



Not Defteri

V u r a l A l t ı n

Fosil Yakıt Aritmetiği

Nerede kalmıştık?... Bir karbon atomunun yanmasıyla açığa çıkan enerji 4,08 eV. Elektronvolt; küçük bir enerji birimi, $1,6 \times 10^{-13}$ J. Karbon atomunun kütle numarası 12. Bir kilogramında 1000/12 mol atom var. Mol başına $N_{av} = 6,025 \times 10^{23}$ taneden, toplam, $(1000/12) \times N_{av} = 502,1 \times 10^{23}$ karbon atomu. Bu kadar karbon atomunda; $4,08 \times 502,1 \times 10^{23} = 2,04 \times 10^{26}$ eV kimyasal enerji bulunur. O halde, saf karbonun, örneğin grafitin, kütle enerji yoğunluğu, joule cinsinden; $2,04 \times 10^{26} \text{ eV} \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ (J/eV)} = 32,64 \times 10^6 \text{ J/kg}$ kadar. Diyelim 30 MJ/kg: Bayağı yüksek...

Öte yandan, serbest haldeki iki hidrojenle bir oksijen birleşerek bir su buharı molekülü oluşturduğunda, 2,73 eV enerji açığa çıkar. Yani, hidrojen atomu başına 1,365 eV. 1 kg saf hidrojen, $1000 \times N_{av} = 6,025 \times 10^{26}$ tane hidrojen atomu içerir. Bu kadar hidrojen atomunda, $1,365 \times 6,025 \times 10^{26} = 8,22 \times 10^{26}$ eV kimyasal enerji var. Yani, saf hidrojenin kütle enerji yoğunluğu $8,22 \times 10^{26} \text{ eV} \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ (J/eV)} = 13,15 \times 10^7 \text{ J/kg}$ kadar. Diyelim 130 MJ/kg: Daha da yüksek...

	Isıl değer, Q	Birim	% karbon	CO ₂
Hidrojen	121	MJ/kg	0	
Ham petrol	45-46	MJ/kg	89	70-73 g/MJ
LPG	49	MJ/kg	81	59 g/MJ
Doğal Gaz	39	MJ/m ³	76	51 g/MJ
Kömür, 1. kalite	21.5-30	MJ/kg	67	90 g/MJ
Kömür, 2. kalite	13.5 - 19.5	MJ/kg		
Kömür, katranlı ('bitümlü')	27.0 - 30.5	MJ/kg		
Kömür, az katranlı	18	MJ/kg		
Linyit, ortalama	9.7	MJ/kg	25	
Linyit, 2. kalite	8.15	MJ/kg		1.25 kg/kWh
Odun (kuru)	16	MJ/kg	42	94 g/MJ

Bu rakamların doğruluk derecesini nasıl sınarım?... Koyarım 'bomba kalorimetresi'nin içine belli bir miktar su, yalıtılmış termos kabı gibi; yakarım içinde 1 gram kömür veya hidrojen. Açığa çıkan ısı dışarıya kaçmaz, hepsi suya geçer. Sıcaklık artışını ölçerim; kütle m ve ısı kapasite c'yi kullanarak, açığa çıkan enerjiyi hesaplarım. ($q = m.c.\Delta T$) Yandaki tabloda, bazı enerji hammaddelerinin, bu şekilde ölçülmüş olan enerji yoğunlukları veriliyor. Örneğin Avustralya'nın Queensland bölgesinden çıkarılan 1. kalite 'parlak kömür'ün ('antrasit') kütle enerji yoğunluğu 30 MJ/kg. Bu rakamın, yukarıda hesaplanan değere çok yakın olması, kömürün tümüyle saf karbondan oluştuğu anlamına gelmiyor. Aslında, en kaliteli kömürün dahi, kütlelerinin %5-10 kadarı, yanıcı olmayan unsurlardan oluşur; diyelim s oranında. Peki, 1 kg'ın, safsızlıklardan geriye kalan (1-s)

kadarı nasıl oluyor da 30 MJ içerebiliyor?... Demek ki kömürde, karbonun yanında, hidrojen de var. Diyelim, yakıt kısmındaki karbon oranı x. O halde, 1 kg'ın, safsızlıklardan geriye kalan (1-s) kg'ında, (1-s).x kg karbon, (1-s).(1-x) kadar da hidrojen bulunur. Yani, toplam enerji içeriği, $Q = 30.(1-s).x + 130.(1-s).(1-x)$ MJ olur. 1 kg'ın yanmasından artakalan safsızlıkların miktarı s tartılıp, açığa çıkan enerji miktarı Q da ölçülmüşse eğer, kömürün içerdiği karbon oranı x, bu eşitlikten hesaplanabilir. Tablonun dördüncü sütununda bu değerler veriliyor: Kaliteli kömür için %67, petrol için %89. Petrol daha fazla hidrojen içerdiğinden, kütle enerji yoğunluğu, 45 MJ/kg ile, kömüründen ve hatta saf karbondan oluşan ideal grafitinkinden bile daha yüksek. Peki bu enerji yoğunluklarının anlamı?...

Diyelim kömür A noktasından çıkıyor, halbuki B noktasında tüketilmesi lazım. $Q = 30$ MJ içeren 1 kg'ın karayolu üzerinden taşıyacağım, ittire ittire götürüyorum, kinetik sürtünme katsayısı $\mu_k = 0,3$: İçerdiğine eşit miktarda enerji harcayarak, en fazla ne kadar uzağa götürebilirim bu kömür parçasını?... Bu maksimum uzaklık L olsun. Kinetik sürtünme kuvveti $mg\mu_k = 1 \times 9,8 \times 0,3 = 29,2$ newton olduğuna göre, bu kuvvete karşı, L boyunca yapılan iş $W = F.L = Q$ olmak zorundadır. Yani $L = 30 \text{ MJ} / (29,2 \text{ N}) = 1,03 \text{ Mm}$, yani yaklaşık 1000 km. En kaliteli kömürü dahi, karayolu üzerinden, bu mesafeden öteye taşımaya değmez. Hem zaten, diğer masraf kalemlerinin yanında bir de çıkartılmasının enerji maliyeti var. Petrol için bu mesafe, $45/30 = 1,5$ misli: 1500km. Ancak, deniz ulaşımında sürtünme kayıpları çok daha düşük. Bu sayede, kömür ya da petrolü, Dünya'nın, su ulaşımıyla birbirine bağlı herhangi iki noktası arasında gemilerle taşımak ekonomik hale geliyor. Petrol ve doğal gaz gibi akışkanların kara üzerinden boru hatlarıyla nakli, benzer şekilde; ha katıyı akışkanın üzerinden, ha akışkanı katının içinden, benzer şey; binlerce kilometreye kadar ekonomik olabiliyor. Kömürün de keza, öğütülüp tozlaştırıldıktan ve suyla karıştırılıp akışkanlaştırıldıktan sonra, boru hatları üzerinden pompalanması mümkün. Fakat bu yöntem, görece kısa mesefeler için uygulanmakta. Her durumda, Dünya üzerinde homojen olarak dağılmamış olan fosil yakıtların, ürettikleri yerlerden tüketim merkezlerine

nakli, dev uğraşlar gerektirir.

Örneğin bir kömür santralını ele alalım. Kömür santralleri elektrik üretimini genellikle, suyu ısıtarak ürettikleri buharın gücüyle bir türbini döndürerek yaparlar. Türbinin bağlı olduğu jeneratör, örneğin sabit bir manyetik alan içerisindeki bobini döndürüp, Faraday yasasına göre elektrik üretmektedir. Başlangıçtaki kömürün kimyasal enerjisinin, önce mekanik, sonra da elektrik enerjisine dönüştürülmesi sırasındaki 'buhar döngüsü'nün verimi, yaklaşık 1/3 kadardır. Dolayısıyla, örneğin 1000 MW elektrik (e) gücündeki bir santral, aslında 3000 MW ısı (t) güce sahip olmak ve ürettiği elektrik enerjisinin iki misli kadar ısıyı, başka amaçlarla kullanılmadığı takdirde, çevreye atmak zorundadır. Bu durum, santralin tasarımından bağımsız olup, termodinamik yasalarının kaçınılmaz gereğidir. Böyle bir santral yılın $365 \times 24 = 8760$ saatinin %70'inde tam kapasiteyle çalıştırılırsa eğer; $8760 \times 0,70 = 6132$ milyon kilowattsaat elektrik üretir. Kısaca: 6,13 milyar kW. Yani, $6,13 \times 10^{12} \text{ (J/s)} / 3600 \text{ s} = 22,07 \times 10^{15} \text{ J(e)}$. Bunun üç misli, $66,21 \times 10^{15} \text{ J(t)}$ ısı enerjisi tüketir. Bu kadar ısı, 30MJ/kg'lık kaliteli kömürün, $66,21 \times 10^{15} / 30 \times 10^6 = 2,21 \times 10^9$ kg'ında vardır. Yani, 2,21 milyon tonunda. Bu durumda, bu kömürün her kilogramından, $6,13 / 2,21 = 2,77$ kWh elektrik üretilmektedir. Ya da kWh başına 0,36 kg kömür tüketilmekte...

Kömür madenleri her zaman, elektriğin tüketildiği yerleşim merkezlerine yakın değildir. Dolayısıyla, santral; ya madenin yanında kurup, üretilen elektriği iletmenin masraf ve kayıplarına katlanmak, ya da yerleşim merkezine yakın konumlandırıp, kömürü santrale kadar taşımak gerekir. Onca kömürün taşınması, zahmetli bir iştir. Bu yüzden, kömüre dayalı elektrik santralleri genellikle madenlerin yanında kurulur. Fakat, en iyi çözüm bazen, çoğu işte olduğu gibi, arada bir yerde olup, kömürün karayolu üzerinden bir miktar taşınmasını gerektirir; diyelim 100 km. Karada kömür taşımının en ekonomik yöntemi, demiryoluyladır. Yılda 2,21 milyon ton kömür, diyelim her biri 10 ton taşıyabilen yük vagonlarından, 221.000 tanesini gerektirir: Günde 605 vagon. Bu; diyelim 50'şer vagonluk katarlarla, günde 12 sefer demektir. Katarların yüklenip boşaltılması 2'şer saat alsa ve yolda ortalama 50 km/saat hız yapılırsa, her katarın bir seferi; 'yükle git', 'boşalt dön', ikişerden dörderden, 8 saat alır. Dolayısıyla, tek bir katar günde, 3 sefer yapılabilir. Toplam 12 sefer için, 4 katar gerekir. Katarların yolda karşılaşmış kömür veya

Not Defteri

metal alışverişinde bulunmaması şart olduğuna göre, demiryolunun çift hat olarak dönmesi lazımdır. Lokomotifin gereken çekme kuvvetini sağlayabilmesi ve özellikle kavisleri dönerken raydan çıkıp devrilmemesi için, tekerlekleriyle raylar arasında, 0,35-0,45 gibi görece yüksek bir dinamik sürtünme katsayısına gereksinim vardır. Halbuki, vagonlar için bu katsayı, daha düşük olabilir. Dolayısıyla, yoldaki sürtünme kayıplarını kısmen de olsa azaltmak amacıyla, vagon tekerlerinin lazer ışınlarıyla işleme tabi tutulup, yüzeylerinde sert ve kaygan bir katmanın oluşması sağlanarak 'sırlanması' yönünde çalışmalar var. Kayıplar ne kadar azalır, kar da o kadar fazlalır ne de olsa. Bizim, düğmeye bastığımızda elektriğimizin gelmesi için gün boyu bu işlerle uğraşanlar var. Bazı geceler uyuyamayan. Neyse... Santrale götürüp yaktık bu kömürü diyelim, şöyle ya da böyle: Ne olur? Yılda 2,21 milyon ton kömürün bilançosu...

En kaliteli kömürün %5 ile 10 kadarı, yarıncı olmayan saflıklardan oluşur: 110-220 bin ton. Bu 'kül'ün yarısından azı, kum taneleri iriliğinde olup, 'dip'te kalırken; büyük bir kısmı, mikro parçacıklar halinde olup, 'uçucu'dur ve baca gazlarıyla birlikte yükselir. Çevreye yayılmaması için, elektrostatik filtreler veya diğer düzeneklerle yakalanması gerekir. Biriktirilen kül, bir setin arkasına yığılıp, üstü kapanır. Dolgu alanının killi zeminli olması tercih edilir. Ki, külün içeriğindeki; uranyum, toryum ve radyum gibi bazıları radyoaktif olan ağır metaller başta olmak üzere, çevreye zarar potansiyeli taşıyan bileşenler, yağışlarla süzülüp alt katmanlara inerek, yeraltı sularına karışmasınlar.

En kaliteli kömür %1 oranında, sıradan kömürler %2-3 civarında kükürt içerir: En az 22 bin ton. Yanması halinde, kütle numarası 32 olan kükürt, molekül ağırlığı 64 olan kükürt dioksite (SO₂) dönüşecektir: 22x64/32=44 bin ton. Bacadan salındığı takdirde, kükürtdioksit, atmosferdeki oksijen ve su buharıyla birleşip, molekül ağırlığı 98 olan sülfürik asit (H₂SO₄) oluşturur: 44x98/64=67 bin ton. Sonuç olarak yağmurlarla birlikte yere inecektir. Buna meydan vermemek için, ya kömür toz haline getirilip hava akımında akışkanlaştırılarak, hem de kömür parçacıklarının oksijenle temas yüzeyi artırılmış olduğundan tam yanmayı kolaylaştıran 'akışkan yatak tekniği'yle yakılır ve bu sırada içine katılan kireç tarafından, kükürtdioksitin açığa çıktıkça, olabildiğince alınması sağlanır. Ya da, kükürtdioksitin, normal şekilde yakılan kömürden yükselen baca gazlarının yıkanmasına dayalı 'ıslak yöntem'le yakalanması lazımdır. Bu ikinci yöntem, hem de santralin işleyişini etkilediğinden dolayı daha maliyetlidir. Her iki yöntemde de, daha ziyade yanmış kireç (Ca-

CO₃) kullanılır ve kükürtdioksit gazının, katı kalsiyumsülfata (CaSO₃) dönüştürülmesine çalışılır. 'Akışkan yataklı yakma tekniği'ne göre tasarlanmış ilk santralımız olan 320 MW'lık Çan termik santralının faaliyeti, çevre gerekçesiyle geciktirildi. Gerekçe, dolgu alanının killi olan zemininin, 'yüksek yoğunluklu polietilen' le kaplanmamış olmasıydı. Kaş yaparken göz çıkarmak?...

Kömürdeki hidrojen ise, yandıktan sonra su buharı olup atmosfere karışır. Su buharı etkin bir sera gazı olmakla birlikte, atmosferdeki oranı iklim dinamiklerince denetlenmektedir. Nihayet karbona gelince, kömürdeki oranı, tablodaki gibi ağırlıkça %69 ise, yanan miktarı; 0,69x2,21=1,5 milyon ton kadardır. Kütle numarası 12 olan her karbon atomu 'tam' yandığında, molekül ağırlığı 44 olan bir CO₂ molekülüne dönüştüğünden; yanan 1,5 milyon ton karbon, 1,5x44/12=5,5 milyon ton karbondioksit oluşturur ve yöntemleri aranıyor olmakla beraber, yakalanması henüz mümkün olmadığından, atmosfere karışır. Sera gazlarından bir diğeridir. 2,21 milyon ton kömürün yanması sonucunda, atmosfere ayrıca 20 bin ton kadar da nitrojen oksit gazları salınır. Bunlardan bazıla-

Linyit rezervlerimizin kütsel enerji yoğunluğu ve rezerv payları	
KJ/kg, (kcal/kg)	Pay, %
<6,3 (1500)	57
6,3-10,5 (1500-2500)	23
10,5-14,7 (2500-3500)	18
>14,7 (3500)	2
Ağırlıklı ortalama 7,84 MJ/kg veya 1.872 kcal/kg	

rı ozon tabakasını zayıflatır.

Yukarıdaki hesaplar, enerji yoğunluğu yüksek antrasit kömürü için geçerli. Daha düşük kaliteli kömür kullanılması halinde rakamlar kötüleşir. Örneğin yandaki tabloda, yerli linyit rezervlerimizin kütsel enerji yoğunlukları veriliyor. Toplamı 8,3 milyar tonu bulan bu rezervlerin yarısına yakını oluşturulan Afşin-Elbistan havzasındaki enerji yoğunluğu 6,3 MJ/kg'dan az iken; %23'ününü 6,3-10,5 MJ/kg, %18'inin 10,5-14,7 MJ/kg arasında değişiyor. %2'sinin de 14,7 MJ/kg'dan fazla. Ağırlıklı ortalama 7,84 MJ/kg civarında. Yani, kaliteli antrasit kömürünün 30MJ/kg'lık enerji yoğunluğunun, 7,84/30=0,26'sı kadar. O halde, yukarıdaki; yıl boyunca %75 emreemadelikle çalışıp 6,13 milyar kWh elektrik üreten 1000 MW(e)'lik santral, yılda 2,21 milyon ton yerine, 2,21x3,83=8,46 milyon ton linyit yakmak zorundadır. Yani, kömürün kg'ı başına 0,72kWh üretmekte, ya da kWh başına 1,38 kg'ını tüketmektedir.

Türkiye, 2006 yılı için 173,1 milyar kWh olarak gerçekleşmesi beklenen elektrik üreti-

minin 32,6 milyar kWh'ini linyitten sağlamayı planlıyor. Bunu için, 32,6x1,38=45 milyon ton linyit tüketip, önceden de üretmek zorunda. 2020 yılı için öngörülen 450 milyar kWh civarındaki toplam tüketiminin ise, 110 milyar kWh'inin linyite dayandırılması planlanıyor. Bu düzeyde üretim, 150 milyon tona yakın linyit tüketimi gerektirmekte. Hal böyle olursa eğer; bilinen linyit rezervlerimizin, termik santrallarda kullanım amacıyla üretimi ekonomik olan %65'ini oluşturan 5,4 milyar tonunun o zamana kadar geride kalmış olacak olan yaklaşık 4 milyar tonu, izleyen 25 yıl içerisinde tükenecek. Ama iyi ki de varmış. Aksi halde çok daha zor bir durumda olurduk.

Doğal gazla dayalı birleşik ('kombine') döngü santrallerinde üretilen elektriğin büyük bir kısmı, doğal gazın yakılmasıyla oluşan sıcak gazların bir gaz türbinini döndürmesiyle ('Brayton döngüsü') elde edilir. Ayrıca, bu türbinin çıkışındaki sıcak gazların ısısıyla su buharı oluşturulup, bir de buhar döngüsü kullanılarak, ek bir miktar daha elektrik üretilir. Dolayısıyla, bu tip santrallerin verimi, sadece buhar döngüsüne dayalı olarak çalışanlarınkine göre daha yüksek olup, %45-50'ye ulaşabilir: Diyelim %45. Öte yandan, doğal gazın hacimsel enerji yoğunluğu, m³ başına 39 MJ kadardır. Yani; özkütlesi, 0 °C sıcaklık ve 1 atmosfer basınç altında, bileşimine bağlı olarak 0,7-0,8 kg/m³ arasında değiştiğinden; kütsel enerji yoğunluğu 49-56 MJ/kg kadar. O halde, yukarıdaki; yıl boyunca %75 emreemadelikle çalışıp 6,13 milyar kWh elektrik üreten 1000 MW(e)'lik santral, yılda; 30MJ/kg yoğunluklu 2,21 milyon ton kömür yerine; 39MJ/m³ yoğunluklu doğal gazdan, 2,21x(30/39)x[(1/3)/0,45]=1,26 milyar metreküp yakmak zorundadır. Yani, doğal gazın metreküpü başına 6,13/1,26=4,87 kWh üretmektedir. Ya da kWh başına 0,21 metreküpünü tüketmekte...

Doğal gaz, görece yüksek verimi ve daha az kirlenici yayması nedenleriyle, özellikle son 20 yılda Dünya'da hızla yayıldı. Türkiye de bu eğilimin içerisinde. 2006 yılı için 173,1 milyar kWh olarak gerçekleşmesi beklenen elektrik üretiminin, %43,8'ine karşılık gelen 70,5 milyar kWh'ini doğal gazdan sağlamayı planlıyor. Bunu için, 70,5x0,21=14,8 milyar metreküp gaz tüketecek. Halen, tükettiğimiz doğal gazın %57,4'ü elektrik üretiminde kullanıyoruz. Dolayısıyla, bu yılki toplam ithalat, 14,8/0,574=25,8 milyar metreküpü aşacak. Bin metreküpü 270\$'dan, fiyatı; (25,8/1000)x270=6,98 milyar dolar. Diyelim 7 milyar dolar: Yılda... Gelecekte, ithalat hacmiyle birlikte fiyat artacak ve bu rakam yükselecek.

Elektriği kullanır ve enerji tüketirken, ara sıra bunları hatırlamamızda yarar var.