

ORMAN ÜRÜNLERİ SANAYİNDE OTOMASYON ARAŞTIRMALARI

İsmail AYDIN

KTÜ Orman Fakültesi Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, 61080 TRABZON

Geliş Tarihi: 29.04.2004

Özet: Odun, heterojen yapıya sahip doğal bir polimerik malzemedir. Doğal büyüme karakteristikleri ve çevresel bazı etkiler, “kusur” olarak adlandırılan ve belirli uygulamalar için arzu edilmeyen odun özelliklerinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Odunda bulunan kusurlar odunun görsel ve yapısal özelliklerini etkilemektedir. Bu kusurların türü; ağacın büyüme koşullarına, çevresel koşullara, taşıma ve oduna uygulanan işlemlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu kusurların tanımı ve hangi sınırlar dahilinde kabul edilebileceği, endüstriler arasında farklılıklar göstermektedir. Tomruk, kereste, parke vb. ağaç malzemeler, genellikle bir sınıflandırmaya tabi tutulduktan sonra ait olduğu kalite sınıfına göre satışa sunulmaktadır. Gerekse kereste, gerekse tomruklarda bulunan kusurların tespit edilebilmesi, hem üretim hem de zaman açısından işletmeye önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır.

Bu çalışmada, ağaç malzeme kusurlarının tespit edilmesi konusunda yapılan çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir. Sonuç olarak, odun kusurlarının taranması ve tespit edilmesinde kullanılan çok sayıda yöntem karşın, bu yöntemlerinin hiçbirinin tek başına yeterli olmadığı belirtilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Otomasyon, Odun Kusurları, Tarama Yöntemleri

AUTOMATION RESEARCHES IN FOREST PRODUCTS INDUSTRY

Abstract: Wood is a natural polymeric material which has a heterogenic nature. The natural growth process and environmental influence can lead to features in wood that are undesirable for certain applications and are known as defects. Defects in wood affect the visual appearance and structural properties of wood. The type of defect is based on whether growth, environmental conditions, handling or processing causes it. The definition and acceptability of defect types can vary between industries. Wood materials such as log, lumber and parquet are usually subject to a classification before selling and these materials are sold based on their quality grades. The ability to detect internal defects both in the log and lumber can save mills time and processing costs.

In this study, information on the automation research conducted for detection the defects in wood materials were given. As a result, it is indicated that there are numerous scanning methods able to detect wood features, but no one method is adequate for all defect types.

Key Words : Automation, Wood Defects, Scanning Methods

1. GİRİŞ

Orman ürünleri sanayii, ürün geliştirme ve üretim kapasitesinde artış sağlamada otomasyonun ne denli önemli olduğunu uzun yıllardan beri bilmektedir. Kusurların tespit edilmesinde kullanılan az sayıda otomatik sistem bu endüstriye tanıtılmışken, bunlardan çoğu da bazı uygulamalarla sınırlıdır veya beklentileri karşılayacak nitelikte değildir. Mevcut otomatik optimizasyonlu biçme sistemleri genellikle lazer veya kamera tabanlı sensör teknolojileri esasına dayanmaktadır. Daha gelişmiş ve hassas otomatik kusur tespiti, kereste geri kazanmada ve daha düşük kalitedeki ürünleri değerlendirmede bir ilerleme sağlayacaktır. Güvenilir ve gelişmiş bir kusur tarama hedefine ulaşmak için çeşitli sensör tipleri ile geniş oranda araştırmalar yapılmıştır. İzleyen bölümlerde bu hedefe ulaşmak için yürütülen mevcut çalışmalar derlenerek verilmektedir.

Odun kusurlarının tespit edilmesi amacıyla uygulanan farklı algılama sistemleri ile ilgili olarak pekçok araştırma yapılmıştır. Odun özelliklerinin otomatik olarak tespit edilmesinde kullanılan çeşitli tahribatsız test metodlarının kabiliyetleri ile ilgili önemli araştırmalar son 15 yılda yapılmıştır (1). Bu metodlar; optik, ultrasonik, mikrodalga, nükleer manyetik rezonans (NMR) ve X-ışınları algılama tekniklerini içermektedir.

2. KUSUR TARAMA YÖNTEMLERİ

2.1. Optik Yöntemler

Optik yöntemler, siyah-beyaz kameralar, renkli kameralar ile yansıtılan ışığın renk ve yoğunluğunu ölçen spektrometre cihazlarını kullanmaktadır. Bu yöntemler, odunun budaklar, çatlak, yarık, leke, renk ve desen gibi yüzey özelliklerini tespit edebilmektedirler. Bu metotların kolayca otomatikleştirilebileceği belirtilmektedir (2, 3). Ağaç malzemedeki kusurların tespiti için bu optik bilgilerin önemi iyi bilinmektedir. Son zamanlarda, renk ayrımını kullanarak odundaki yüzey özelliklerini hassas bir şekilde tespit eden optik tarama teknikleri geliştirilmiştir. Bununla birlikte optik metotlar iç yapıdaki özellikleri tespit edemezler, yüzey özelliklerinin ayrılmasında güçlüklerle sahiptirler ve kir ve el izleri nedeniyle yanlış olasıdır. Orman ürünleri sanayiinde mevcut optik tarama metotlarına örnek olarak biçme optimizasyonunda kullanılan renk hattı tarama kameraları ve elde edilen renk bilgisinin kenar kaplama bandı seçiminde kullanılması verilebilir (4, 5, 6).

2.2. Ultrasound

Ultrasonik yöntemler, yüzeysel ve iç kısımlarda bulunan kusurların taranması için malzemenin içinde oluşturulan yüksek frekanslı ses dalgalarının yayınlarını kullanmaktadır. Ultrasound'un yarıkları, çatlakları, reçine sızıntıları, çürüklük ve budakları tespit edebilme yeteneğine sahip olduğu ifade edilmiştir (7, 8). Ultrasound'un başlıca sınırlaması ise enerji nakletme cihazının taranan malzeme yüzeyine bağlanmasını gerektirmesidir. Bu cihazın kullanımı test edilmiş ve ultrasonik yöntemlerin kerestelerin muayenesinde uygulanabilir bir araç olduğu bulunmuştur (9, 10).

2.3. Mikrodalga

Mikrodalga algılama metotları ile kusur tespiti, test edilen elektromanyetik dalgaların hızına ve zayıflık derecesine bağlıdır. Mikrodalgalar oduna hava ile temas edebilir ve odun örneklerinin yoğunluklarının, rutubet derecelerinin ve lif eğimlerinin tespit edilmesinde kullanılmaktadır (11). Mikrodalga metotları, eş zamanlı olarak otomatik tarama sistemlerinde kullanılabilir. Mikrodalgalar ile kusur tespitinin dezavantajı ise; görsel kusur türleri arasında bir ayrım yapamaması ve çatlakların ve reçine keselerinin tespitinde etkili olmamasıdır (1).

2.4. Nükleer Manyetik Rezonans (NMR)

NMR görüntüleme teknikleri bir malzemeyi yüksek bir manyetik alana maruz bırakmakta ve malzemenin belirli bir radyo frekansına verdiği elektromanyetik karşılığı ölçmektedir. NMR, odun kusurlarının tespit edilmesinde kullanılmaktadır (12). NMR metotları kullanılarak tespit edilen çeşitli kusur türleri, odundaki rutubet değişiklikleri ile ilişkilidir. Çoğunlukla odunun taze halde işlendiği yerlerde kusurların tespiti ve rutubet derecesinin denetlenmesinde NMR başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Kuru odundaki kusurların tespit edilmesinde ise NMR'ın etkinlik derecesi azalmaktadır (13).

2.5. X-Işını

X-ışını tarama metotları, bir materyalden geçen radyasyon sinyalinin zayıf veya kuvvetli olması esasına dayanmaktadır. X-ışını taraması odundaki çürük, budak, çatlak, reçine keseleri ve bal peteği oluşumlarının tespit edilmesinde kullanılmaktadır (1). X-ışını taraması kullanan metotlar, odun kusurlarının resimlerini hızlı bir şekilde ve yüksek kalitede

oluşturma yeteneğine sahiptirler. X-ışını bilgisi, kerestelerde otomatik kusur taramada kullanılan diğer metotlarla birlikte başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Bilgisayarlı tomografi (CT) teknikleri, x-ışınlarından faydalanmaktadır ve dikili direklerde, tomruk ve kerestelerdeki kusurların belirlenmesinde kullanılmaktadır (14, 15). Bilgisayarlı tomografinin tanımlaması iki boyutlu x-ışını taramasından farklıdır ve bu yöntemde malzemenin birkaç bölümü taranır ve üç boyutlu bir resim olarak yeniden oluşturulur. Üç boyutlu CT tanımlaması, tomruk ve kerestelerin iç kısımlarındaki kusurlu bölgelerin yerlerinin tespit edilmesi için faydalı bir yöntemdir. X-ışını tarama metotlarının dezavantajları; bu metotların kusursuz odun ile aynı yoğunluğa sahip olan kusurları bulamaması ve kusur tipleri arasında belirgin bir ayırım yapamamasıdır.

Yukarıda bahsedilen metotlara ilave olarak; kapasitans, lazer tarama ve termografi gibi bazı odun özelliklerini ölçen başka metotlar da sayılabilir. Bu algılama metotlarının odunun belirgin karakteristiklerinin ölçümünde kullanılabilmesine rağmen, tek başına hiçbir algılama sistemi nihayetinde masif odun ürünlerinin kalitesini belirleyen yapısal, görsel ve estetik özelliklerin tamamını güvenilir bir şekilde ölçmemektedir. Ayrıca, bu algılama sistemleri kullanılarak ölçülen parametrelerin etkinliği hakkındaki bilgiler yeterli değildir (16).

2.6. Tek Sensörlü Tarama Yöntemleri

Tek algılayıcı tarama sistemlerinin yetenekleri ve sınırlamalarından yukarıda bahsedilmiştir. Bu sensörler tek başına bazı belirgin özellikleri hassas bir şekilde tespit etme yeteneğine sahipken, hiçbirisi orman ürünleri sanayii ile ilişkili özelliklerin tamamını tek başına, güvenilir ve hassas bir şekilde tespit edememekte ve yerini belirleyememektedir. Günümüzde endüstride kullanılan tarama sistemlerinin çoğu tek sensörlü teknolojiye sahiptir ve bu yüzden de yetenekleri sınırlıdır. Endüstrinin ihtiyaç duyduğu özelliklerin tamamının güvenilir bir şekilde tespit edilmesi için bu algılama sistemlerinin bir kombinasyonunun kullanılması gerekmektedir (6).

2.7. Çok Sensörlü Tarama Yöntemleri

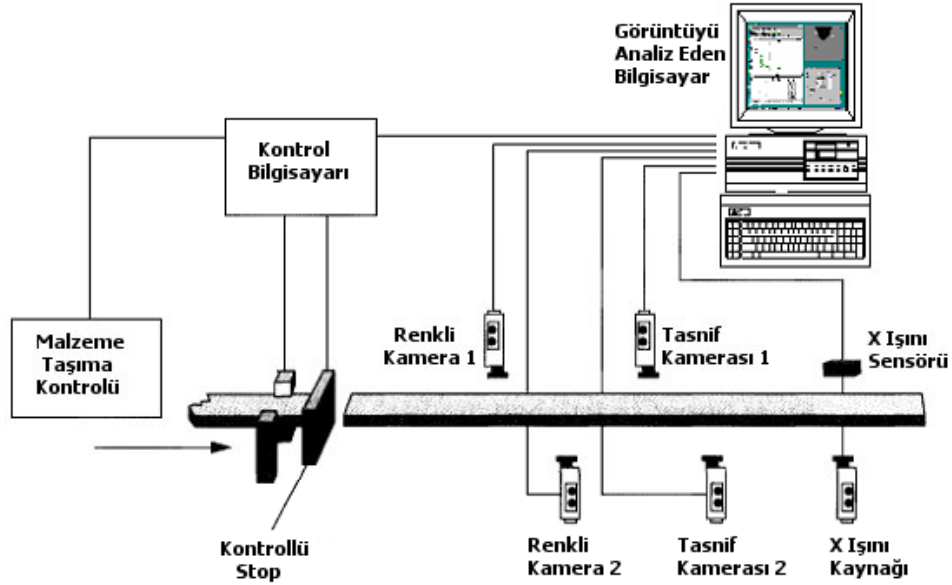
Portala ve Ciccotelli, üç değişik tipteki bilginin elde edilmesi durumunda, odun özelliklerine ilişkin kapsamlı bilgiye sahip olunacağını ifade etmişlerdir (17). Bunlar;

1. Dış boyutlar ve şekil karakteristikleri
2. Görünüş karakteristikleri
3. İç yapıya ait karakteristikler.

Bu ifade, odun özelliklerinin kapsamlı ve hassas bir şekilde tanımlanabilmesi için algılama metotlarının bir kombinasyonunun gerektiğini belirtmektedir. Örneğin, boyut karakteristikleri lazer esaslı bir optik sınıflandırma sistemi ile, görünüş karakteristikleri siyah-beyaz veya renkli bir kamera ile, odunun iç yapısına ait yapısal karakteristikleri de ultrasound, mikrodalga, NMR veya X-ışını tarama tekniklerinin kullanılmasıyla ölçülebilir (3, 18).

Algılama teknolojilerinin kombinasyonun faydalı görülmesine karşın, odun özelliklerinin tespiti için uyarlanan bir sistemde farklı algılama metotlarının kombinasyonu ile ilgili az sayıda araştırma gerçekleştirilmiştir. Portala ve Ciccotelli tarafından X-ışınları, mikrodalga ve renk ayırım sensörlerinin bir kombinasyonu araştırılmıştır (17). Ancak bu çalışmada her metodun odun kusurlarını tespit edebilme yeteneğinin gösterilmesine rağmen, algılama bilgilerinin nasıl kombine edileceği veya odun özelliklerinin hassas bir ayırımı ve sınıflandırması için hangi bilgilerin gerektiği konusunda herhangi bir bilgi verilmemiştir. Odundaki kusurları tespit etmek için; yüzey pürüzlülüğü, traheit etkisi ve üç boyutlu profil

bilgisini toplamak amacıyla üç lazer ve bir kameranın kombine edildiği bir araştırmada çeşitli ayırım metotları kullanılmış, ancak sınıflandırma yeteneği ile ilgili herhangi bir bilgi verilmemiştir (19).



Şekil 1. Çok sensörlü bir tarama sistemi örneği

Çok sensörlü teknolojinin ticari uygulamaları sınırlıdır. Rowa; renkli kamera, siyah-beyaz kamera ve lazer esaslı bir sınıflandırma sistemini içeren çeşitli optik algılama metotlarını birleştirmiş, ancak bu sistemin başarısı ve yetenekleri ile ilgili herhangi bir bilgi yayınlanmamıştır (3).

2.8. Endüstrideki Bir Tarama Sisteminin Ekonomikliği

Otomatik bir kusur tarama sistemi için en önemli konuların başında böyle bir sistemin maliyet gelmektedir. Otomatik bir tasnif sisteminin maliyetinin, tasnif edilecek malzemenin değerinin yaklaşık olarak % 5'i olacağı tahmin edilmiştir. Bu tutar, 100.000 m³/yıl üretim kapasitesine sahip bir fabrika için yaklaşık olarak yılda 50.000 \$ dır. Yumuşak ağaç kerestelerinin sınıflandırılması için kullanılacak bir kusur tarama sisteminin fiyatı da 100.000 – 150.000 \$ olarak hesaplanmıştır. Bu da bir tasnif sisteminin üç yıl içerisinde kendi kendini ödemesine izin verecektir (19). Huber ve arkadaşları, otomatik bir kusur tespit sisteminde kullanılan bir lazer sisteminin ekonomikliği konusunda çalışmalar yapmıştır. Meşe ile çalışıldığında, “ALPS” olarak adlandırılan bu sistemin günde 1.250 \$ tasarruf sağladığı ifade edilmiştir. Hızlı değişen teknolojilerle birlikte bilgisayar ve bağlantılı donanımların fiyatlarının azalması neticesinde, günümüzde oldukça yüksek olan kusur tarama sistemlerinin maliyetleri gelecekte azalacaktır (20).

3. GÖRÜNTÜ İŞLEME METOTLARI

Makine yeteneği kullanılarak bir nesnenin özelliklerinin tanımlanmasındaki ilk adım, bu nesneyi ifade eden görüntülerin elde edilmesidir. Taranan nesneyi tarif eden dijital görüntülere dönüştürülen bilgilerin toplanması için çeşitli sensörler kullanılmaktadır. Öncelikle çeşitli sensörler kullanarak bir görüntü veya görüntüler toplanır. Nesnenin içerdiği

çeşitli özellikleri seçecek ve tanımlayacak belirli çalışmalar olmalıdır. Bu çalışmalar genellikle düşük seviyeli ve yüksek seviyeli olmak üzere iki şekildedir. Düşük seviyeli işleme; görüntü filtreleme ve ilgilenilen nesne alanını ve sınırlarını ayırma işleminden ibarettir. Bu düzeyde ilgilenilen nesne alanı oluşturulur ve bu alanları tanımlayacak ölçümler toplanır. Yüksek seviyeli işleme ise, düşük seviyeli işleme tarafından ortaya çıkarılan ölçümleri temel alarak bölgelerin sınıflandırılmasında çeşitli metotları kullanmaktadır (19).

3.1. Görüntü Oluşumu

Bir yerden yansıtılan veya bir nesne üzerine gönderilen radyasyonun bazı biçimleri, bir sensöre kaydedildiğinde görüntü meydana getirilir. Sensör bir görüntüyü elde ettiğinde, bu görüntü piksel olarak bilinen parçalara ayrılır. Bu pikseller, nesnenin görüntüsü içindeki koordinatlar ve bu koordinatlar ile ilgili parlaklık değerleridir. Bu sayısallaştırma işleminin sınırlamaları, elde edilen görüntünün çözünürlüğü tarafından belirlenir. Görüntünün çözünürlüğü, uzaysal ve parlaklık çözünürlükten oluşmaktadır. Uzaysal çözünürlük, görüntünün tamamını temsil eden piksellerin sayısıdır. Uzaysal çözünürlük arttıkça, bir görüntü genellikle daha detaylı bir hale gelir ve daha doğal bir görünüme sahip olur. Uzaysal çözünürlük, algoritmalar kullanılarak tespit edilecek özelliğin en küçük boyutunu idare etmektedir. Bununla birlikte yüksek çözünürlükler, işlenecek veri miktarını artırarak görüntünün işlenmesini, ayrımını ve sınıflandırılmasını yavaşlatmaktadır. İdeal olarak, en küçük özelliği en hassas şekilde tespit etmek için gerekli en düşük çözünürlük elde edilmelidir. Parlaklık çözünürlüğü, dijital parlaklığın görüntünün aynı yerindeki orijinal parlaklığı ile hangi hassasiyette karşılaştırılacağına bir ölçüsüdür (19).

Görüntünün uzaysal ve parlaklık çözünürlüğü yapılacak uygulamaya bağlıdır. Ayrım ve sınıflandırma işlemlerinin uygun bir şekilde çalışması için, uygulamada doğru çözünürlüğün belirlenmesi önem taşımaktadır. Odundaki kusurların tespiti için, taranacak en küçük nesnenin uzaysal çözünürlüğünün iki kez alınması ve parlaklık çözünürlüğünün en az 8 bit seçilmesi genel kabul görmüştür (19).

4. ODUN KUSURLARININ TESPİTİ VE RENK İLİŞKİSİ

Pek çok araştırmacı türler arasında, aynı türün öz odunu ve diri odunu - ilkbahar odunu ve yaz odunu arasındaki renk farklılıklarını incelemiştir. Ancak aynı türlerin yüzey özellikleri arasındaki renk farklılıkları görüntü analizi açısından daha fazla önem taşımaktadır (4).

Boardman ve arkadaşları; ceviz kaplamalardaki öz odunu, diri odun ve yaygın görülen kusurların renk özelliklerini ölçmek için ($L^*a^*b^*$ renk ayırma sistemine göre) bir renk ölçer (colorimeter) kullanmıştır. Bu çalışmada kusurların sağlam odundan ayrımı başarılı olmuş de, uygulanan metotlar ile tüm kusurlu alanları tespit edilememiş veya kusur türleri belirgin şekilde ayrılamamıştır (21).

Çam odunu ve kusurlarının spektral yansımalarının renk homojenliğinin incelendiği bir çalışma sonucunda çoğu odun kusurunun kusursuz odundan ayrıldığı, ancak bu kusurlar çok karmaşık spektral yansımalara sahip olduklarında kusur tipleri arasında ayırım yapmada bir güçlüğü bulunduğuna ortaya konmuştur (19).

Lebow ve arkadaşları; douglas göknarı kaplamalarının yüzey özelliklerinin sınıflandırılmasında bir spektrometre ile ölçülen spektral yansımaları kullanmıştır (6). Her özellik tipi için spektral yansıma eğrisi modeli oluşturulmuş ve analiz edilerek sınıflandırma yapılmıştır. Bu metot ticari uygulamalara uyarlanamamış, ancak bu çalışma esas alınarak teorik bir metot ortaya çıkarılmıştır.

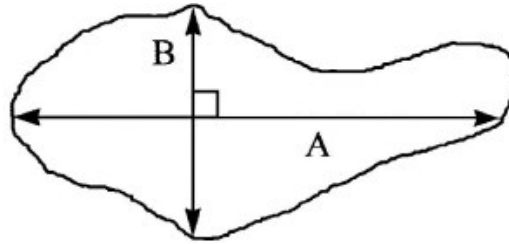
5. ODUN KUSURLARININ TESPİTİ VE YOĞUNLUK İLİŞKİSİ

Odun özelliklerinin ayırt edilmesi ve sınıflandırılmasında renk bilgisinin önemi araştırmacılar tarafından vurgulanmıştır (4, 19), ancak daha ileri düzeyde bir sınıflandırma yapılabilmesi için başka özelliklerin de ölçülmesine ihtiyaç vardır. Yoğunluk da bu özelliklerden biridir.

Yoğunluk farklılıklarını gösteren X-ışını verileri, tüm kusur tiplerinin taramasında kullanılabilir. Bu yöntem ile yüzey kusurları kadar odunun iç yapısındaki kusurların taranması da mümkündür. Renk ve yoğunluk bilgilerinin bir kombinasyonu; sadece yüzeysel ve dahili kusurların tespit edilmesini sağlamakla kalmayıp aynı zamanda kusur türlerini daha iyi tanımlayacak bilgi miktarını artırmasıyla, sınıflandırma işlemindeki hassasiyeti de artırmaktadır (19).

6. KUSURLARIN TESPİTİNDE ŞEKİL ÖLÇÜMLERİNİN KULLANILMASI

Kusurlarının belirlenmesi maksadıyla bir nesnenin şeklinin ölçülmesi için çok sayıda yöntem mevcuttur. Bunlardan çoğu; alan, eksantriklik, Euler Sayısı, yoğunluk ve lif kıvrıklığı fonksiyonlarını içermektedir (20). Eksantriklik, Şekil 2’de gösterildiği gibi, maksimum A uzunluğunun, A uzunluğuna dik olan B’nin maksimum uzunluğuna oranıdır.



Şekil 2. A/B uzunluğu ile belirlenen eksantriklik ölçümü

Euler Sayısı, E, bir alanın bütünlüğünü belirler ve

$$E = (C) - (H)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada, C; birbirine bitişik bölgelerin sayısı ve H; çukur sayısıdır. Yoğunluk, nesnenin çevresinin alanına oranı olup,

$$\text{Yoğunluk} = P^2/a$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Burada; P, nesnenin çevresi, a da nesnenin alanıdır. Bu nesnenin yuvarlaklığı ise

$$R = P^2 / (4 \times P \times a)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Yine burada P; çevre, a; alandır.

Pek çok araştırmacı odun kusurlarının tespit edilmesinde şekil ölçümlerinden faydalanmıştır. Forrer ve arkadaşları görüntü ayrımı için uzunluk ve lif yönünden faydalanmıştır (22). Kauppinen and Silven, budakların sınıflandırılması için şekil ölçümleri kullanmış ve şekil ölçümlerinin, odundaki renk sınıflandırması hassasiyetini % 5 kadar artırdığını ifade etmiştir (19).

7. SONUÇ

Odun kusurlarının taranmasında ve tespit edilmesinde kullanılan çok sayıda yöntem olmasına rağmen, bu yöntemlerden hiçbiri, tüm odun kusurlarının tespit edilmesi için yeterli değildir. Sensörlerin kombinasyonu ile daha güvenilir ve hassas kusur tarama sistemleri geliştirilebilir. Sensörler; odunda doğal oluşan renk, şekil ve yoğunluk farklılıkları esasına

göre odun kusurlarını ve bu kusurların yerlerini belirlerler. Bu farklılıkların var olduğu ve odun özelliklerinin ayırımında faydalı olduğu bilinmektedir; ancak bireysel odun özelliklerinin bu ölçümler ile nasıl temsil edildiği açık değildir. Renk, şekil ve yoğunluk farklılıkları ile odun kusurlarının tespit edilmesine yönelik bilgilerin artışıyla, bu sınıflandırma için hangi parametrelerin önemli olduğu belirlenebilecek ve böylece kusur tarama metodlarının hassasiyeti ve yeteneği artırılacaktır.

KAYNAKLAR

1. Szymani, R., McDonald, K.A., Defect Detection in Lumber: State of the Art, Forest Products Journal, 31 (11) (1981) 34-43.
2. Forrer, J. B., Butler, D.A., Brunner, C.C., Funck, J.W., Image Sweep-Andmark Algorithms, Part 2 - Performance Evaluations, Forest Products Journal, 39 (1) (1989) 39-42.
3. Rowa, P., Automatic Visual Inspection and Grading of Lumber, In: Proceedings of Scanning Technology and Image Processing of Wood, August 30 - September 1, Skelleftea, Sweden, 9 p., 1992.
4. Brunner, C.C., Shaw, G.B., Butler, D.A., Funck, J.W., Using Color in Machine Vision Systems for Wood Processing, Wood and Fiber Science, 22 (4) (1990) 413-428.
5. Maristany, A.G., Lebow, P.K., Brunner, C.C., Application of the Dichromatic Reflection Model to Wood, Wood and Fiber Science, 26 (2) (1994) 249-258.
6. Lebow, P. K., Brunner, C.C., Maristany, A.G., Butler, D.A., Classification of Wood Surface Features by Spectral Reflectance, Wood and Fiber Science, 28 (1) (1996) 74-90.
7. McDonald, K.A., Lumber Defect Detection By Ultrasonics, Research Paper FPL-311. Madison, Wisconsin: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Lab. 20 p., 1980.
8. Wilcox, W.W., Detection of Early Stages of Wood Decay With Ultrasonic Pulse Velocity, Forest Products Journal, 38 (5) (1988) 68-73.
9. Fuller, J.J., Ross, R.J., Dramm, J.R., Nondestructive Evaluation of Honeycomb and Surface Checks in Red Oak Lumber, Forest Products Journal, 45 (5) (1995) 42-44.
10. Ross, R.J., Fuller, J.J., Dramm, J.R., Nondestructive Evaluation of Green Defect-Prone Red Oak Lumber: A Pilot Study, Forest Products Journal, 45 (11/12) (1995) 51-52.
11. Martin, P.R., Collet, P.Barthelemy, Roussy, G., Evaluation of Wood Characteristics: Internal Scanning of the Material by Microwaves, Wood Science Technology, 21 (1987) 361-371.
12. Chang, S.J., Olson, J. R., Wang, P.C., NMR Imaging of Internal Features in Wood, Forest Products Journal, 39(6) (1989) 43-49.
13. Wang, P.C., Chang, S.J., Nuclear Magnetic Resonance Imaging of Wood, Wood and Fiber Science, 18 (1986) 308-314.
14. Taylor, F.W., Wagner, F.G., McMillin, C.W., Morgan, I.L., Hopkins, F.F., Locating Knots by Industrial Tomography, Forest Products Journal, 34 (5) (1984) 42-46.

15. Wagner, F.G., Taylor, F.W., Ladd,D.S., McMillin, C.W., Roder, F.L.,. Ultrafast CT Scanning of an Oak Log for Internal Defects, *Forest Products Journal*, 39 (11/12) (1989) 62-64.
16. Steele, P.H., Neal, S.C., McDonald, K.A., Cramer, S.M., The Slope-of-grain Indicator for Defect Detection in Unplaned Hardwood Lumber, *Forest Products Journal* 41 (1) (1991) 15-20.
17. Portala, J.F., Ciccotelli, J., NDT Techniques For Evaluating Wood Characteristics, In: *Proceedings, Seventh Symposium on the Nondestructive Testing of Wood*, September 27- 29, 1989, Madison, Wisconsin, pp. 97 - 124.
18. Rhemrev, J., R. Rhemrev, Lemaster, R., Laser Scanning for the Detection of Twist or Warp in Pencil Slats, *Forest Products Journal*, 43 (2) (1993) 29-36.
19. Bond, B.H., Characterization of Wood Features Using Color, Shape, and Density Parameters, PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Wood Science and Forest Products Division, Blacksburg, Virginia, 1998.
20. Huber, H.A., McMillin, C.W., Rasher, A., Economics of Cutting Wood Parts With a Laser Under Optical Image Analyzer Control, *Forest Products Journal*, 32 (3) (1992) 16-21.
21. Boardman, B.E., Senft, J.F., McCabe, G., Ladisch, C.M., Colorimetric Analysis in Grading Black Walnut Veneer, *Wood and Fiber Science*, 24 (1) (1992) 99-107.
22. Forrer, J.B., Butler, D.A., Funck, J.W., Brunner, C.C., Image Sweep-and-mark Algorithms, Part 1, Basic Algorithms, *Forest Products Journal* 38 (11/12) (1988) 75-79.