın dinamik ölçümü ASTM E 1354 (1994) standardına göre koni kalorimetre test cihazında belirlenebilmekte ve test sonucu duman yayılma indeksi olarak ifade edilmektedir. Odun numunesinden yanmayla çıkan duman, test cihazının gaz çıkış borusundan çıkarken fotosel ile boru içerisindeki beyaz ışık oranındaki azalma ölçülmekte ve duman yayılma indeksine dönüştürülmektedir. Kırmızı Meşe döşemeleri için duman yayılım indeksi 100 değeri olarak kabul edilmekte ve diğer malzemeler buna göre karşılaştırılmaktadır. İç kullanım yerlerinde duman yayılma indeksi 450'nin altında olmalıdır (WHITE/DIETENBERGER 2002).

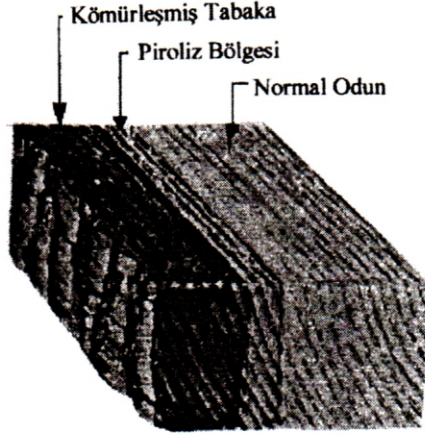
Yanıcı malzemelerin zehirliliği, alanın büyüklüğü ve şekli ile de ilgilidir. Yangınlarda ölen insanların ortalama % 75-80'i alevle temastan olmayıp duman, zehirli gazlar veya oksijen yetersizliğinden ölmektedir. Hayatı tehdit eden bu şartlar mobilya ve yapısal elemanlar gibi yanıcı malzemelerden kaynaklanmaktadır (WHITE/DIETENBERGER 2002).

Karbonmonoksit yangında özellikle kendini pek fark ettirmeyen zehirli bir gaz olup, odun ve odun esaslı malzemeler için en ciddi tehlikedir. Bu gazın küçük miktarları bile önemli ölçüde zehirli olup, insan ölümü için büyük tehlikeye neden olmaktadır. Çünkü kandaki hemoglobin karbonmonoksitle oksijenden (hatta solunabilir oksijenin bol olduğu durumlarda bile) çok daha fazla oranda birleşebilmektedir. Bu zehirlenme şekline karboksihemoglobin zehirlenmesi denmekte ve insanların herhangi bir acı duymadan ölümüne neden olmaktadır. Liflevha, yongalevha gibi odun esaslı malzemelerde yangın esnasında sıcaklık yükselişi ve duman oluşumu masif oduna göre daha azdır. Levha ürünlerinde yoğunluğu veya ilave edilen yanmayı geciktirici kimyasalların oranını arttırmak karbonmonoksit gazı oranını azaltmaktadır. Örnek verilecek olursa herhangi bir havalandırmanın olmadığı bir odada 10 kg odunun tamamen degradasyonu sonucu havaya yaklaşık 3000-4000 ppm karbonmonoksit gazı yayılmaktadır. Bu değer 1 saatten daha kısa bir süre içerisinde insanın ölmesine yeterli olmaktadır. Son yapılan araştırmalar zehirlenmeyle insan ölümlerinin olduğu yangın tipinin esas olarak insanlardan biraz uzakta kapalı ortamlarda (örneğin odalarda) meydana gelen ve alevin aniden kuvvetlendiği noktaya ulaşan yangınlar olduğunu göstermiştir. Alevin bir anda kuvvetlendiği noktaya ulaşan yangınların birçoğunda karbonmonoksit gazı, yanmakta olan malzemelerden bağımsız olarak tehlikeli seviyelerde oluşmakta ve ortama yayılmaktadır (WHITE/DIETENBERGER 2002).

3.5 Kömürleşme

Odun yüksek sıcaklığa maruz kaldığında daha fazla degradasyona uğramasını geciktiren bir izolasyon tabakasını (kömürleşmiş kısım) oluşturmak için yapısı bozulmakta ve bu tabaka oksijenin yanmakta olan madde içerisine girmesine engel olmaktadır. Yapısal odun elemanlarının yük taşıma kapasitesi enine kesit boyutlarına bağlıdır. Bu sebeple, diğer faktörler yanında enine kesitin kömürleşme oranı yapısal odun elemanlarının direnci için önemli bir faktördür.

Malzemenin hızlı kimyasal degradasyonu oksijenin kömürleşen yüzeyden içeri difüzyonunu önlemektedir. Odun ve odun esaslı malzemelerin kömürleşme oranı yapısal odun elemanlarının yangına karşı koyması ile çok yakından ilgilidir. Kömürleşme oranı az veya çok sabit olup odunun özelliklerine bağlıdır. Bunlar; odunun yoğunluğu, rutubeti, anatomisi, kimyasal oluşumu ve permeabilitesidir. Yanmayı geciktirici kimyasallar kömürleşme oranı üzerinde küçük bir etkiye sahip olmalarına karşın kömürleşmiş kısmın derinliğini arttırmada etkilidirler. Şekil 5'de görüldüğü üzere odun ve odun esaslı ürünler kömürleşmeye yüzeyden başlamakta ve normal odun uzunca bir süre bu tabakanın altında kalmaktadır. Bu da odunun diğer yapı malzemelerine karşı üstün olduğu yanlardan biridir. Rutubet miktarı kömürleşme oranını etkileyen önemli bir faktördür. Odunda liflere paralel yöndeki kömürleşme oranının liflere dik yönden iki kat daha fazla olduğu ve odunun kimyasal kompozisyonunun kömürleşme tabakasının kalınlığını etkilediği tespit edilmiştir. Permeabilite odundan uzaklaşan rutubetin hareketini veya kömürleşmiş tabakanın altındaki oduna rutubet girişi hareketini etkilemektedir. Kömürleşme oranı aynı zamanda yangının şiddetinden de etkilenmektedir. Odunun maruz kaldığı sıcaklık derecesi artıkça kömürleşme oranı azalma göstermektedir (WHITE/DIETENBERGER 2002).



Şekil 5: Yanmakta olan bir odununun yüzeyinde izolasyon görevi yapan kömürleşmiş tabaka, piroliz bölgesi ve bir süre yapısını koruyarak direncini muhafaza eden normal odun (WHITE/DIETENBERGER 2002).

Kömürleşmiş tabakanın en iç bölgesinde sıcaklığın ortalama 300 °C olduğu ve odunun düşük termal iletimi nedeniyle bu tabakadan 6 mm iç tarafa doğru sıcaklığın ortalama 180 °C'ye düştüğü belirlenmiştir. Sıcaklıktaki bu ani azalma düşük sıcaklık derecelerinde büyük odun elemanlarının enine kesitinde kömürleşmemiş kısımların kaldığını ve yük taşımaya devam edebileceğini göstermektedir. Odunda kömürleşme devam ederken yüzeydeki rutubet odunun iç bölgelerine doğru ilerlemektedir. Kömürleşmiş tabakadan henüz kömürleşmemiş normal odun bölgelerine doğru ilerledikçe rutubet artma göstermekte ve bu bölgelerde tepe noktasına

ulaşmaktadır. Bu en yüksek rutubet miktarının olduğu bölgede odun sıcaklığı ortalama 100 °C civarındadır olup, kömürleşme tabakasından yaklaşık 13 mm aşağıdadır. (WHITE/DIETENBERGER 2002).

Kömürleşme ile ilgili olarak kabul gören basit bir lineer model olup (WHITE/DIETENBERGER 2002);

$$T = C \cdot x_c$$

ifade edilmektedir. Burada,

T: Zaman (dak.)

C: Kömürleşme oranı (dak/mm)

x_c : Kömürleşme derinliği (mm)

Odunun tutuşmasının ardından kömürleşme derinliği 8 dakika boyunca yaklaşık olarak 0.8 mm/dak.'lık bir oranda ilerlemektedir. Daha sonra kömürleşmiş kısım bir izolasyon tabakası oluşturmakta ve bu nedenle kömürleşme derinliği 0.6 mm/dak.'ya düşmektedir. % 7 rutubette Douglas Göknarı için bahsi geçen değerler elde edilmiştir.

Çelik ve alüminyum ısı etkisiyle kısa bir zaman sonra sertliklerini ve dirençlerini kaybetmektedirler. Çelik 315-420 °C, alüminyum 100-315 °C ısı dereceleri arasında yumuşamaya başlamaktadır. Bu ısı dereceleri yangından hemen kısa bir süre sonra oluşmaktadır. İzole edilmemesi durumunda çelik yapı kısımlarının eğilmede ve çekmede kırılma gerilmeleri çok hızlı bir şekilde azalmaktadır. Örneğin, çelik 500 °C'de normal taşıma gücünün % 50'sini, 700 °C'de ise % 80'ini kaybetmekte ve "ani çökmeler" meydana gelmektedir. Böylece, ağaç malzeme yangın etkisi ile direncini çelik ve alüminyumda olduğu gibi hızlı bir şekilde kaybetmemektedir. Yangının daha başlarında ağaç malzemenin yüzeyinin kömürleşmesi ve iç kısımlarının uzunca bir süre sağlam kalmaktadır. Bunun sonucu olarak direncini belirli bir süre kaybetmeyerek ani çökmeler meydana gelmemektedir. Bir yüzeyindeki sıcaklık 1000 °C'nin üzerinde olan ağaç malzemenin diğer yüzeyine elimizi rahatlıkla koyabilmemize karşın bunu alüminyum veya çelikte yapamayız. Ayrıca ağaç malzemede rutubet mevcut olduğunda ısı ile bu rutubet buharlaşır, kurur ve buna paralel olarak kısa bir süre de olsa direnç özellikleri artar, çalışma özellikleri düşer ve böylece termik genişleme önlenmiş olur (İLHAN 1988).

Yapraklı ağaç odunlarında iğne yapraklı ağaç odunlarına oranla daha az miktarda ekstraktif madde bulunması alev yayılma ve ısı yayılma oranlarındaki değişkenliği azaltmaktadır. Ayrıca kömürleşmiş ürün miktarını da azaltmaktadır. Bir çok yanmayı geciktirici kimyasalla odunun yanmaya karşı performansı son kömürleşmiş ürün miktarını arttırmak suretiyle iyileştirmektedir. Sonuç olarak odunun izolasyon ve kömürleşme özellikleri birçok yangında orijinal direncini uzunca bir süre korumasını sağlamaktadır.

4. YANMAYI GECİKTİRİCİ KİMYASALLARIN KULLANIMI İLE İLGİLİ BAZI PROBLEMLER

Odun ve odun esaslı ürünlerde yanmayı geciktirici kimyasalların kullanımı levhanın tutuşma süresini önemli ölçüde uzatmasına karşın pratik ve teknik problemleri de beraberinde getirmektedir. Birçok yanmayı geciktirici kimyasal bu ürünlerin direnç özelliklerinde azalmaya, görünümünde bozulmaya, asiditesinde artmaya, korozyona uğramasında hızlanmaya ve higroskopisitesinin yükselmesine neden olmaktadır. Eğer bu kimyasallar suda çözünen tipte iseler levhaların rutubete karşı direncini düşürmekte ve levha boyunca yüzeyine veya içerisine tuz

taşınması için bir risk oluşturmaktadır. Yanmayı geciktirici kimyasal ile muamele edilmiş odunun denge rutubet miktarı, normal odundan daha yüksektir. Odunun higroskopisitesinin yüksek oluşu bazen yüzeyindeki boyanın dökülebilmesine neden olabilmektedir. Bazı kristal tuzların aşındırıcı etkisi olup, odunun ağaç işleme makineleriyle işlenmesinde problemlere neden olabilmektedir (LEAO 1993).

Yaş yöntemle liflevha üretiminde, suda çözünen tipte yanmayı geciktirici kimyasallarla işlem, eğer proses suyu tamamen kapalı bir sistem içinde değilse uygulanması zor olmaktadır. Diğer problemler ise, levhaların üretimi aşamasında olduğu gibi kullanım yerinde levhaların bozunması sırasındaki zehirlenme ve korozyon tehlikeleridir. Diğer bir yanmayı geciktirici tip olan organik halojen bileşikleri yüksek derecede tehlikeli olup, odun ve odun esaslı ürünlerin korozyonuna neden olabilmektedir. En büyük tehlikesi bahsi geçen kimyasalların zehirli olması veya zehirli degradasyon ürünleri içermesidir.

Amerika Birleşik Devletlerinde 1988 yılında bazı eyaletlerde (New Jersey, Florida ve Maryland) yanmayı geciktirici kimyasallarla muamele edilmiş çatı kaplama kontrplaklarının kullanım yerinde direkt güneş ışığına maruz kaldığında aşırı sıcaktan dolayı ikinci bir kurutma işlemi gördüğü ve bunun sonucu olarak bu kontrplaklarda direnç azalmalarına neden olduğu rapor edilmiştir. Maryland eyaletinde sadece bir alanda ortalama 7000 kasaba evinin çatısının bu yüzden zarar gördüğü tespit edilmiştir. Amerika Birleşik Devletlerinde Ulusal Konut İnşaatı Birliği tarafından yapılan kapsamlı bir araştırmada yanmayı geciktirici muamelelerin neden olduğu direnç azalmaları nedeniyle zarar gören çatı kaplamalarının değişmesi için 2 milyar dolara mal olduğu ve bireysel olarak 93 m² çatı kaplaması için 2000-3000 doların gerektiği hesap edilmiştir. Diğer taraftan aynı zamanda çatılarda yanmayı geciktirici ile muamele edilmiş kerestenin herhangi bir işlem görmemiş keresteden % 20 ila % 33 daha fazla süre ile yükü taşıyabildiği tespit edilmiştir. Yapıların çatılarında kullanılan kontrplağın 54 °C ve % 73 bağıl neme 6 ay süreyle maruz kalması halinde, direnç değerlerde ihmal edilebilir bir azalma olduğu ancak 82 °C ve %50 bağıl nemde 6 ay süre sonunda direnç özelliklerini olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir (LEAO 1993).

Yanmayı geciktirici kimyasallarla muamele edilmiş odun kırılğan, gevrek, aşındığı zaman kırıntılı şekilde ufalanmakta ve rengi koyulaşmaktadır. Çatılarda kullanılan odunda bel verme veya düzgün olmayan noktalar görülebilmektedir. Aynı zamanda muamele edilmiş odun degradasyona uğradığında "kuru-çürük" görünüşe sahip olmakta ve sık sık aşırı miktarda liflere dik yönde çatlaklar göstermektedir. Bir çok yanmayı geciktirici kimyasal madde asidik karakterde veya termal degradasyon esnasında asit yayarlar. Yanmayı geciktirici kimyasal ile muamele edilmiş kontrplaklardaki direnç değerlerinde azalmanın, sıcaklık ve rutubet varlığında, asidik bileşiklerin reaksiyonu nedeniyle meydana gelen erken dehidrasyon sonucunda olduğu kabul edilmiştir. Yanmayı geciktirici ile muamele edilmiş yongalevhalar 0°C'den 71 °C'ye kadar ısıtıldığında elastikiyet modülü değerinde değişme olduğu tespit edilmiştir. % 7 rutubet miktarında % -0.38, %10 rutubet miktarında ise -0.58 lik bir azalma bulunmuştur (LEAO 1993).

5. ODUNUN TERMAL DEGRADASYONU

Odun yüksek sıcaklığa maruz kaldığında pirolize uğrayarak ortama uçucu gazlar yayar ve kömürleşir. Kömürleşme 300 °C'den daha az sıcaklıklarda en baskın ürün olurken, bu sıcaklığın üzerinde uçucu gazlar daha çok belirgindir. Odundan ayrılan uçucu gazların yanıcı özelliğinde olanları 400-500 °C'de hava ile karışması sonucu tutuşabilmekte ve bu gaz safhasında alevler görülebilmektedir. Yanmanın olduğu ortamda uygun havalandırma olduğu takdirde kömürleşme oksidasyonu ortalama 200 °C civarında önemli ölçüde meydana gelmekte ve 360 °C ila 520 °C'lerde iki maksimum noktaya ulaşmaktadır. Bu kömürleşme oksidasyonu kül kalıncaya kadar devam etmekte ancak ortamdaki havalandırma kesilince durmaktadır.

Odunun termal degradasyonu sıcaklık etkisi bakımından sınıflandırılabilen ve 3 safhaya ayrılmaktadır (LEAO 1993). Bu safhalar;

- a) tutuşma veya alev alma noktası (225-260 °C), odundan ayrılan yanıcı gazların alev kaynağı varlığında tutuştuğu sıcaklık derecesidir
- b) yanma noktası (260-290 °C), stabil bir alevle reaksiyonun meydana geldiği nokta
- c) kendiliğinden tutuşmanın meydana geldiği alevlenme noktasıdır (flash-point) (330-470 °C).

Çeşitli yanmayı geciktirici kimyasallarla muamele edilmiş odun yüksek sıcaklığa maruz kaldığında mekanik özelliklerini etkileyen kimyasal yapısında değişiklikler meydana gelebilmektedir. Bu değişikliklerin seviyesi, sıcaklık derecesine ve bu sıcaklıkta kalma süresine bağlıdır. Kimyasal yapıdaki değişiklikler sadece direnç değerlerinin, higroskopik suyun ve uçucu yağın ağırlık kaybı olarak anlaşılabilir. MITCHELL ve ark. (1999) odundan izole edilmiş bir α -selüloz içerisindeki mannan miktarı ile odunun eğilme direnci arasında kuvvetli bir ilişki olduğunu tespit etmişlerdir. Bu korelasyon hemiselülozların odunun direncini belirlemede önemli bir rol oynadığı sonucunu vermektedir.

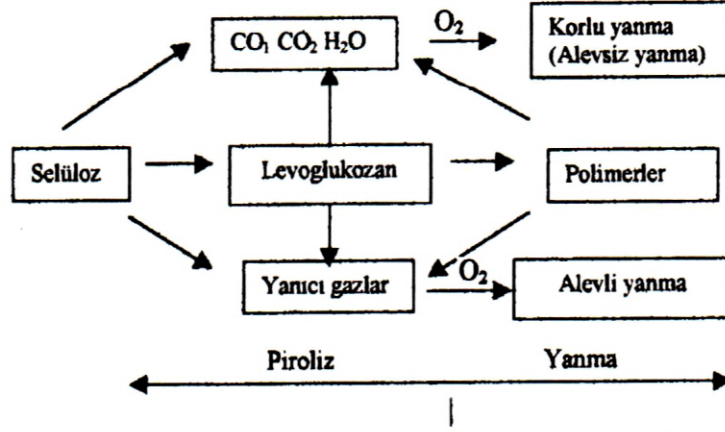
Yanmayı geciktirici kimyasallar ile odunun muamelesi ve yüksek sıcaklıkların odunun direnç özellikleri üzerine etkisi ile ilgili olarak Amerika Birleşik Devletleri Orman Ürünleri Laboratuvarında 1944 ve 1969 yılları arasında birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan sekiz farklı çalışma sonucunda yanmayı geciktirici kimyasal ile muamele edilmiş odun numuneleri % 6-10 rutubete kadar kurutulduklarında eğilme dirençlerinin aynı rutubete kadar kurutulmuş herhangi bir muameleye tabi tutulmamış numunelerden % 6-19 arasında (ortalama % 13) bir azalma olduğu tespit edilmiştir. Yine aynı laboratuvarında yüksek sıcaklıkların odunun direnci üzerine etkisi ile ilgili olarak yapılan kapsamlı bir çalışmada 6 farklı kimyasalın odunun eğilme direnci üzerine etkisi incelenmiştir (LEVAN ve ark. 1990). Düşük (27 °C) ve orta (54 °C) sıcaklıklarda 5 ay kadar bir beklemeden sonra direnç değerlerinde az bir azalma ancak 66 °C ve 82 °C derecelerde ise daha yüksek bir azalma olduğu tespit edilmiştir. Kimyasal ile muamele edilmiş odun, yüksek sıcaklıklarda uzun süre bekleyince en büyük azalmayı arabinoz daha sonra sırasıyla galaktoz, mannoz ve ksiloz göstermektedir.

Benzer bir çalışma Oregon State Üniversitesinde yapılmıştır (JOHNSON 1967). Ticari olarak kullanılan iki tip yanmayı geciktirici kimyasal madde ile muamele edilmiş Douglas Göknarı odunu, kurutma fırınında kullanım yeri rutubetine kadar kurutulmuştur. Kimyasal ile muameleye tabi tutulduktan sonra kurutulmuş odun numunelerinin eğilme direnci değerlerinde birinci tip formülasyonda % 14, ikinci tip formülasyonda ise %15'lik bir azalma tespit edilmiş ve muamele edilmiş odunun % 6-10 rutubet miktarı yerine hava kurusu rutubete kadar kurutulmasının direnç değerlerini daha az azalttığı sonucuna varılmıştır. LUTHER (1921) odunun direnç özellikleri üzerine çinko klorit ve çeşitli yüksek sıcaklıkların etkisini inceleyerek çinko klorit ile muamele edilmiş odunları 2 yıl boyunca 24 °C, 38 °C ve 66 °C de bekletmiştir. Çalışma sonucunda eğilme direnci değerlerinin sıcaklık derecesine bağlı olduğunu ve sırasıyla % 0, % 18 ve % 49 oranlarında azaldığını belirtmiştir (MITCHELL 1999).

Herhangi bir kimyasal muameleye tabi tutulmamış odunun yüksek sıcaklığa maruz kalması sonucu direnç değerlerindeki değişme MACLEAN (1951), DAVIS ve THOMPSON (1964) ve MILLETT ve GERHARDS (1972) tarafından araştırılmıştır. Bu çalışmalar odunda yüksek sıcaklık ile direnç değerlerindeki azalmanın direkt olarak sıcaklığa ve süreye bağlı olduğunu göstermiştir. MACLEAN (1951) 66 °C'nin üzerindeki sıcaklıkların odunun direnç değerlerini sürekli olarak azalttığını tespit etmiştir. Çatı kaplaması olarak kullanılan kontrplak 54 °C ve % 73 bağıl neme 6 ay süreyle maruz kaldığında direnç değerlerde ihmal edilebilir bir azalma olduğu, ancak 82 °C ve %50 bağıl nemde 6 ay süre sonunda direnç özelliklerini olumsuz

yönde etkilendiği tespit edilmiştir (LEAO 1993). 100 °C'nin altındaki sıcaklıklarda odunun direnç değerlerinde sürekli bir azalma olabilmektedir. Bu azalmanın büyüklüğü odunun türüne, rutubet miktarına, ısıtma yöntemine ve süresine bağlıdır. Odunun yanmaya karşı dayanımını arttırmak amacıyla kimyasal madde ile işleme tabi tutulursa daha düşük sıcaklıklarda direnç değerlerinde işlem görmemiş oduna göre belirgin bir azalma olabilmektedir. Bu durum, oduna dehidrasyon ve depolimerizasyon reaksiyonlarını hızlandıran kimyasalın katılmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca kimyasalla muamele edilmiş odunun termal degradasyonu rutubetin varlığıyla hızlanmaktadır (LEAO 1993).

Odun ısıtıldığında ortalama 175 °C'de kimyasal bağlarında kopmalar başlamakta ve sıcaklık arttıkça kopan bağların oranı da artmaktadır. 100 ve 200 °C'ler arasında havanın varlığı ile, CO₂, su buharı ve formik ve asetik asit gibi yanıcı olmayan organik bileşikler üretilmektedir. 200 °C üzerinde odunun selüloz zincirlerinde (karbonhidratlarda) kopmalar başlayarak katran ve ortama yayılabilen yanıcı gazlar oluşmaktadır. Eğer yanıcı gazlar hava ile karışır ve tutuşma sıcaklığına ulaşırsa yanma reaksiyonları meydana gelmektedir. Bu ekzotermik reaksiyonlardan oluşan enerji masif malzemeye yayılmakta ve böylece yanma veya piroliz reaksiyonlarını arttırmaktadır. 450 °C nin üzerinde yayılmakta bütün uçucu gazlar tükenmekte ve geriye CO₂, CO ve su buharında okside olabilen aktif halde kömürleşmiş ürün kalmaktadır. Odunun termal degradasyonu Şekil 6'de görüldüğü üzere biri yüksek sıcaklıklarda (>300 °C), diğeri daha düşük sıcaklıklarda meydana gelen iki farklı yol ile olabilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere 300 °C civarı bir değişim (transposition) noktasıdır.



Şekil 6: Selülozun piroliz ve yanma mekanizması (LEAO 1993).

Birinci yol çoğunlukla 300 °C'den daha düşük sıcaklıklarda meydana gelmekte ve polimerizasyon derecesinde azalmakta, serbest radikaller oluşmakta, suyun eliminasyonu olmakta, karbonil, karboksil ve hidroperoksit grupları oluşmakta, CO ve CO₂ ortama yayılmakta ve nihayet kömürleşmiş ürün kalmaktadır. İkinci ve baskın olan yol ise 300 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda olmaktadır. Reaksiyonlar transglükosilasyon (transglycosylation) ile depolimerizasyonla başlamaktadır.

5.1 Odunu Oluşturan Bileşenlerin Termal Degredasyonu

Odunun termal degredasyonu selüloz, hemiselüloz ve lignin gibi her bir bileşenin termal degredasyonunun toplamı olarak ifade edilebilmektedir. Bununla birlikte, odunun kendi termal degredasyonu her bir bileşenin termal degredasyonu toplamından farklı olabilmektedir. Bu yüzden, termal degredasyon ile ilgili olarak yapılan açıklamalara her bir bileşenin ve odunun kendi termal degredasyonu dahil edilmiştir. Tablo 8'de 800 °C'de kapalı bir ortamda yanan 800 kg odunun piroliz (odunun yüksek sıcaklık sonucu kimyasal yapısının bozulmasıyla oluşan ürünler) ürünleri ve miktarları verilmiştir.

Tablo 8: 800 °C'de 100 kg Odunun Piroliz Ürünleri (BELLISSON 1972).

Piroliz Ürünleri	Miktar
Gaz (12.5×10^6 Joule/m ³)	60 m ³ 'den 80 m ³ 'e kadar
Yanıcı gazlar	H ₂ % 40-45
	CO % 22
Yanıcı olmayan (inert) gazlar	CH ₂ % 15
	CO ₂ % 17
	N ₂ % 1
Metil alkol	1 kg'dan 5 kg'a kadar
Asetik asit	1 kg'dan 5 kg'a kadar
Aseton	0.5 kg
Katran	8 kg
Katı atık	30 kg

5.1.1 Selüloz

Selüloz 260 ila 350 °C'ler arasında degredasyona uğramakta ve esas olarak yanıcı gazların oluşumundan sorumlu bulunmaktadır. Degredasyon; dehidrasyon, hidroliz, oksidasyon, dekarboksilasyon (decarboxylation) ve transglükosilasyon (transglycosylation) yoluyla meydana gelmektedir.

Düşük sıcaklıkta meydana gelen termal degredasyonda tam kuru rutubetteki selülozdan su açığa çıkmakta ve selülozun polimerizasyon derecesinde büyük bir azalma görülmektedir. Selülozun termal degredasyonu su, asit ve oksijen varlığında hızlandırılabilir. Sıcaklıkta bir artış olduğunda bu degredasyon daha da artarak serbest radikaller görünmekte ve karbonil, karboksil ile hidroperoksit grupları oluşmaktadır. Termal degredasyon oranı sıcaklık devam ettiği sürece artma göstermektedir. Termal degredasyonun birincil reaksiyonu, yüksek sıcaklık etkisiyle glikosidik bağların ayrılmasıyla oluşan depolimerizasyondur. Bu reaksiyon, selüloz daha sonra levoglukoza (1, 6-anhydro-β-D-glucopyranose) ve oligosakkaritlere dehidralize olacak olan glikozu üretmek için glikosidik bağları ayırmayı aktif hale getirmeye yeterli enerjiyi absorbe ettiğinde meydana gelmektedir. Glikosidik bağlar kuvvetli asitlerin varlığında oda sıcaklığında hidrolize olabilir durumdadır. Sıcaklık 450 °C civarına yükseldiğinde uçucu bileşimlerin tamamı odundan ayrılmaktadır (LEVAN 1989).

5.1.2 Hemiselülozlar

Hemiselülozlar termal bakımdan selülozdan daha az stabil olmalarının yanı sıra daha fazla yanıcı olmayan gaz ve daha az katran üretirler. Birçok hemiselüloz çok miktarda levoglukoza oluşturmamaktadır. Odunun pirolizi sonucu serbest kalan asetik asitin büyük bir kısmı hemiselülozun deasetilasyon reaksiyonunda rol oynamaktadır. Yapraklı ağaç odunu hemiselülozları iğne yapraklı ağaç odunu hemiselülozlarından ksilan bakımından daha zengin olduğundan ve az miktarda glukomannan içerdiğinden daha az stabildir ve yangın esnasında stabilitesi iğne yapraklılara göre düşük olmaktadır. İğne yapraklı ağaç odunu hemiselülozları yapraklı ağaç hemiselülozlarına göre daha az miktarda ksilan içermesine karşın galaktoglukomannan bakımından zengindir. Hemiselülozların ksilan içeriği termal bakımdan daha az stabildir. Buna neden olarak pentozanların hidroliz ve dehidrasyon reaksiyonlarına çok hassas olmalarıdır. Hemiselülozların degradasyonu 200-260 °C arasındadır. Ksilanlar ve bütün pentozanlar dehidrasyon ve hidroliz reaksiyonlarına heksozan ve polisakkaritlere göre daha az stabildir. Termal degradasyonun ilk aşamalarında direnç değerlerindeki azalma muhtemelen hemiselülozların yapısının bozulmasından kaynaklanmaktadır (LEVAN 1989).

5.1.3 Lignin

Ligninin piroliz reaksiyonunda eter ve karbon-karbon bağlarının ayrılmasından fenoller ortaya çıkmakta ve geriye selülozun pirolizinden daha fazla miktarda kömürleşmiş tabaka kalmaktadır. Odun kömürü içerisindeki stabil (fixed) karbonun büyük bir kısmı ligninden gelmektedir. Çeşitli lignin piroliz ürünlerini tespit etmek amacıyla ligninin yapısı kütle spektrometri yöntemini kullanarak araştırılmaktadır. Odunda 200 °C civarında başlayan dehidrasyon reaksiyonları esas olarak ligninin termal degradasyonundan sorumludur. 150 ve 300 °C'ler arasında, α - ve β - aryl-alkyl-eter bağları oluşmaktadır. 300 °C nin altında lignin degradasyonu çok yavaştır. 300 °C civarında, alifatik yan zincirler aromatik halkadan ayrılmaya başlamakta ve sonunda, 370-400 °C'lerde lignin yapısal birimleri arasında en son kırılacak bağ olan carbon-carbon bağı ayrılmaktadır. Ligninin degradasyon reaksiyonu, 225 ve 450 °C'ler arasında en üst noktalara çıkan ekzotermik bir reaksiyondur.

5.1.4 Odun

Odunun termal degradasyonu, odunu oluşturan bileşenlerin degradasyonlarının bir toplamı olarak değerlendirilebilir. Alfa-selüloz ve hemiselülozlardan oluşan holoselülozların degradasyonu odunun degradasyonunu çok yakından izlemektedir. Ligninin degradasyon süresi holoselülozdan biraz daha erken başlamasına rağmen genel olarak selüloz ve holoselülozdan daha yavaş bir oranda pirolize uğramaktadır. Odun, alfa-selülozdan biraz daha düşük fakat holoselülozdan daha yüksek sıcaklıklarda degradasyona uğramaya başlamasına rağmen alfa-selüloz ve odun benzer oranlarda degradasyon gösterirler. Odunun bu daha düşük degradasyon sıcaklığı temelde hemiselülozlar ve holoselülozdan kaynaklanmaktadır. Odunun degradasyonu alfa-selüloz ve holoselüloz örneklerinin degradasyonuna ligninden daha fazla benzemektedir. Bu, beklenen bir durumdur. Zira, selüloz ve holoselüloz sırasıyla odunun ortalama % 50 ve % 75'ini oluşturmaktadırlar. Yanmayı geciktirici kimyasal ile muamele edilmiş odunun pH değeri direnç özellikleri üzerinde etkiye sahiptir. Ayrıca asidik karakterdeki kimyasallar ve/veya yüksek sıcaklıklar da bu direnç azalmasını hızlandırmaktadır. WINANDY (1999) yaptığı bir çalışmada kimyasalla muamele edilmiş odunun pH değeri ne kadar düşük ise direnç kaybı oranının da süreye bağlı olarak o derece yüksek olduğu sonucuna varmıştır.

KAYNAKLAR

- ABDUL RASHID, A.M., 1987: Fire Retardant Study on Commercial Chipboards-Part I. Fire Propagation Performance. Kepong, Malaysian Forest Research Institute, Malaysia FRIM Occasional Paper, No:2, 10 p.
- ANONİM, 1969: Fire Protection Handbook. 13th. Ed. Revised, National Fire Protection Association, Boston, USA.
- ANONİM, 2001: Dricon Fire Retardant Treated Wood Uygulama Katalogu. www.dricon.com
- ANONİM, 2003: FR Wood Network. High Fire Performance Woodproducts. <http://www.fireretard.com/flame.html>.
- ASLAN, S., 1998: Ağaç Zararlıları Koruma ve Emprenye Teknikleri. KOSGEB Yayınları, Ankara.
- AYRILMIŞ, N.; KARTAL, S.N.; LAUFENBERG, T.; WINANDY, J.E.; WHITE, R.H., 2002: Evaluation of Physical and Mechanical Properties, Fire, Decay, and Termite Resistance of Fire Retardant (FR)-Treated OSB. USDA, Forest Products Laboratory, Madison, WI, USA (in press).
- BELLISSON, G., 1972: The Crucible Test Method for Defining Noncombustible Materials, Ignition, Heat Release, and Noncombustibility of Materials, ASTM STP 502, pp: 83-98.
- BERKEL, A., 1970: Ağaç Malzeme Teknolojisi. İ.Ü. Yayın No: 1448, Orman Fak. Yayın No: 147, İstanbul.
- DAVIS, W.H.; THOMPSON, W.S., 1964: Influence of Thermal Treatments of Short Duration on The Toughness and Chemical Composition of Wood. Forest Prod. J. 14(8):350-356.
- JOHNSON, J.W., 1967: Bending Strength of Small Joists of Douglas-Fir Treated With Fire Retardants. Rept. T-23. Oregon State University, Forest Res. Lab., Corvallis, Oregon, USA.
- İLHAN, R., 1988: Prefabrik Konut Yapımında Yangına Karşı Alınması Gereken Önlemler. Milli Produktivite Yayınları:338, Ahşap Malzemenin Korunması, Ankara.
- LEAO A.L., 1993: Treatment Variations For Production of Fire Retardant Flakeboards Doktora tezi, University of Wisconsin-Madison, USA.
- LEVAN, S.L., 1989: Thermal Degradation. In: Schniewind, Arno P., ed. Concise Encyclopedia of Wood & Wood-Based Materials. 1st Edition. Elmsford, NY:Pergamon Press:271-273.
- LEVAN, S.L.; KIM, J.M.; NAGEL, R.J.; EVANS, J.W. 1996: Mechanical Properties of Fire-Retardant-Treated Plywood After Cyclic Temperature Exposure, Forest Prod. J. 46(5):64-71.
- LEVAN, S.L.; WINANDY, J.E, 1990: Effects of Fire Retardant Treatments on Wood Strength: A review, Wood and Fiber Science 22(1):113-131.
- MILLETT, M.A.; GERHARDS, C.C., 1972: Accelerated Aging:Residual Weight and Flexural Properties of Wood Heated in Air at 115 to 175 °C. Wood Science 4(4):193-201.
- MITCHELL, S.S.; WINANDY J.E., 1999: Influence of Degree of Polymerization of Cellulose and Hemicellulose on Strength Loss in Fire-Retardant-Treated Southern Pine. Holzforchung 53(3):311-317.
- GREXA, O., 2000: Flame Retardant Treated Wood Products. In: Proceedings of Wood and Fire Safety 4th. International Conference. May 14-19, pp:101-11, Slovakia.

STAMM, A.J., 1955: Thermal Degradation of Cellulose and Cellulose Derivatives. 127th National Meeting of the American Chemical Society, Cincinnati, Ohio, April 4-7.

WHITE, R.H.; DIETENBERGER, M.A., 2002: Wood Handbook, Chapter 17:Fire Safety. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI., USA.

WHITE, R.H., 2002: Fire Performance of Hardwood Species. XXI IUFRO World Congress, 7-1 August, Kuala Lumpur, Malaysia.

WINANDY J.E., 1999: Effect of Fire Retardant Treatment of Plywood pH and the Relationship of pH to Strength Properties. Wood Science and Technology vol.33:285-289.