



Biyokütle Kullanımının Enerji, Çevre, Sağlık ve Ekonomi Açısından Değerlendirilmesi

Eser SÖZEN^{1*}, Gökhan GÜNDÜZ¹, Deniz AYDEMİR¹, Ersin GÜNGÖR²

¹Bartın Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, 74100, Bartın.

²Bartın Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Mühendisliği Bölümü, 74100, Bartın.

Öz

Dünyadaki nüfus artışına bağlı olarak ürün ve hizmetlerin sayısında ve kalitesinde de artışlar görülmektedir. Bu artışlarla birlikte enerjiye duyulan ihtiyaç da fazlalaşmıştır. Birçok ülkenin kısa ve uzun vadede enerji politikaları uygulaması ve farklı enerji kaynaklarına yatırım yapması akademik ve ticari alanlara da ivme kazandırmıştır. Enerji kaynağı olarak kullanılan kömür, petrol ve doğalgazın belirli alanlarda bulunması, nükleer, hidroelektrik ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi artırmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları içinde yer alan biyokütle, geniş bir ürün yelpazesine sahiptir. Odunsu materyaller ve endüstriyel atıkların yanında servis ömrünü tamamlamış ahşap bazlı ürün ve yapılar da önemli biyokütle kaynaklarıdır. Bu kaynakların pelet veya kömüre dönüştürülmesi veya doğrudan yakılması, çevreye ve insan sağlığına zararlı gazların salınımı sorununu ortaya çıkarmıştır. Enerji kaynağı olarak kullanılacak biyoyakıtın kimyasal içeriği ve işlem görmüş olması bu gazların çeşitliliği ve miktarında etkili olmaktadır. Bu çalışmada, biyoyakıtların enerji kaynağı olarak kullanılması ve ekonomiye katkıları incelenmiştir. Ayrıca, yakılması sonucu ortaya çıkan duman ve gazların çevre ve sağlık açısından değerlendirilmesi yapılarak bu alanda yapılacak çalışmalar için literatür oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Biyokütle, Biyoyakıt, Uçucu organik bileşikler, Duman analizi.

Evaluation of Biomass Use In Terms of Energy, Environment, Health and Economy

Abstract

There is also an increase in the number and quality of products and services depend on population growth in the world. These increases, naturally, have further increased the importance of energy. The implementations of energy policies in the short and long term of many countries and investment in different energy sources have accelerated academic and commercial areas. Coal, petroleum and natural gas having in certain areas have increased orientation to nuclear, hydroelectric and renewable energy sources. Biomass which is renewable energy sources has a wide range of products. Wooden materials and industrial wastes, wood-based products and constructions that have completed their service life are also important biomass resources. The conversion of these sources into pellets or coal mines or direct burning bring about the problem of the release of harmful gases to the environment and human health. The chemical content and processing of biofuel which is used as an energy source have affected diversity and quantity of these gases. In this study, the use of biofuels as a source of energy and its contribution to the economy was examined. In addition, contribution has been made to the literature in this area by evaluating the smoke and gases arising as a result of burning biofuels in terms of health and environment.

Keywords: Biomass, Biofuels, Volatile organic compounds, Smoke analysis.

***Sorumlu Yazar (Corresponding Author):**

Eser SÖZEN; Bartın Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, 74100, Bartın. E-mail: esozen@bartin.edu.tr

Geliş (Received) : 22.03.2017

Kabul (Accepted) : 07.04.2017

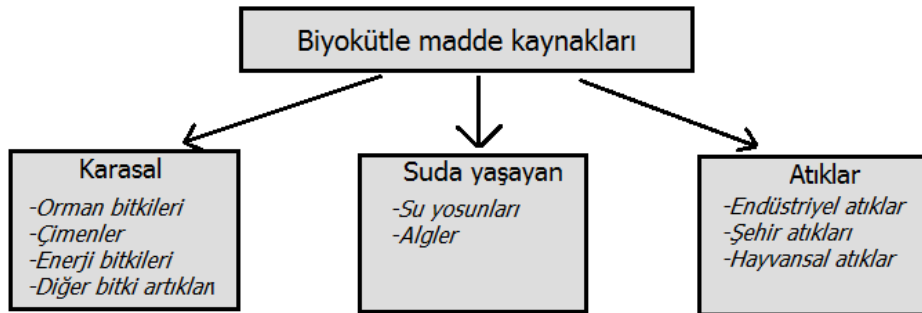
Basım (Published) : 01.06.2017

1. Giriş

İnsanoğlunun sürekli yenilik arayışı, hızla gelişen sanayi ve teknoloji ile birlikte her alanda olduğu gibi enerji sektörünü de etkilemektedir. Dünyada enerji gereksinimi, üretim giderlerinin etkin kullanımıyla ve çevre bilinci oluşturularak karşılanmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının ekonomik, çevre dostu ve sürdürülebilir olması enerji üretimi için önemli bir potansiyeldir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan biyokütle; petrole, doğalgaza ve kömüre olan bağımlılığımızı azaltarak alternatif bir yakıt olmasıyla karşımıza çıkmaktadır (Gürdil vd., 2015). Ahşap, farklı şekillerde gezegenimizdeki yaşam biçimlerinin sürdürülmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle yiyeceklerin pişirilmesi, binaların ısıtılması ve endüstride güç kaynağı olarak yıllardır kullanılmaktadır. Endüstri devriminden sonra kömür, petrol ve gaz gibi fosil yakıtların önemi artmış ve bu fosil yakıtlar odundan daha fazla tüketilmeye başlanmıştır. Ancak, atmosferdeki sera gazlarının özellikle de CO₂ gazının artmasıyla enerji üretimi için biyokütle ve odun kullanımının önemi artmaya başlamıştır. Odun, enerji üretmek için yakıldığında atmosfere CO₂ yayar. Fakat bu CO₂, fotosentez sırasında geri kazanılır. Bu yüzden odun nötr ve yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Ayrıca, enerji üretiminde fosil yakıtların yerine odunun kullanılması atmosferdeki CO₂ miktarını %90'dan fazla düşüreceklerdir (De Jong vd., 2003, Müller-Hagedorn vd., 2003). Sürdürülebilir ve temiz bir çevre için, bu yakıtların kullanımı artırılmalıdır (Winter vd., 1999). Odun, elektrik ve telefon direkleri, ahşap bazlı paneller, mobilya ve yapı malzemesinin yanında yakıt olarak da kullanılmaktadır. Atık odunların büyük bir kısmını ise panellerin üretimi esnasında ortaya çıkan atıklar ve servis ömrünü tamamlayan ahşap bazlı ürünler oluşturmaktadır. Bu nedenle "atık odun" terimini sadece endüstriyel odun atıklarını değil kullanılan orman ürünlerini de kapsamaktadır. Odun atıkları, üretimde kullanılan yöntemlere bağlı olarak değişik türde kirleticiler içerebilir. Bu yüzden odun atıklarının uygun metot ve teknolojilerle yok edilmesi oldukça önemli bir konudur. Ocaklarda, kazanlarda ve endüstriyel işlemlerle odunun yakılması sırasında odunun yapısı ve kinetiği (devinimi) önemli bir yer tutmaktadır (Müller-Hagedorn vd., 2003; Ragland vd., 1991). Lignoselülozik materyallerin termal bozunması, ısı ve kütle transferi işlemleri ile bir dizi karmaşık kimyasal tepkimeyle gerçekleşir. Katı biyoyakıtların enerji değerleri, devinimleri ve ortaya çıkan gazlarla ilgili çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmada, katı biyoyakıtların enerji üretiminde kullanımı, ekonomiye olan katkıları ve yakıldıkları zaman ortaya çıkan duman ve zararlı maddelerin çevre ve sağlığa etkileri incelenerek bu alanda yapılacak çalışmalar için literatür oluşturulmuştur.

2. Biyokütle

Biyokütle; biyolojik kökenli, fosil olmayan organik madde kütesidir. Biyokütlenin kimyasal içeriğinde karbonun yanı sıra hidrojen (H), oksijen (O), azot (N) ve daha küçük oranlarda alkali, alkali toprak ve ağır metaller içeren atomlar vardır. Ana bileşenleri, karbonhidrat bileşikler olan bitkisel veya hayvansal kökenli tüm doğal maddeler biyokütle enerji kaynağı, bu kaynaklardan elde edilen enerji ise, biyokütle enerjisi olarak tanımlanır. Diğer bir ifadeyle, yüzyıllık dönemden daha kısa sürede yenilenebilen, karada ve suda yetişen bitkiler, hayvan artıkları, besin endüstrisi ve orman ürünleri ile kentsel atıkları içeren tüm organik maddeler biyokütle olarak tanımlanabilir (Oberberger ve Thek 2004, Kumar vd., 2009). Biyokütle madde kaynakları çok çeşitli olmakla beraber genel anlamda karasal, su kaynaklı ve atıklar olmak üzere üç farklı kategoride sınıflandırılabilirler. Şekil 1'de biyokütle hammaddelerinin sınıflandırılması gösterilmiştir.

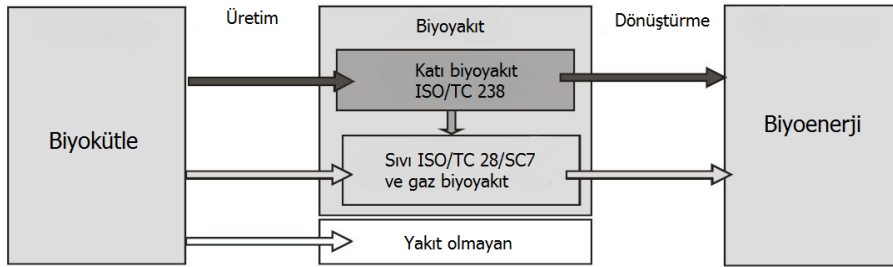


Şekil 1. Biyokütle madde kaynaklarının sınıflandırılması (Ültanır, 1996).

2.1. Katı Biyoyakıtların Enerji Kaynağı Olarak Kullanılabilirliği

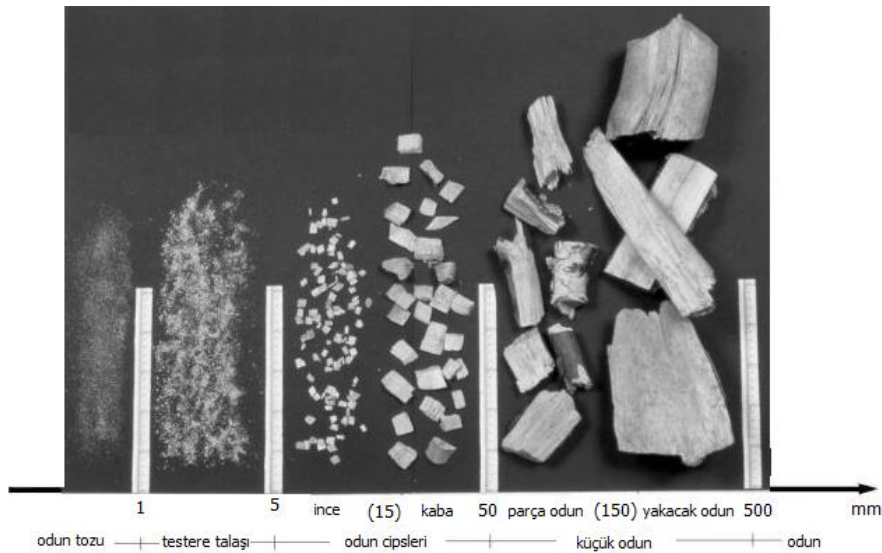
Biyokütleden katı, sıvı ve gaz olarak biyoenerji üretilebilmektedir. Bu yakıtların sınıflandırılması ISO/TC (International Organization for Standardization/Technical Committee) tarafından yapılmıştır. Katı biyoyakıtlar ISO/TC 238 ile tanımlanırken, sıvı biyoyakıtlar ISO/TC 28/SC7'de tanımlanmıştır. Ülkemizde ise katı

biyoyakıtlar, yakıt özellikleri ve sınıfları TS EN ISO 17225-1 standartlarına göre değerlendirilmektedir. Şekil 2’de ISO TC 238’e göre biyokütle, biyoyakıt ve biyoenerji arasındaki etkileşim gösterilmiştir. Biyokütle her ne kadar enerji üretimi için kullanılsa da, ham materyal olarak konstrüksiyon, mobilya, paketlenme ve kağıt endüstrisinde kullanılmaktadır.



Şekil 2. Biyokütle, biyoyakıt ve biyoenerji arasındaki etkileşim (ISO/TC 238)

Biyokütle, biyoyakıt ve biyoenerji kavramları çok geniş ve birbiriyle etkileşim halinde olan kavramlardır. Lignoselülozik materyaller ve endüstriyel atıklar biyokütle kaynakları içerisinde büyük bir öneme sahiptir (White ve Plasskett, 1981). Ahşap panel endüstrisi atıkları, kereste talaşları ve servis ömrünü tamamlamış ahşap elektrik direkleri ve mobilyaların ilgili fabrikalarda veya enerji sektöründe kullanımı yakıt olarak karşımıza çıkmaktadır. Lignoselülozik materyallerin boyutlarının sınıflandırılması, işlem görmüş (emprenyeli materyaller, tutkallı materyaller vb.) veya işlem görmemiş olması katı yakıt olarak kullanımında önemli bir yer tutmaktadır. Yonga levha ve MDF (Medium Density Fiberboard) gibi odun bazlı panellerin mobilya, dekorasyon ve değişik yapı elemanları olarak kullanımı artmaktadır. Türkiye, 2012 yılında 28 yonga levha üretim hattı ve 5.771.100 m³ üretim ile Avrupa'nın en büyük ahşap panel üreticisidir (Yıldırım vd., 2013, Anonim, 2013). Yonga levha ve lif levhalar son kullanım yerinde mekanik özelliklerinin artırılması, rutubet ve su alma özelliklerinin iyileştirilmesi için dekor kağıtları ile kaplanmaktadır (Enzensberger, 1961). Enerji kaynağı olarak kullanılacak biyokütlelerin yapısı yanma senaryolarına ve buna bağlı olarak ısı, kütle ve gaz oranlarında da değişikliklere neden olmaktadır (Kozinski ve Saade, 1998). Enerji kaynağı olarak yakılan maddelerin içeriği ve boyutları yanma sırasında açığa çıkan enerji, partikül ve salınan gazların çeşitliliğini etkilemektedir (Kozinski ve Saade, 1998; Reina vd., 1998; Yorulmaz ve Atımtay, 2009). Şekil 3'te odun hammaddesinin boyutlarına göre sınıflandırılması gösterilmiştir.



Şekil 3. Parçacık boyutuna göre odun yakıtlarının sınıflandırılması (Kaynak: Jan Erik Mattsson, Swedish University of Agricultural Sciences).

Katı yakıt ve atık odunların (lignoselülozik materyallerin) tutuşma, enerji ve gaz salınımı özelliklerinin incelendiği çalışmalarda farklı sonuçların elde edildiği görülmektedir. Kullanılan deneysel yöntem, çalışma koşulları, verilerin analizi gibi faktörlerin yanında her çalışmada kullanılan materyalin kimyasal içeriği de bu farklılıkların oluşmasına neden olabilmektedir (Reina vd., 1998). Tablo 1’de farklı biyokütle kaynakları ve atık odunlarla yapılan bazı çalışmalara ait sonuçlar sunulmuştur.

Tablo 1. Farklı biyokütle ve atık odun kaynaklarının karakteristik özellikleri.

Kaynak	Biyokütle kaynağı	Ortalama Analiz (ağırlığa oranla %)				Ametaller (%)					Kalorifik Değer (Mj/kg)
		Rutubet	Sabit karbon	Uçucu madde	Kül	C	H	N	O	S	
Reina vd., 1998	Masif odun	7,38	17,64	72,98	2,00	46,16	5,77	0,80	37,87	-	-
	Mobilya	3,79	17,55	77,46	1,20	44,59	6,32	1,57	42,83	-	-
	Pelet	2,59	15,03	79,98	2,40	45,37	5,69	0,07	43,88	-	-
(Kozłński ve Saade, 1998)	Kağıt fabrikası atıkları	5,0	6,2	73,06	15,2	45,5	5,7	0,4	33,2	-	-
	Çam odunu	5,1	10,1	82,2	2,6	53,5	7,4	0,1	40,6	-	-
	Yonga levha	4,5	20,4	69,9	4,0	48,3	6,0	2,3	39,5	-	-
Yorulmaz ve Atımtay, 2009	Çam	-	11,29	88,02	0,62	53,28	6,35	0,16	40,21	-	19,72
	MDF	-	11,06	86,68	2,29	49,57	6,33	4,44	39,66	-	19,31
	Yonga levha	-	14,38	83,82	1,22	46,26	5,83	2,36	45,51	0,04	17,51
Reisen vd., 2014	Kontrplak	-	13,40	85,79	0,80	47,12	5,92	1,19	45,72	0,05	18,64
	Monteri çamı (<i>Pinus radiata</i>)	-	-	-	-	53	6	-	41	0,01	-
	Boyalı çam*	-	-	-	-	51	6	40	0,01	0,01	-
	Yonga levha	-	-	-	-	50	6	41	2,6	0,04	-
	Yonga levha (melamin kaplı)	-	-	-	-	50	6	41	2,6	0,03	-
	MDF	-	-	-	-	50	6	40	3,8	0,01	-
Johansson vd., 2004	Odun peleti	7,6	-	-	0,5	50,2	5,9	0,08	43,2	<0,01	19,0
	Kabuk peleti	7,8	-	-	3,7	52,1	5,9	0,48	37,8	0,03	20,1
	Odun briketi	7,5	-	-	0,3	50,6	6,4	0,05	42,7	<0,01	18,9
	Çam cipsleri	4,0	14,6	81,3	0,1	52,0	6,2	0,12	41,59	0,08	20,23
Williams vd., 2012	Söğüt	6,96	16,31	75,70	1,03	51,62	5,54	0,38	42,42	0,03	18,68
	Zeytin atıkları	6,40	19,27	65,13	9,20	54,42	6,82	1,40	37,29	0,05	19,67
	Lignin	9,0	1,5	73,5	16	72,0	6,6	0	21,34	0	25
Gündüz vd., 2016	Selüloz	4,1	0,2	94	1,7	44,4	6,17	0	49,3	0	18,6
	Orman gülü (pelet)	6,33	-	79,85	1,08	53,37	4,89	0,27	33,89	0,04	19,8
	Defne (pelet)	6	-	78,52	1,4	51,15	4,94	0,32	35,12	0,06	18,5
	Kestane (pelet)	6,08	-	78,79	1,37	49,45	4,60	0,34	38,08	0,07	18

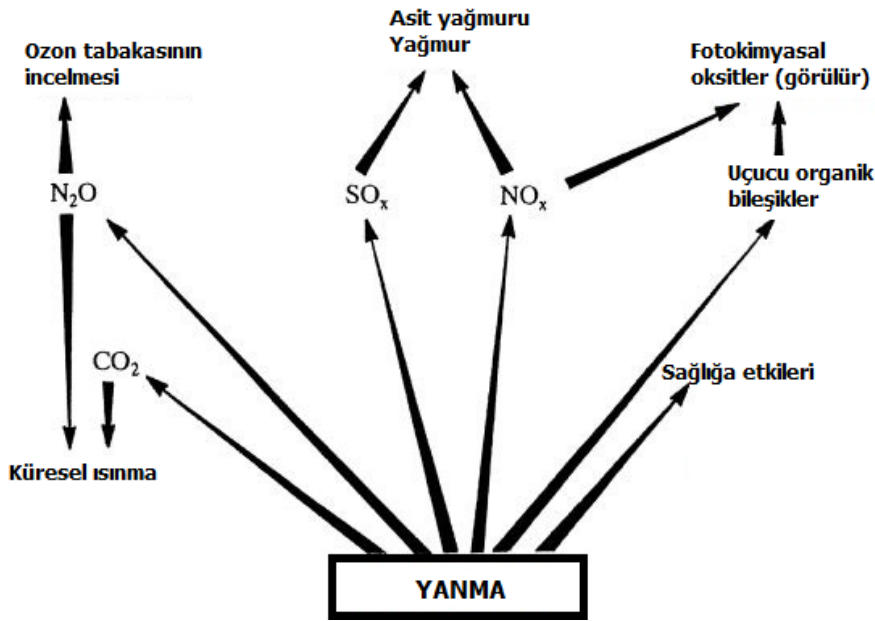
(*) % 100 akrilik, kendinden emilebilen, dış ortamlar için beyaz boya.

(-) Yapılan çalışmada ilgili değer belirlenmemiştir.

2.2. Katı Biyoyakıtların Yanması ve Oluşan Gazlar

Karasal atıklar ve endüstriyel atıkların değerlendirilmesiyle ilgili birçok bilimsel çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda özellikle lignoselülozik materyallerin çimento, polimer veya farklı kimyasallarla kullanılarak ekonomik, çevreye duyarlı, son kullanım yerinde maruz kalabileceği yükler için ilgili standartları sağlayabilen levha, yalıtım malzemesi gibi ürünler üretilmiştir (Wang vd., 2016; Shang vd., 2015; Sommerhuber vd., 2016). Ancak, yapılan çalışmaların endüstriye aktarılması henüz istenilen düzeylere ulaşmamıştır. Bu nedenle, katı yakıtların fabrikaların kendi içinde veya farklı işletmelerde enerji kaynağı olarak yakılması çok sık rastlanılan bir durumdur. Biyokütlelerin yakılmasında sıcaklığın 126°C'den az ($T < 126^\circ\text{C}$) olduğu ilk fazda materyalin neminin dönüşümü, ikinci fazda (126°C-426°C) CO ve hafif hidrokarbonların (CH_4 vb.) salınımı, üçüncü fazda (426°C-676°C) kimyasal bağlı CO_2 ve kimyasal olarak meydana gelen H_2O oluşumu gerçekleşir. Biyokütle gazlarında çok az bulunan benzen ve katranın oluşumu, bu fazın yüksek sıcaklıklarında görülür. Son fazda (676°C- 976°C) ise, karbon oksitleri, katranlar ve hidrokarbonlu gazlar (ağır hidrokarbonlar fluoren, fenantren, flüoranten ve benzo(a)piren vb.) tespit edilmektedir (Kozinski ve Zheng, 1998). 426°C'nin altında ve 876°C üstündeki sıcaklıklarda ise kısa süreli sarı-mavi alev ile birlikte duman oluşumları gözlemlenmektedir (Kozinski ve Saade 1998).

Lignoselülozik materyallerin termal bozunması, ısı ve kütle transferi işlemleri ile bir dizi karmaşık kimyasal tepkimeyle gerçekleşir. Yanma olayı C, H, N ve S bileşenli gazların yanında poliklorlu bifeniller (PCB), poliklorlu dibenzo-*p*-dioksinler (PCDD) ve poliklorlu dibenzofuranlar (PCDF) gibi klorlu türler de dahil olmak üzere yanmasını tamamlanmamış birçok uçucu organik bileşiklerin (volatile organic compounds, VOC) oluşumunu içerir (Stanmore, 2004). Şekil 4'te yanma sırasında ortaya çıkan kirletici emisyonlar ve etkileri gösterilmiştir.



Şekil 4. Yanma sırasında ortaya çıkan kirletici emisyonlar ve etkileri (Beér, 2000).

Dioksin, 75 poliklorlu dibenzo-*p*-dioksin (PCDD) ve 135 poliklorlu dibenzofuran (PCDF)'den oluşan kimyasal bileşik grubunun genel adıdır. Dioksinler yapısal olarak birbirine çok benzemekle birlikte tek farkları molekül içindeki klor atomlarının sayıları ve yerleridir. Bu bileşikler atmosferde is olarak (eser miktarda) bulunur ve bu izomerlerden 17'si yüksek derecede zehirli, mutajenik ve insanın bağışıklık sistemini zayıflatma etkilerine sahiptir. Emisyonun olduğu yerden uzak mesafelere taşınabilir ve kalıcı organik kirleticiler (persistent organic pollutants, POPs) arasında yer alırlar (Lavric vd., 2004). PCDD/PCDF bileşiklerinin karbon ve klor yokluğunda odunun yanması sırasında lignin ve fenol gibi öncü maddeler ile yeni başlayan reaksiyonlarla oluştuğu bilinmektedir. Çökeltelerde ve topraktaki organik maddelere bağlanabildikleri gibi canlı organizmaların yağlı dokularında birikim yapmaya da eğilimlidirler. Yarılanma süreleri insanda 7 yıldır (Salthamme vd., 1995).

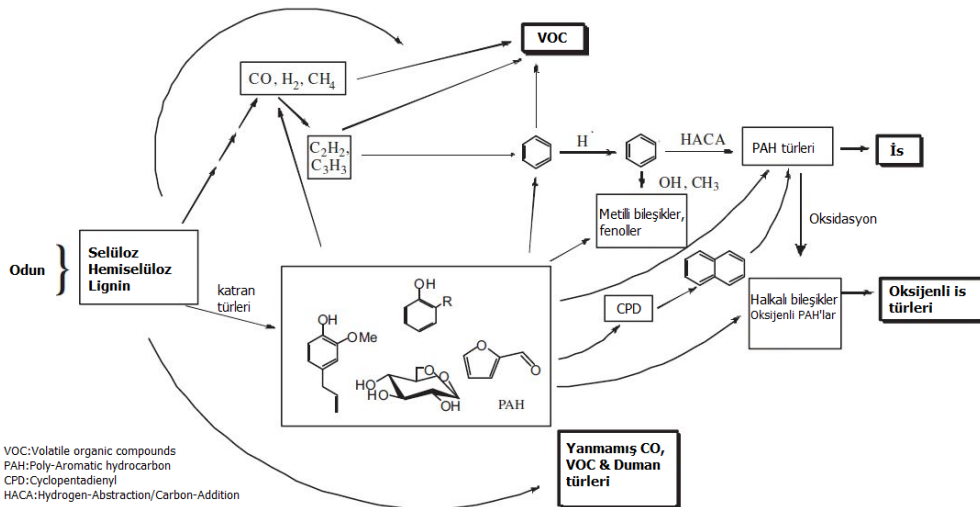
Katı biyoyakıtların yanması sonucu oluşan gazların oluşması iki farklı sıcaklık değerleri arasında gerçekleşmektedir. Bu sıcaklık değerleri 500 °C ile 800 °C arasında "homojen" olarak bulunurken, 200 °C ile 400

°C arasında “heterojen” olarak bu gazlar oluşabilmektedir. Gaz fazında klorofenoller ve klorobenzenler gibi klorlu bileşiklerin pirolitik olarak meydana geldiği homojen reaksiyonlar, kapsamlı olarak araştırılmamıştır. Heterojen oluşum, yanma sistemlerinde bulunan kül veya kurum partikülleri üzerinde gerçekleşen katalizör reaksiyonlarıdır ve çalışmalar bunlar üzerinde yoğunlaşmıştır (Stanmore, 2004). Homojen ve heterojen olarak ortaya çıkan gaz reaksiyonlarını açıklamak için literatürde birkaç mekanizma üzerinde durulmuştur (Antal ve Varhegyi, 1995). Bu mekanizmaların en önemlileri selüloz ve ligninin termal bozunmasıdır. Ancak, biyokütle veya atık odun pirolizi söz konusu olduğunda bu mekanizma daha karmaşık bir hal almaktadır. lignoselülozik materyallerin tamamının piroliz olması ve aktivasyon enerjisinde önemli farkların görülmesi en belirgin farklılıkları oluşturmaktadır (Antal vd., 1980; Roberts, 1970).

Uçucu organik bileşikler (volatile organic compounds, VOC) normal şartlar altında (20 °C sıcaklık ve 101,325 kPa basınç) 10,3 Pa'dan yüksek basınca sahip hidrokarbonlar ve ilgili bileşiklerdir (Li vd., 2009; Ojala vd., 2011; Olsen ve Nielsen, 2001). Yanmamış petrol türevli ürünlerden ya da organik materyallerin yanması sırasında ortaya çıkabilirler (Kesselmeier, 1999; Kansal, 2009). Uçucu organik bileşikler (UOB) kronik ve şiddetli sağlık sorunlarına yol açtığı için endişelere sebep olmaktadır (Otto vd., 1992; Bardana ve Montanaro, 1997). UOB çevre ve insan sağlığını etkilediği için bu alanda yapılan çalışmalar çok önemlidir (WHO, 2000). Benzen gibi bazı UOB türleri kanserojen (Boffetta vd., 1998) ve zehirli olmakla birlikte lösemi hastalığına da neden olmaktadır (Tsai, 2016). Birçok epidemiyolojik çalışmada bu gazların düşük seviyelerde de olsa vücutta tahrişe neden olduğu görülmektedir. Ayrıca, troposferdeki ozon ve sis oluşumunda yer alarak yerel hava kalitesini ve küresel iklimi etkilerler (Atkinson, 2000).

2.2.1. Uçucu Organik Bileşiklerin Belirlenmesi

Bir bileşiğin reaksiyon halindeki ve reaksiyon sonundaki durumunu anlayabilmenin yolu, o bileşiğin ayrıntılı bilgisi ile başlar. Hava numunelerindeki organik bileşiklerin analizi çoğunlukla gaz kromatografisi (Gas Chromatography, GC) ile birlikte alev iyonlaştırma (Flame Ionization Detector, FID), elektron yakalama (Electron Capture Detector, ECD) veya kütle spektrometresi (Mass Spectrometry, MS) gibi çeşitli detektörler kullanılarak yapılmaktadır. Kullanılacak yöntemlere göre aktif ve pasif örnekleme yöntemi kullanılır. Aktif örnekleme yapılacak testin belirli zamanda bitmesi istendiği durumlarda kullanılırken, pasif örneklemede testler uzun süre gözlemlenmektedir. Örnek alma işlemlerinde vakumlanmış teneke kutular veya teflon çantalar kullanıldığı gibi, uçucu organik bileşikleri emici (sorbent) özelliği olan katı tüpler de kullanılmaktadır. Emici tüplerin düşük maliyeti ve kolay taşınma gibi avantajlarının yanında, tüp seçimine bağlı olarak gaz konsantrasyonunun artırılması ve gaz aralıklarının belirlenmesi de sağlanabilmektedir. GC-MS analizinde kullanılan emici tüpler çoğunlukla termal desorpsiyon (TD) ile entegre edilerek numunenin tüpten analitik cihaza aktarılması için kullanılır. Uçucu organik bileşiklerin karakteristik özelliklerinin belirlenmesinde TD-GC-MS analizleri geniş çaplı olarak kullanılmaktadır (von Eckstaedt vd., 2012). Metal ve yarı metal elementler için ise genellikle ICP (Inductively Coupled Plasma) cihazı MS (Mass Spectrometry) ile entegre (ICP-MS) olarak kullanılmaktadır. (Feldmann ve vd., 1994). ICP-MS bir ayırıştırma tekniği olarak gaz kromatografisi ile kullanılmaz (Hill vd., 1992). Şekil 5'te odun biyokütlesinin yanması sırasında oluşan duman ve yanmamış uçucu maddeler gösterilmiştir.



Şekil 5. Odunun yanması sırasında oluşan duman ve yanmamış uçucu maddeler (Fitzpatrick vd., 2008).

Koziński ve Saade (1998) kâğıt fabrikası atıkları, çam odunu ve yonga levha atıklarının biyoyakıt olarak kullanımını incelediği çalışmada, yanma sırasında bu materyallerden açığa çıkan ağır hidrokarbonları ve isleri GC-MS ve FTIR analizleri ile belirlemiştir. Reina vd. (1998), odun, servis ömrünü tamamlamış mobilya ve odun peletinin karakteristik özelliklerini Termo Gravimetrik Analiz (TGA) ile belirlemiştir. Çalışmada ana degradasyonun ve pirolizin olduğu (225 °C ve 325 °C) sıcaklıklar ve kalan kütle pirolizinin olduğu (700 °C ve 900 °C) sıcaklıklar arasında elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır. Yorulmaz ve Atımtay (2009) işlem görmüş (yonga levha, MDF, kontrplak) ve işlem görmemiş odunların karakteristik özelliklerini ve kalorifik değerlerini TGA ve DTA (Diferensiyel Termal Analiz) kullanarak belirlemiştir. Reisen vd. (2014) yapı sektöründe ve üst yüzey işlemlerinde yaygın olarak kullanılan materyallerin tutuşma, uçucu organik bileşiklerin salınımı ve partikül madde (PM_{2,5}) özelliklerini konik kalorimetre (cone calorimeter) kullanarak belirlemiştir. UOB'nin tespiti için sorbent tüplerle gaz kromatografisi, partikül madde için filtreler kullanmışlardır.

UOB'nin yok edilmesi için bileşikler karbon dioksit ve suya dönüştürülür. Yok etme işlemi termal, katalitik veya biyolojik oksidasyon şeklinde olabilir. Termal oksidasyon veya termal yakma, yüksek akış hızı ve yüksek konsantrasyonda UOB içeren baca gazı akışlarından UOB'nin çıkarılması için uygundur. UOB'nin %99'dan fazlası ilave yakıt ve sıcaklığa dayanıklı materyal gerektiren yüksek sıcaklıklarda (>1000 °C) termal oksidasyon ile yanabilmektedir. Tamamlanmamış termal yanma, baca gazında dioksinler ve karbon monoksit gibi istenmeyen ürünlerin oluşmasına neden olur. UOB'lerin maksimum konsantrasyonu, herhangi bir patlamadan kaçınmak için belirli bir bileşiğin düşük patlama limitinden daha düşük olmalıdır (Moretti, 2002). Uygulamada, çevre havası ile seyreltilerek elde edilebilen, düşük patlama limitinin maksimum % 25'lik konsantrasyonu kullanılır (Kamal vd., 2016).

Duman, karbonlu kurum, organik ve inorganik sulu aerosoller, CO, UOB ve PAH gibi birçok bileşenden oluşur. Ayrıca sıcak gaz ve buharlar içine sürüklenerek parçalanarak yakıt (yanmamış yakıt / karbon) parçacıklarını da içerir. Karbonlu is, aerosol, CO, UOB ve PAH'ların oluşumlarına ait modelleme yaklaşımları vardır. Fakat reaksiyon anında önemli bir bileşen içeren yakıt/kömür yanmamış olabilir. Bu yüzden gazların yanma reaksiyonlarına uygun modellemelerin yapılması çok zordur. İş, biyokütlenin yakılması sırasında ve isin derecesi ve doğasına bağlı olarak alev sonrası sıcaklık-zaman şartlarının bir fonksiyonudur. Biyokütlenin yakılması sırasında buhar ve katran salınımları ile bileşenlerin hem pirolizi hem de oksidatif pirolizi oluşur (Williams vd., 2012). ABD Çevre Koruma Ajansı (United States Environmental Protection Agency, US EPA) tarafından belirlenen odun dumanının kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir.

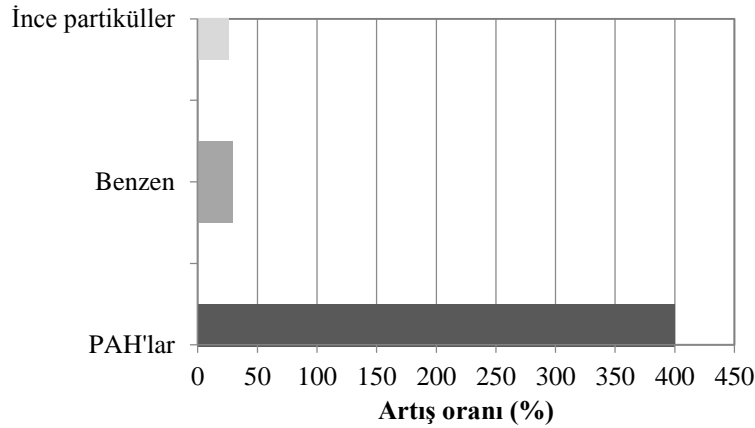
Tablo 1. Odun dumanının kimyasal bileşimi (Timothy ve Jane, 1993)

Kimyasal	g/kg Odun	Kimyasal	g/kg Odun
Karbon monoksit	80-370	Kurşun	1x10 ⁻⁴ -3x10 ⁻³
Metan	14-25	Klorlu dioksinler	1x10 ⁻⁵ -4x10 ⁻⁵
Uçucu organik bileşikler (C2-C7)	7-27	Normal alkanlar (C24-C30)	1x10 ⁻³ -6x10 ⁻³
Aldehitler	0,6-5,4	Sodyum	3x10 ⁻³ -2,8x10 ⁻²
Ayrıştırılan furanlar	0,15-1,7	Magnezyum	2x10 ⁻⁴ -3x10 ⁻³
Benzen	0,6-4,0	Alüminyum	1x10 ⁻⁴ -2,4x10 ⁻²
Alkil benzenler	1-6	Silisyum	3x10 ⁻⁴ -3,1x10 ⁻²
Asetik asit	1,8-2,4	Kükürt	1x10 ⁻³ -2,9x10 ⁻²
Formik asit	0,06-0,08	Klor	7x10 ⁻⁴ -2,1x10 ⁻²
Azot oksit	0,2-0,9	Potasyum	3x10 ⁻³ -8,6x10 ⁻²
Kükürt dioksit	0,16-0,24	Kalsiyum	9x10 ⁻⁴ -1,8x10 ⁻²
Metil klorür	0,01-0,04	Titanyum	4x10 ⁻⁵ -3x10 ⁻³
Naftalin	0,24-1,6	Vanadyum	2x10 ⁻⁵ -4x10 ⁻³
Ayrıştırılan naftalinler	0,3-2,1	Krom	2x10 ⁻⁵ -3x10 ⁻³
Oksijenli monoaromatikler	1-7	Manganez	7x10 ⁻⁵ -4x10 ⁻³
Toplam partikül ağırlığı	7-30	Demir	3x10 ⁻⁴ -5x10 ⁻³
Organik karbon parçacıkları	2-20	Nikel	1x10 ⁻⁶ -1x10 ⁻³
Oksijenli polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH'lar)	0,15-1	Polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH'lar)	10 ⁻⁵ -10 ⁻²
Bakır	2x10 ⁻⁴ -9x10 ⁻⁴	Brom	7x10 ⁻⁵ -9x10 ⁻⁴
Çinko	7x10 ⁻⁴ -8x10 ⁻³		

UOB'lerin yakılması, farklı uçucu bileşiklerin, katran, polisiklik aromatik hidrokarbonlar (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAH), kurumun potansiyel emisyonu ve oluşumu için önemli bir adımdır. Biyokütleden türetilen gazlar, katranlar ve kömürlerin karakterlerinin bileşimi ısıtma hızına, nihai sıcaklığa ve mineral (özellikle potasyum) içeriğine bağlıdır. N, Cl, P gibi metallerin gaz, katran ve kömür arasındaki dağılımı, sonraki reaksiyonların ve kirletici maddelerin oluşumu ile ilgili olduğu için önemlidir. Kömür artıklarının aksine, üretilen biyo-kömürler, son sıcaklık anında önemli miktarda oksijen içerir. Piroliz şartlarında sıcaklığın artması oksijen miktarını düşürür (Williams ve Horne, 1996; Klass, 1998). Selüloz, diğer küçük moleküller ile birlikte CO ve H₂'ye büyük oranda ayrışır. Lignin ise daha karmaşık aromatik ürünler haline dönüşür. Odunun yanması için öjenol ve furfural bileşikler kullanılarak dumanın önceden oluşum mekanizması araştırılmış (Wilson vd. 2013) ve selüloz bileşiklerinin hidrojen çıkarma/karbon ekleme (hydrogen abstraction/carbon addition, HACA) yoluyla duman oluşturabileceği ve lignin ürünlerinin aromatik duman oluşturduğu belirlenmiştir (Lea-Langton vd., 2015).

2.3. Biyokütle Kullanımının Sağlık Açısından Değerlendirilmesi

Isınma, enerji üretimi ve pişirme gibi işlemlerde biyokütlenin yakılması en genel yöntemdir. İnsanların birçoğu günlük yaşamında hala odun, hayvan gübresi, yıllık bitki artıkları ve kömür gibi enerji kaynaklarını kullanmaktadır (Reddy vd., 1996). Biyokütlelerin enerji üretiminde kullanımında sağlık, çevre ve güvenlikle ilgili sorunlara neden olmaktadır (Amann ve Lutz, 2000; Finlayson-Pitts ve Pitts, 1997; Lakshmanan vd., 2010; Peng ve Wang, 2007). Odun dumanı, havadaki küçük partiküllerin ve gazların oluşmasında oldukça etkilidir. Odun ile ısıtılan bölgelerde kış aylarında hava ile taşınan partikül konsantrasyonlarının %80'ini bu partiküllerin oluşturabileceği bildirilmiştir (Larson ve Koenig, 1994). Ortamdaki partiküler maddelere maruz kalmak, insan sağlığını negatif olarak etkilemekte, kalp/damar ve akciğer sorunlarına bağlı ölüm oranlarını arttırmaktadır (Ostro vd., 2006; Pope vd., 2002; Pope ve Dockery 2006). Biyokütlenin yakılması sonucu ortaya çıkan partiküllerin yanında oluşan dumanın da sağlığa olumsuz etkilerinin olduğu bildirilmiştir (Boman vd., 2003). Odun kullanılarak ısıtılan evlerde küçük partikül, benzen, PAH'lar (polycyclic aromatic hydrocarbons) ve diğer kimyasalların seviyeleri daha yüksektir. Odun ile ısıtılan evlerle ilgili yapılan çalışmalardan birinde Molnár vd., (2005) odun ile ısıtılan evlerde ince partikül oranının, odun ile ısıtılmayan evlere oranla %26 daha fazla olduğunu, diğer bir çalışmada ise Gustafson vd., (2007) benzen oranlarının %29 daha fazla olduğunu bildirmişlerdir. Gustafson vd., (2008) ise odun ile ısıtılan evlerde kansere neden olan PAH'ların %300 ile %500 arasında (~%400) daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Şekil 6'da odun ile ısıtılan evlerde kirletici madde oranlarındaki artış miktarları ilgili çalışmalardan derlenerek sunulmuştur.



Şekil 6. Odun ile ısıtılan evlerde kirletici madde oranlarındaki artış miktarları.

Solunan ince parçacıkların olumsuz etkileri büyük oranda akciğerde birikme ve tutunma özelliklerine bağlıdır. Parçacıkların birikmesi ise parçacıkların boyut, yoğunluk, şekil ve su tutma kabiliyeti gibi diğer fizikokimyasal özelliklerine bağlıdır (Löndahl vd., 2007). Laboratuvar ortamında (*in vitro*) ve canlı organizmalar (*in vivo*) üzerinde ince ve ultra ince partiküller kullanılarak yapılan çalışmalarda, kütesine oranla daha fazla yüzey alanı sergileyen küçük parçacıkların, aynı malzemenin daha büyük parçacıklarına göre daha etkili olduğu tespit edilmiştir (Brown vd., 2000; Höhr vd., 2002). Ülkemizde 06.06.2008 tarih ve 26898 sayılı Resmî Gazete'de yayınlanan *Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği* ile CO, NO_x, S, PAH, VOC, PM₁₀, PM_{2,5}, benzen ve kirletici maddeler (arsenik, kadmiyum, nikel ve benzo(a)pirenler) limit değer ve uyarı eşiği değerlerine göre denetlenmektedir.

2.4. Biyokütle Kullanımının Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi

Dünya birincil enerji kaynakları içinde biyokütle enerjisi %10 gibi oldukça önemli bir paya sahiptir (ETBK, 2012). Ancak bunun çok büyük bir kısmı klasik anlamda yakacak olarak kullanılmaktadır. Benzer bir durum Türkiye için de geçerlidir. Biyokütle Türkiye birincil enerji kaynakları üretiminde %11, tüketiminde ise % 3,1 orana sahiptir (EÜAŞ, 2012). Türkiye’de bitkisel ve hayvansal kaynaklı biyokütle genellikle ısınma amaçlı kullanılır. Özellikle kırsal kesimlerde evlerin ısıtılmasında bu enerji kaynağı ilk sırada yer almaktadır. Türkiye’de modern anlamdaki biyokütle enerjisinin gelişimi, özellikle 5015 sayılı Petrol Piyasası Kanunu’nda yerli hammaddeden elde edilmek şartıyla biyoyakıtlara ÖTV muafiyeti tanınmasından sonra gelişme göstermiştir (Öğüt, 2007). Türkiye’nin yıllık 117 milyar ton civarında biyokütle potansiyeli bulunmaktadır. Bu değer de yıllık 32 Mtep (milyon ton eşdeğer petrol)’e eşittir (Demirbaş, 2008; Gölçöl vd., 2009). Toplam kullanılabilir biyoenerji potansiyeli ise yaklaşık 17,2 Mtoe olarak tahmin edilmektedir (Saraçoğlu, 2010).

Türkiye coğrafi konumu sayesinde yenilenebilir enerji kaynaklarının çoğunu (güneş, rüzgar, biyokütle, jeotermal, su) yoğun olarak kullanabilme olanaklarına sahiptir. Bu potansiyel ve sınırlı fosil kaynaklarımız nedeniyle, fosil yakıtlardan yenilenebilir kaynaklara aşamalı olarak yönelmek, Türkiye’nin enerji geleceği için önemli bir adımdır (Karayıılmaz vd., 2011). Biyoenerji için Türkiye dışındaki pek çok ülkede enerji ormanları üretimine gidilmektedir. Örneğin ABD’deki birçok fabrika, kendi sahası içinde enerji ormanlarını üretmekte ve bunları kesip yakarak, ısı ve buhar enerjisiyle çalışmasını yürütmektedir. Dünya genelinde biyoenerji kullanımına yönelik birçok ağaç türü bulunmaktadır. Türkiye’de de biyoenerji üretimine konu olan ve ekonomik değeri yüksek yerli ağaç türleri bulunmaktadır. Bu türler arasında akkavak, titrek kavak, kızılbaş, kızılçam, meşe, dişbudak, fıstık çamı, karaçam, sedir ve servi ağaçları öne çıkmaktadır.

Dünya ölçeğinde biyokütle kullanımına yönelik ilk modern enerji ormancılığı projesi 1975 yılında İsveç’te geliştirilmiştir. Prof. Dr. Gustav SİREN tarafından yürütülen “Modern Enerji Ormancılığı Projesi” kapsamında enerji ormancılığına uygun orman alanları ve kullanılmayan tarım alanlarında söğüt, kavak, kızılbaş ve huş türlerinin kullanıldığı 16 bin ha büyüklüğünde enerji ormanları tesis edilmiştir. Hektarda ortalama 18 bin çeliğin kullanıldığı enerji ormanı plantasyonları 3-4-5 yıllık idare süreleri ile işletilmekte, her plantasyonda ortalama altı hasat dönemi sonucu dönüş süresi yaklaşık 25 yıl olmaktadır. Güney ve Orta İsveç’te verimlilik 10-12 ton/yıl-hektar kuru ağırlık (enerji içeriği 4-5 m³ petrole eşdeğerdir) ölçüsünde olup, enerji verimi 15-18:1 oranındadır. Bunun anlamı; her birim enerji girdisine karşılık 15-18 birim enerji üretilmesidir. Hektarda yılda 8 ton ve daha fazla kuru ağırlığın üretildiği plantasyonlarda pozitif ekonomik dönüş sağlanmaktadır. Günümüzde İsveç’in enerji gereksiniminin yaklaşık %18’i orman ve tarım ürünlerinden sağlanmaktadır. (Christersson, 1999)

Ülkemizde bitokütle kullanımına yönelik enerji ormancılığı çalışmaları değerlendirildiğinde, modern proje anlayışının gerisinde kalan, yalnızca bozuk ve verimsiz meşe baltalık ormanlarının verimli duruma getirilmesi amaçlanan klasik enerji ormancılığı projeleri ile Orman Genel Müdürlüğü (OGM), 2009 yılına kadar 620 bin hektar enerji ormanı tesis edebilmiştir. Kapalık derecesi düşük, çalılışmış, ölmekte olan meşeler toprak seviyesine yakın yükseklikten kesilmekte, kütükten ve köklerden sürgün üretilmesi amaçlanmaktadır. 5-10 yıllık idare süreleri sonunda kesilen sürgüler (yaklaşık 500 kg/hektar-yıl) yöre halkı tarafından yakacak olarak kullanılmakta, yapraklar ise kışın hayvanlara yem olarak verilmektedir (Saraçoğlu, 2010). Biyokütle üretimi açısından ülkemizde yetişebilecek yabancı kökenli ağaç türleri arasında okaliptüs, *Populus euramericana*, *Pinus pinaster*, *Acacia cynophilla* gibi türleri saymak mümkündür. Enerji üretimine yönelik olarak, modern biyokütle çalışmaları küçük ölçekli olarak 1993 yıllarından sonra başlamıştır. Bunlara örnek olarak *mischantus* ve tatlı sorgum bitkileri üzerinde yapılan çalışmalar gösterilebilir (Türe, 2001). Bugün var olan ormanların kesilerek odun olarak kullanması yerine söğüt, karakavak, okaliptüs, kavak ve yarı kurak alan bitkisi olarak da adlandırılan yaban enginarı (*Cynara cardunculus* L.) gibi bazı hızlı büyüyen ağaçlar enerji amacıyla yetiştirilmektedir. Bu ağaçlar oldukça değişik iklim ve toprak koşullarında yetişebildiği gibi büyüme hızları da diğer ağaçlara göre 10-20 kat daha fazladır. Günümüzde biyoteknolojik yöntemlerle enerji üretimi için kullanılacak ağaçlarının büyüme hızları daha da arttırılabilir. Bu ağaçlar genelde her 5 yılda bir budanarak yeniden büyümeleri sağlanır ve hasat edilen dallar biyokütle kaynağı olarak kullanılır. Enerji ormanlarından elde edilen ortalama yıllık verim, hektar başına 22 ton dolayında biyokütle olmaktadır (Türe, 2001).

3. Sonuç ve Öneriler

Nüfus, üretim, teknoloji gibi faktörlerin etkileşimi, her zaman dünya tarihi üzerinde etkili olmuştur. Günümüzde de bu etkileşim, enerjiye olan ihtiyacı arttırmıştır. Ülkelerin enerji ihtiyaçları doğrultusunda yapmış oldukları ve yapılacak olan yatırımlar arasında enerji yatırımları önemli yer tutmaktadır. Doğal kaynakların sınırlı oluşu,

nükleer enerjinin risklerinin olması, rüzgâr, güneş, jeotermal ve yenilenebilir enerji kaynaklarının popüleritesini arttırmıştır. Bu durum, özellikle biyokütle kaynaklarının daha etkin kullanılmasını sağlamıştır. Doğrudan enerji üretimi için kullanılan biyokütle (enerji ormancılığı) kaynaklarının yanında, birincil orman ürünleri atıklarının da enerji üretimi için kullanımı oldukça fazladır. Özellikle, farklı biyokütle kaynaklarından üretilen peletler, başta Avrupa ve Kuzey Amerika olmak üzere birçok ülkede ısınma için kullanılmakta ve sürekli büyüyen bir pazar oluşturmaktadır. Saraçoğlu ve Gündüz (2009), Avrupa’da pelet üretim ve tüketimine dikkat çekerek bu sektör ile ilgili bir SWOT analizi gerçekleştirmişlerdir.

Biyokütle kullanımının ekonomik anlamda değerlendirilmesi neticesinde, biyoenerji üretimine yönelik birçok ülkede modern anlamda enerji ormanlarının kurulduğu anlaşılmaktadır. Bu ormanların kurulması aşamasında enerji üretim değeri yüksek türlerle öncelik verildiği ve belirlenen optimal idare süreleri doğrultusunda birim alandan en yüksek fayda sağlandığı anlaşılmaktadır. Ülkemizde biyoenerji üretimine yönelik çalışmalar incelendiğinde ise enerji ormancılığına yönelik atılan adımların yetersiz kaldığı ve yalnızca bozuk baltalıklardan düşük verim düzeylerinde yararlanılabildiği söylenebilir. Dahası bu ormanlardan elde edilen ürün de çoğunlukla işlenmemiş yakacak odun niteliğinde olup ekseriyetle evsel enerji tüketimine yönelik kullanılmaktadır. Özetle ülkemizde uygulanan klasik enerji ormancılığı uygulamalarının ülke ekonomisine katkısının, gerçek potansiyelinin oldukça altında kaldığı ve bu nedenle daha fazla modern enerji ormancılığı uygulamalarının hayata geçirilmesi gerektiği ifade edilebilir.

Geri dönüşümün önem kazandığı günümüzde, servis ömrünü tamamlamış, biyokütle potansiyeline sahip (ahşap elektrik direği, mobilya, eski ahşap yapılar, ahşap palet vb.) ürünlerin ekonomiye kazandırılması genellikle yakılarak enerji üretimi için kullanılmaktadır. Bu ürünlerin farklı kimyasallarla işlem görmüş olması, yanma sırasında farklı uçucu bileşiklerin oluşmasına neden olmaktadır. Düşük oranlarda bile kanserojen etkileri olan bu bileşiklere (PAH’lar) uzun süre maruz kalınması sağlık açısından olumsuzluklara neden olmaktadır. Bu yüzden yakıt olarak kullanılacak biyokütle kaynaklarının uygun yakma sistemleri (baca, baca filtreleri, sıcaklık, partikül madde tutucuları) bulunan sistemlerde yakılması, periyodik baca gazı analizlerin yapılması, partikül madde boyutlarının ölçülmesi ve yıllık, kış sezonu (Ekim-Mart) ve 24 saatlik maksimum değerlerin *Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği*’ne uygunluğu belgelendirilmelidir.

Kaynaklar

1. **Amann M, Lutz M (2000)**. The revision of the air quality legislation in the European Union related to ground-level ozone. *Journal of Hazardous Materials*, 78, 41-62.
2. **Anonim (2013)**. Turkish Wood Based Panels Association, Wood based panel production capacity reports, 2013, Istanbul, Turkey.
3. **Antal MJ, Friedman HL, Rogers FE (1980)**. Kinetics of cellulose pyrolysis in nitrogen and steam. *Combustion Science and Technology*, 21(3-4), 141-152.
4. **Antal MJ, Varhegyi G (1995)**. Cellulose pyrolysis kinetics: the current state of knowledge. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 34(3), 703-717.
5. **Atkinson R (2000)**. Atmospheric chemistry of VOCs and NOx. *Atmospheric Environment*, 34, 2063–2101.
6. **Bardana EJ, Montanaro A (1997)**. Indoor air pollution and health. Marcel Dekker.127-153.
7. **Beér JM (2000)**. Combustion technology developments in power generation in response to environmental challenges. *Progress in Energy and Combustion Science*, 26(4), 301-327.
8. **Boffetta P, Sarcci R, Kogevinas M, Wilbourn J, Vainio H (1998)**. Occupational Carcinogens. *Encyclopaedia of Occupational Health and Safety*, 2, 4th Edition, ILO.
9. **Boman BC, Forsberg AB, Järholm BG (2003)**. Adverse health effects from ambient air pollution in relation to residential wood combustion in modern society. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 29, 251–260.
10. **Brown DM, Stone V, Findlay P, MacNee W, Donaldson K (2000)**. Increased inflammation and intracellular calcium caused by ultrafine carbon black is independent of transition metals or other soluble components. *Occupational and Environmental Medicine*, 57, 685–691.
11. **Christersson L (1999)**. Theoretical background to and practical utilization of short-rotation and energy forestry (No. SLU-ILOV-64).
12. **De Jong W, Pirone A, Wojtowicz MA (2003)**. Pyrolysis of Miscanthus Giganteus and wood pellets: TG-FTIR analysis and reaction kinetics. *Fuel*, 82(9), 1139-1147.
13. **Demirbaş A (2008)**. Importance of biomass energy sources for Turkey. *Energy Policy*, (36), 834–842.
14. **Enzensberger W (1961)**. On the surface finishing of particleboard with resin impregnated paper layers. *Holz Roh Werkst*, 19: 394–398.

15. **Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2012)**. 2011 Yılı Genel Enerji Dengesi Tablosu, <http://www.enerji.gov.tr> (Erişim Tarihi: 16.03.2017).
16. **Elektrik Üretim Anonim Şirketi (EÜAŞ) (2012)**. Elektrik Üretimi Sektör Raporu 2012, www.enerji.gov.tr/yayinlar_raporlar/Sektor_Raporu_EUAS_2012.pdf (Erişim Tarihi: 16.03.2017)
17. **Feldmann J, Grümping R, Hirner AV (1994)**. Determination of volatile metal and metalloid compounds in gases from domestic waste deposits with GC/ICP-MS. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 350(4-5), 228-234.
18. **Finlayson-Pitts BJ, Pitts JN (1997)**. Tropospheric air pollution: ozone, airborne toxics, polycyclic aromatic hydrocarbons, and particles. *Science*, 276, 1045-1051.
19. **Fitzpatrick EM, Jones JM, Pourkashanian M, Ross AB, Williams A, Bartle KD (2008)**. Mechanistic aspects of soot formation from the combustion of pine wood. *Energy Fuel*, 22, 3771-3778.
20. **Gölçöl C, Dursun B, Alboyacı B, Sunan E (2009)**. Importance of biomass energy as alternative to other sources in Turkey, *Energy Policy*, (37), 424-431.
21. **Gündüz G, Saraçoğlu N, Aydemir D (2016)**. Characterization and elemental analysis of wood pellets obtained from low-valued types of wood. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38(15), 2211-2216.
22. **Gürdil GAK, Baz YÖ, Demirel Ç, Demirel B (2015)**. Yakıt Peleti ve Briketi İçin Güncellenmiş Avrupa Birliği Standartları ve İlgili Parametreler. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 29(2), 147-156.
23. **Gustafson P, Barregard L, Strandberg B, Sällsten G (2007)**. The impact of domestic wood burning on personal, indoor and outdoor levels of 1,3-butadiene, benzene, formaldehyde and acetaldehyde. *Journal of Environmental Monitoring*, 9(1), 23-32.
24. **Gustafson P, Östman C, Sällsten G (2008)**. Indoor levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in homes with or without wood burning for heating. *Environmental Science & Technology*, 42(14), 5074-5080.
25. **Hill SJ, Hartley J, Ebdon L (1992)**. Determination of trace metals in volatile organic solvents using inductively coupled plasma atomic emission spectrometry and inductively coupled plasma mass spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 7(1), 23-28.
26. **Höhr D, Steinfartz Y, Schins RPF, Knaapen AM, Martra G, Fubini B, Borm PJA (2002)**. The surface area rather than the surface coating determines the acute inflammatory response after instillation of fine and ultrafine TiO₂ in the rat. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 205, 239-244.
27. **Ibrahim S, Polyzois D, Hassan SK (2000)**. Development of glass fiber reinforced plastic poles for transmission and distribution lines. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27(5), 850-858.
28. **Jan Erik Mattsson**. Swedish University of Agricultural Science, Department of Agricultural Engineering, PO Box 66, SE-23066, Alnarp, Sweden.
29. **Johansson LS, Leckner B, Gustavsson L, Cooper D, Tullin C, Potter A (2004)**. Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets. *Atmospheric environment*, 38(25), 4183-4195.
30. **Kamal M S, Razzak SA, Hossain MM (2016)**. Catalytic oxidation of volatile organic compounds (VOCs)—A review. *Atmospheric Environment*, 140, 117-134.
31. **Kansal A (2009)**. Sources and reactivity of NMHCs and VOCs in the atmosphere: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 166, 17-26.
32. **Karayılmazlar S, Saraçoğlu N, Çabuk Y, Kurt R (2011)**. Biyokütlenin Türkiye’de Enerji Üretiminde Değerlendirilmesi. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 13(19), 63-75.
33. **Kesselmeier J (1999)**. Biogenic volatile organic compounds (VOC): an overview on emission, physiology and ecology. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 33, 23-88.
34. **Klass D L (1998)**. Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals. Academic Press. San Diego.
35. **Koziński J A, Saade R (1998)**. Effect of biomass burning on the formation of soot particles and heavy hydrocarbons. An experimental study. *Fuel*, 77(4), 225-237.
36. **Kozinski JA, Zheng G (1998)**. Patterns of Metals and PACs During Heating of Biologically Treated Deinking Byproducts. *Combustion Science and Technology*, 138(1-6): 363-380.
37. **Kumar P, Barrett DM, Delwiche MJ, Stroeve P (2009)**. Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(8), 3713-3729.
38. **Lakshmanan P, Delannoy L, Richard V, Methivier C, Potvin C, Louis C (2010)**. Total oxidation of propene over Au/xCeO₂-Al₂O₃ catalysts: influence of the CeO₂ loading and the activation treatment. *Applied Catalysis B: Environmental*, 96, 117-125.
39. **Larson TV, Koenig JQ (1994)**. Wood smoke: emissions and noncancer respiratory effects. *Annual Review Public Health*, 15, 133-156.
40. **Lavric E D, Konnov AA, De Ruyck J (2004)**. Dioxin levels in wood combustion—a review. *Biomass and Bioenergy*, 26(2), 115-145.

41. **Lea-Langton AR, Baeza-Romero MT, Boman GV, Brooks B, Wilson AJM, Atika F, Bartle KD, Jones JM, Williams A (2015).** A study of smoke formation from wood combustion. *Fuel Processing Technology*, 137, 327-332.
42. **Li W, Wang J, Gong H (2009).** Catalytic combustion of VOCs on non-noble metal catalysts. *Catalytic Today*, 148, 81-87.
43. **Löndahl J, Massling A, Pagels J, Swietlicki E, Vaclavik E, Loft S (2007).** Size-resolved respiratory-tract deposition of fine and ultrafine hydrophobic and hygroscopic aerosol particles during rest and exercise. *Inhalation Toxicology*, 19, 109-116.
44. **Molnár P, Gustafson P, Johannesson S, Boman J, Barregard L, Sällsten G (2005).** Domestic wood burning and PM_{2.5} trace elements: Personal exposures, indoor and outdoor levels. *Atmospheric Environment*, 39(14), 2643-2653.
45. **Moretti EC (2002).** Reduce VOC and HAP emissions. *Chemical Engineering Progress*, 98(6), 30-40.
46. **Müller-Hagedorn M, Bockhorn H, Krebs L, Müller U (2003).** A comparative kinetic study on the pyrolysis of three different wood species. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 6, 231-249.
47. **Obernberger I, Thek G (2004).** Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass and Bioenergy*, 27(6), 653-669.
48. **Ögüt H (2007).** Biyoyakıtlar, *Ekonomik Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 1, 130-133.
49. **Ojala S, Pitkääho S, Laitinen T, Koivikko NN, Brahma R, Gaálová J, Matejova L, Kucherov A, Päivärinta S, Hirschmann C, Nevanperä T (2011).** Catalysis in VOC abatement. *Topics in Catalysis*, 54(16-18), 1224-1256.
50. **Olsen E, Nielsen F (2001).** Predicting vapour pressures of organic compounds from their chemical structure for classification according to the VOC Directive and risk assessment in general. *Molecules* 6, 370-389.
51. **Ostro B, Broadwin R, Green S, Feng WY, Lipsett M (2006).** Fine particulate air pollution and mortality in nine California counties: results from CALFINE. *Environ Health Perspect*, 114, 29-33.
52. **Otto D, Hudnell H, House D, Mølhav L, Counts W (1992).** Exposure of humans to a volatile organic mixture, behavioral assessment. *Arch Environ Health*, 47, 23-30.
53. **Peng J, Wang S (2007).** Performance and characterization of supported metal catalysts for complete oxidation of formaldehyde at low temperatures. *Applied Catalysis B: Environmental*, 73, 282-291.
54. **Pope III CA, Dockery DW (2006).** Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *Journal of The Air & Waste Management Association*, 56(6), 709-742.
55. **Pope III CA, Burnett RT, Thun MJ, Calle EE, Krewski D, Ito K, Thurston GD (2002).** Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *Jama*, 287(9), 1132-1141.
56. **Ragland KW, Aerts DJ, Baker AJ (1991).** Properties of wood for combustion analysis. *Bioresource Technology*, 37(2), 161-168.
57. **Reddy AKN, Williams R H, Johansson TB (1996).** Energy after Rio: prospects and challenges. New York (NY): United Nations Publications;
58. **Reina J, Velo E, Puigjaner L (1998).** Thermogravimetric study of the pyrolysis of waste wood. *Thermochimica Acta*, 320(1), 161-167.
59. **Reisen F, Bhujel M, Leonard J (2014).** Particle and volatile organic emissions from the combustion of a range of building and furnishing materials using a cone calorimeter. *Fire Safety Journal*, 69, 76-88.
60. **Roberts AF (1970).** A review of kinetics data for the pyrolysis of wood and related substances. *Combustion and Flame*, 14(2), 261-272.
61. **Salthammer T, Klipp H, Peek RD, Marutzky R (1995).** Formation of polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDD) and polychlorinated dibenzofurans (PCDF) during the combustion of impregnated wood. *Chemosphere*, 30(11), 2051-2060.
62. **Saraçoğlu N (2010).** Küresel İklim Değişimi, Biyoenerji ve Enerji Ormanlığı, Efil Yayınevi, 298 s., Ankara.
63. **Saraçoğlu N, Gunduz, G (2009).** Wood pellets—tomorrow's fuel for Europe. *Energy Sources, Part A*, 31(19), 1708-1718.
64. **Shang TX, Ren RQ, Zhu YM, Jin XJ (2015).** Oxygen-and nitrogen-co-doped activated carbon from waste particleboard for potential application in high-performance capacitance. *Electrochimica Acta*, 163, 32-40.
65. **Sommerhuber PF, Wang T, Krause A (2016).** Wood-plastic composites as potential applications of recycled plastics of electronic waste and recycled particleboard. *Journal of Cleaner Production*, 121, 176-185.
66. **Stanmore BR (2004).** The formation of dioxins in combustion systems. *Combustion and Flame*, 136(3), 398-427.
67. **Timothy VL, Jane QK (1993).** A Summary of the Emissions Characterization and Noncancer Respiratory Effects of Wood Smoke. EPA-453/R-93-036. US EPA (United States Environmental Protection Agency).
68. **Tsai W T (2016).** Toxic Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Atmospheric Environment: Regulatory Aspects and Monitoring in Japan and Korea. *Environments*, 3(3), 23.
69. **Türe S (2001).** Biyokütle enerjisi. *Tübitak Matbaası*, Ankara.

70. **Von Eckstaedt CDV, Grice K, Ioppolo-Armanios M, Kelly D, Gibberd M (2012).** Compound specific carbon and hydrogen stable isotope analyses of volatile organic compounds in various emissions of combustion processes. *Chemosphere*, 89(11), 1407-1413.
71. Ültanır M Ö (1996). Türkiye'nin Biyokütle Enerji Stratejisi Ne Olmalıdır. *Bilim ve Teknik*, 342.
72. **Wang L, Chen SS, Tsang DC, Poon CS, Shih K (2016).** Value-added recycling of construction waste wood into noise and thermal insulating cement-bonded particleboards. *Construction and Building Materials*, 125, 316-325.
73. **White LP, Plaskett LG (1981).** Biomass as Fuel. Academic Press, London
74. **WHO 2000.** Air quality guidelines for Europe. In: Theakston, F. (Ed.), European Series. World Health Organization, Copenhagen.
75. **Williams A, Jones JM, Ma L, Pourkashanian M (2012).** Pollutants from the combustion of solid biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38(2): 113-137.
76. **Williams PT, Horne PA (1996).** Influence of temperature on the products from the flash pyrolysis of biomass. *Fuel*, 75, 1051-1059.
77. **Wilson JM, Baeza-Romero MT, Jones JM, Pourkashanian M, Williams A, Lea-Langton AR, Ross B, Bartle KD (2013).** Soot formation from the combustion of biomass pyrolysis products and a hydrocarbon fuel, n-decane: an aerosol time of flight mass spectrometer (ATOFMS) study. *Energy & Fuels*, 27(3), 1668-1678.
78. **Winter F, Wartha C, Hofbauer H (1999).** NO and N₂O formation during the combustion of wood, straw, malt waste and peat. *Bioresource Technology*, 70(1), 39-49.
79. **Yıldırım HT, Dayaniklioglu S, Candan Z (2013).** Raw material procurement policies of Turkish wood panel industry. Proceeding of 56th Society of Wood Science Technology International Convention.
80. **Yorulmaz SY, Atımtay AT (2009).** Investigation of combustion kinetics of treated and untreated waste wood samples with thermogravimetric analysis. *Fuel Processing Technology*, 90(7), 939-946.