

DÜNYA ENERJİ İHTİYAÇLARININ KARŞILANMASINDA ATOM GÜCÜNÜN ROLÜ

Muammer ÇETİNÇELİK

Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü, Ankara

ÖZET. — Biz burada, yakın gelecekte çok büyük ihtiyaç duyulacak olan atom enerjisini elde etmek için harcanacak nükleer yakıtların sağlanması konusunda dünya atomik hammadde kaynaklarından uranyum ve toryum cevherlerinin rezervleri ile üretim güçlerini gözden geçirmekte ve bazı ekonomik faktörlere değinmekteyiz.

GİRİŞ

Bu etüdün hazırlanmasında, toplantılarına katılmış olduğumuz, 31 Ağustos - 9 Eylül 1964 tarihleri arasında isviçre'nin Cenevre şehrinde toplanan «III. Uluslararası Atom Enerjisinin Barışçı Gayelerle Kullanılması Konferansı» ile 13-17 Eylül 1964 tarihleri arasında Lozan şehrinde yapılan «Dünya Enerji Konferansı - Enerji Kayıplarını Azaltma Çarelerini Araştırma Toplantısı», 17-20 Mayıs 1965 tarihleri arasında istanbul'da yapılan «Birleşmiş Milletler Enerji Simpozyumu» ve 28 Eylül - 2 Ekim 1965 tarihleri arasında Federal Almanya'nın Frankfurt şehrinde toplanan «II. Foratom Kongresi» nde yapılan bilimsel ve teknik tebliğlerin sonuçları esas tutulmuştur. Ayrıca Avrupa Ekonomik işbirliği ve Kalkınma Teşkilâtı (O.E.C.D.) nın 1965 yılı içinde Fransa'da Paris'te yaptığı toplantılar ile Milletlerarası Atom Enerjisi Ajansı (I.A.E.A.) nın Japonya'nın Tokyo şehrinde düzenlediği enerji toplantılarının çalışma raporları da gözden geçirilmiştir.

DÜNYA ENERJİ TÜKETİMİNİN BUGÜNKÜ DURUMU

Günden güne hızla artan dünya enerji ihtiyacı ve bu ihtiyacın muhtelif enerji kaynaklarıyla karşılanması hususunda bugüne kadar birçok etüd ve araştırmalar yapılmıştır. Yapılan hesaplara göre, gelecek 2000 yılında sarfedilecek toplam enerji miktarı 1960 yılındakinin takriben üç katı olacaktır. Dünya enerji tüketimi 2000 yılının başlarında $135-170 \cdot 10^{15}$ B.Th.U. ¹ (ortalama olarak 37 800 000 milyar kilo kalori) olacaktır.

Dünya enerji ihtiyacı 1957 ilâ 1960 yılları arasında % 6.25 oranında artmıştır. Muhtelif memleketlerde enerji tüketiminin yıllık artışı Tablo 1 de gösterilmiştir.

Yapılan tahminî hesaplara göre, dünya enerji ihtiyaçlarının karşılanmasında fosil ve fisil yakıtların payı, muhtelif onar yıllık dönemler için Tablo 2 de gösterildiği gibi olacaktır.

¹ 1 B. Th. U. = 0.2520 Kcal.

Tablo - 1

<i>Memleketler</i>	<i>Yıllar dönemi</i>	<i>Artış (%)</i>
Kanada	1962 - 1980	6.4
Fransa	1965 - 1985	7.2
Birleşik Amerika	1980 - 2000	7.5
Arjantin	1965 - 1980	8.0
Japonya	1959 - 1980	8.1

Tablo - 2**Dünya Enerji Kaynaklarının Payları**

<i>Enerji kaynakları</i>	<i>Muhtelif yıllara göre toplamın % oranları</i>			
	<i>1955</i>	<i>1965</i>	<i>1975</i>	<i>1985</i>
Katı yakıtlar	50.5	39.0	30.1	25.0
Akar yakıtlar	31.7	37.8	40.5	37.0
Tabii gazlar	10.5	14.1	17.8	25.0
Hidroelektrik	7.3	8.2	7.6	7.0
Nükleer enerji	—	0.9	4.0	6.0
Toplam :	100.0	100.0	100.0	100.0

Bu tablodan birincil enerji kaynaklarından akar yakıtların, özellikle ham petrol ve tabii gazın, yeryüzünün her yıl artan enerji tüketimi karşısında öneminin arttığı ve katı yakıtların payının gittikçe azalmakta olduğu ve 1985 yılında ham petrolün² dünya enerji ihtiyacının % 37 sini ve tabii gazın³ ise %25 ni karşılayacağı anlaşılmaktadır. Bu ihtiyacın ancak %6 sı nükleer enerji ile karşılanabilecektir.

Bugün Türkiye'de ise dördü ticari (taşkömürü, linyit, petrol ürünleri, ve hidrolik kuvvet) ve üçü ticari olmıyan (odun, tezek ve tarım artıkları) toplam olarak yedi türlü birincil enerji kaynağı kullanılmaktadır.

Ulusal enerji politikamızda, isteklerin karşılanmasında birincil ticari enerji kaynaklarından mümkün olduğu kadar çok yararlanma hedef olarak alınmaktadır. Tezek (ahır gübresi) in ve orman ürünlerinin yakıt olarak kullanılmasının önüne geçilmesi gerekmektedir. Bu çeşitli birincil enerji kaynaklarının muhtelif yıllara göre, toplam genel enerji içindeki % lerini gösterir rakamlar Tablo 3 te verilmiştir. Türkiye'de 1950 yılında toplam enerji tüketiminin % 64.6 sını teşkil eden tezek, odun gibi ticari olmıyan yakıtların 1973 teki oranının % 15 ten aşağı düşeceği tahmin edilmektedir. Bu husus, ticari olmıyan yakıtların miktarını azaltmayı amaç güden memleketimiz enerji ekonomisine de uymaktadır.

• Dünya ham petrol rezervi, 1959 yılında 32 milyar ton iken, 1961 de 40 milyar ve 1965 te ise 50 milyar ton olarak tesbit edilmiştir. 1965 yılı sonunda Türkiye'nin rezervleri ise 70 milyon tondur.

³ Son yıllarda dünya tabii gaz üretimi 5 600 tera kilo kaloriyi aşmıştır. (Bu kalorifik enerji değeri ise 600 milyar metre küb gaza tekabül eder.) Bu miktarın iki çeyreği Birleşik Amerika'da üretilmektedir. Halihazırda Sovyetler Birliği'nde tesbit edilen tabii gaz rezervlerinin toplamı 5 250 milyar metre küb, A.B.D. de 7 900 milyar metre küb, B. Almanya'da ise 150 milyar metre küb kadardır.

Tablo - 3
Türkiye'de Birincil Enerji Kaynaklarının Toplam Enerji İçindeki Yüzdeleri

<i>Birincil kaynaklar</i>	<i>Y ı l l a r</i>		
	<i>1963</i>	<i>1967</i>	<i>1972</i>
Taşkömürü	19.2	17.4	15.0
Linyit	9.5	11.6	20.0
Petrol ürünleri	12.9	14.8	20.5
Fuel-oil	3.5	11.1	21.0
Hidrolik enerji	4.1	4.2	8.5
Ođun	28.3	22.3	10.0
Tezek (ahır gübresi)	22.5	18.6	5.0
Toplam :	100.0	100.0	100.0

Muhtelif enerji kaynakları arasında bir mukayese yapabilmek için, her enerji çeşidinin hâsıl ettiği enerji miktarı kömüre çevrilerek, meselâ: 1952, 1957, 1962 ve bir de 1985 yılları arasındaki dünya enerji tüketiminin kömür olarak hesaplanan tahmini rakamları Tablo 4 te gösterilmiştir.

Tablo - 4
Enerji Çeşitlerinin Kömürle Eşdeğeriği [1]

<i>Enerji kaynağı</i>	<i>Muhtelif yıllara göre milyon ton olarak eşdeğeri kömür</i>			
	<i>1952</i>	<i>1957</i>	<i>1962</i>	<i>1985</i>
Maden kömürü	1.634	1.934	2.214	3.000
Ham petrol	749	1.070	1.513	4.400
Tabii gaz	340	467	731	3.000
Hidrolik enerji	200	248	320	840
Nükleer enerji	—	—	3	730
Toplam :	2.923	3.719	4.781	12.000

[1] 1 ton linyit = 0.4 ton kömüre eşdeğer; 1 ton ham petrol = 1.4 ton kömüre eşdeğer; 1000 m³ tabii gaz = 1.3 ton kömüre eşdeğer; 1000 kwh = 0.5 ton kömüre eşdeğer.

Yukarıdaki tablodan anlaşılacağı gibi, 1985 yılında serbest dünyada 12 milyar ton kömüre tekabül edecek kadar enerji elde olunacaktır. 2000 yılında ise 45 milyar ton kömüre eşdeğer enerjiye ihtiyaç olacaktır.

Son zamanlarda birincil enerji kaynaklarına sahip olmıyan birçok ülkeler, bazıları çok eski zamanlarda insanlar tarafından kullanılmakta olan yeni enerji kaynaklarına baş vurmuşlardır. Bu yeni grup kaynaklar: Jeotermal Enerji (Yerateşi enerjisi); Solar Enerji (Güneş Enerjisi); Eolien Enerji (Rüzgâr Enerjisi); Maremotris Enerji (Med ve Cezir Enerjisi) ve Denizlerin Termik Enerjisidir. Bu yeni tabii enerji kaynakları birbirine sıkı sıkıya bağlıdır. Yapılan hesaplara göre, 1950-2050 yılları arasındaki 100 yıllık dönem için bu enerji kaynaklarından elde olunabilecek kömüre eşdeğer enerji miktarları ise Tablo 5 te gösterilmiştir.

Tablo - 5
Yeni Enerji Kaynakları ve Kömüre Eşdeğerliliği

Solar enerji	175.0 milyar ton kömür
Eolien enerji	3.5 » » »
Denizlerin termik enerjisi	1.7 » » »
Maremotris enerji	0.9 » » »
Jeotermal enerji	0.035 » » »
Toplam :	181.135 milyar ton kömür

DÜNYANIN NÜKLEER ENERJİ DURUMU

Dünyada enerji ihtiyaçlarının karşılanmasında muhtelif kaynakların rolünü böylece gözden geçirdikten sonra, nükleer enerjinin yakın bir gelecekte dünyanın bazı bölgelerinde ve bazı şartlar altında fosil yakıtlar ile elde edilebilen enerjiden daha ekonomik olabileceğini araştırmak isteriz. Bugün küçük büyük her memleket kendi imkânlarını tartarak nükleer enerjiye son derece önem vermektedir. Meselâ, Birleşik Amerika'da 2000 yılından sonra üretilen elektriğin % 50 si atomik elektrik olacaktır. Zaten önümüzdeki 20 yılda Avrupa memleketlerinin birçoğu için nükleer enerjiden faydalanmak bir mecburiyet olarak kendini göstermiş olacaktır. Bu memleketlerin birçoğlarında yeter derecede fosil yakıtların bulunmaması ve taşıma zorlukları olması bakımından nükleer enerji daha ilgi çekici olmuştur.

Atom bilimi ve teknolojisinde gerçekleştirilen son gelişmeler sayesinde, gelecekte dünya için bir enerji sıkıntısı bahis konusu olmayacak ve nükleer enerji zamanla maliyet bakımından rekabet eder hale geldiği için tabii olarak kullanılacaktır.

1955 yılından bugüne kadar dünyada nükleer tesislerin toplam enerji gücü şöyledir:

1955 yılı:.....	5 MW [1]
1958 » :.....	185 »
1965 » :.....	5000 »

[1] 1 MW = 1 megavat = 1000 kilovat (kw)

Gelecek için hazırlanan proje ve plânlara göre, toplam dünya nükleer enerji üretimi, 1970 te 20 000 MW ilâ 35 000 MW ve 1980 de de 150 000 MW ilâ 250 000 MW arasında olacaktır (Tablo 6).

Şuna hiç şüphe yoktur ki, nükleer enerjiye gelecekte duyulacak olan ihtiyaç çok büyük olacaktır. Ancak atom enerjisi üretmek için harcanan nükleer yakıt kaynakları, yakın gelecekte bugün kullanılmakta bulunan tipteki reaktörler için kifayetsiz olacaktır. İşte bu tezatlı duruma bir çözüm yolu bulunması, uzun veya orta vadeli ulusal atom politikaları üzerine en büyük etkiyi yapacaktır. İlk kurulan nükleer enerji santrallerinin⁴ tesis bedelleri tahmin edilenden fazla olmuştur. Bunun sebepleri, gerçekleştirme sırasında tesadüf edilen zorluklar ve bunları yenmek için yapılan ilâve etüd ve araştırmalar olmuştur.

⁴ Nükleer enerji santrallerinin en karakteristik özelliği, enerji üretimi büyüdükçe, enerji maliyetinin hızla düşmesidir. Bunun sebebi, yakıt masraflarının enerji maliyetindeki hissesinin az olmasıdır. Maliyetin esas unsuru sermaye masrafıdır.

Tablo - 6
Dünyada Nükleer Elektrik Güç Rezervleri
(Megavat olarak)

Memleketler	Yıllar		
	1960	1966	1971
Birleşik Amerika	600	3 000	8 000
Batı Avrupa	140	4 300	12 500
Büyük Britanya	660	3 800	8 000
Japonya		600	3 000
Kanada		200	1 000
Diğer Memleketler		300	800
Toplam :	1 400	12 200	33 300

Son zamanlarda dünya yakıt ve elektrik harcamasını incelemek ve plânlamak için enerji rezervi ünitesi olarak «(Q) birimi» diye adlandırılan yeni bir birim kullanılmaktadır. Bir (Q) nün değeri aşağı yukarı 10^{21} jul⁵ (veya 277×10^{12} kilovat/saat) a eşittir. Başka bir deyimle, 1 (Q) lük enerji: iyi cinsten 43 milyar ton kömür enerjisine eşdeğerdir. Meselâ, Birleşik Amerika'da klâsik fosiller içinde mevcut atom yakıtının miktarı, 30 (Q)den 130 (Q) ye kadar tahmin edilmiştir. Filhakika, halen kabul olduğuna göre, 6 (Q) bugünkü teknoloji ve bugünkü fiyatlarla elde edilebilecek ve geriye kalan 25 (Q) kısmı ise daha yüksek bir fiyattan üretilebilecektir. Ondan sonra geriye kalan kısımlar için şimdiden bir şey söylenmesi mümkün bulunmamakta ve bu hususta yeni usullerin keşiflerinin etkin olacağı ileri sürülmektedir.

A.B.D. de fosil yakıtlar sarfiyatının 2000 yılında 6(Q) ye, 2050 yılında ise 25 (Q) Ye ulaşacağı tahmin edilmektedir. Şu halde başka enerji kaynaklarından faydalanılmadığı takdirde, Birleşik Amerika'da düşük fiyatlı fosil yakıt rezervi 75 ilâ 100 yılda, ve diğer elde edilmesi mümkün yakıtlar da 150-200 yıl içinde tükenmiş olacaktır. Onun içindir ki Birleşik Amerika, bu yakıtlar tükenmeden gerekli tedbirleri alarak atom enerjisinin üzerine eğilmiştir. Halen dünyada birçok nükleer güç reaktörleri, bilhassa Birleşik Amerika'da, Sovyetler Birliği'nde, Kanada'da, Fransa'da, İngiltere'de, Batı Almanya'da, Japonya'da, İtalya'da ve İsveç'te faaliyette olup, birçok diğerleri de inşa halinde bulunmaktadır. Bu reaktörler tam bir liste halinde Tablo 7 de toplanmıştır. Bunlar halen mevcut veya kurulacak deneme ve araştırma reaktörlerinden ayrı, güç santralleridir.

Artık, nükleer enerji santrallerinin geliştirilerek verimlerinin günden güne arttığı aşikârdır. 1985 yılında Avrupa'yı nükleer enerji santralleri kaplıyacaktır (Tablo 8).

Atomik santrallerin maliyeti, nükleer elektrik üretimine çok tesir etmektedir. Esasen şimdilik, bütün avantajlara rağmen bir atom santralının kurulması zor ve itina isteyen bir iş olması sebebiyle pahalıdır. Birleşik Amerika'da «Shippingport» nükleer santralının fiyatı ilk tahmin olunan 47 milyon dolardan 72 milyon dolara çıkmıştır. «Indian Point» santrali, 53 milyon dolardan 100 milyon dolara ve «Yankee» santralının maliyeti ise, 32 milyon dolardan 52 milyon dolara yükselmiştir.

» 1 jul (joule) = $2,39 \cdot 10^{-4}$ kcal.

Tablo - 7
Dünya Nükleer Güç Santrelleri

Memleket	Reaktör adı	Kapasite (MW)	Güç (MW) ¹	Çalışmaya başlandığı veya başlanacağı tarih
Federal Almanya	KAHL	Graesslebühl/Kahl (Main)	15	Kasım, 1960
	AVR	Jülich	15	1960
	KRB	Gandensbürgen	237	1960
	NOOT	Karlsruhe	50	1966
	KWL	Lingen	230	1968
	KWO	Chargolwitz	233	1969
Hollanda	HTR	Groeneveld/Kahl (Main)	23	1960
Belçika	BR - 5	Mol	30,5	Ağustos, 1972
Kanada	NPD	Rollston	58	Mayıs, 1962
	CANDU - INW - 306	Doughlas Point	243	1960
İspanya	ZORITA - I	Zorita de los Capas	140	1968
	SANTA MARIA	Burgos	160	1970
	DON	Sevilla	360	?
Hollanda	SEP	Dordrecht	47	1960
İtalya	LVINA (SINEA)	Latina (Foce Verde)	200	Aralık, 1962
	GARIGLIANO (SENN)	Garigliano (Sessa Aurunca)	130	Haziran, 1963
	ENRICO FERMI (SELNE)	Trino Vercelline	253	Haziran, 1964
Çekoslovakya	HWGR	Březovar	156	1963
İsviçre	LUCENS	Lucerne	7,5	1966
Hindistan	TARAPUR	Tarapur	360	1968
	RAJASTHAN	Rana Pratap Sagar	200	1968
	KALPAKAM	Madras	495	1973
Fransa	G - 1	Marseille	5	Aralık, 1956
	G - 2	Marseille	40	Temmuz, 1958
	G - 3	Marseille	40	Haziran, 1959
	EDF - 1	Clamart	70	Eylül, 1962
	EDF - 2	Clamart	200	Ağustos, 1961
	CHOOZ (SENA) ²	Sochaux de Chooz	200	1965
	EDF - 3	Clamart	680	1965
	EL - 4	Orsailla, Mont d'Arenic	75	1966
	EDF - 4	Saint-Laurent des-Éaux	100	1960
	KDF - 5	St-Vallier (Dauph)	500	1970
Japonya	JWR	Tokai - Murai	11,7	Ağustos, 1965
	TOKAI - MURA	Tokai - Müge	150	Mayıs, 1965
	TSURUGA	?	200	?
İngiltere	CALDER HALL	Calder Hall	160	Mayıs, 1956
	ANGAN	Chapelcross	180	Eylül, 1958
	DFR	Decemay	15	Kasım, 1955
	BRACKLEY	Bretley	275	Mayıs, 1962
	SHADWELL	Ilkeston	168	Mayıs, 1962
	AGR	Wirclehead	82	Ağustos, 1962
	HUNTERTON	Hunterton	200	Mayıs, 1964
	HINKLEY POINT	Hinkley Point	500	Aralık, 1964
	TRAFALGAR	Truro/Fowey	500	Aralık, 1965
	SEAKING	Swansea	200	Haziran, 1965
	DUNGENESS - A	Dunfermline	275	Haziran, 1965
	OLDBURRY	Oldbury	600	1966
SGHWR	Windsor	90	1967	
WYLFA - 1	Wylfa	300	1968	
WYLFA - 2	Wylfa	500	1969	
İsviçre	R - SADAM	Agno	100	Temmuz, 1968
	B - ABEVA	Marsico, Bielefeld	210	1968
Büyük Amerika	EBWR	Eastham	4,5	Aralık, 1956
	SM - 1	Fort Belvoir	1,9	Mayıs, 1957
	SRE	Rocky Flats	5,1	Mayıs, 1957
	VEWR	Plattsburgh	?	1962 ile çalışılmadığı
	SHIPPINGPORT	Shippingport	60	Aralık, 1957
	DRESDEN	Dresden	200	Eylül, 1960
	YANKEE	Rose	175	Ağustos, 1960
	FM - 2 A	Greenland	1,5	Mayıs, 1960
	BORAN - 5	Elabro Falls	2,7	Eylül, 1962
	PM - 1	Saratoga	1	Eylül, 1962
	FM - 3 A	Antarctica	2,5	Mayıs, 1962
	SM - 1 A	Alaska	1,7	Mayıs, 1962
	SUNCON	Nevada	3,3	Mayıs, 1962
	INDIAN POINT	Indian Point	955	Ağustos, 1962
	SNPP	Hanford	75	Ağustos, 1962
	800 ROCK POINT	Cherokee	32,8	Eylül, 1962
	ERR	Elk River	21	Kasım, 1962
	HUMBOLDT BAY	Humboldt Bay	62	Eylül, 1969
	CVTH	Fort	17	Mayıs, 1965
	PSNP	Trigo	11,4	Haziran, 1965
ENHED KERRI	Laguna Beach	66,3	Ağustos, 1965	
ZBR - 2	Elabro Falls	10,5	Kasım, 1965	
NDR	Rockland	776	Aralık, 1965	
PATHFINDER	Santa Fe	36,5	Mayıs, 1964	
KONRUS	Pratts Heights	66,5	Mayıs, 1964	
EGUL	Oak Ridge	21,3	1965	
HIGR	Pratts Heights	40	1965	
LACBWR	Green	60	1965	
SUN ANOBER	San Clemente	275	1967	
GONNOSTICUT				
YANKEE	Hanford, Nükleer	422	1967	
OYSTER CREEK	Oyster Creek	315	1968	
NINE MILE POINT	Georgetown, N. Y.	500	1969	
Sovyetler Birliği	APS	Obninsk	5	Mayıs, 1954
	SIBIRIAN	Yuzhsk	680	Eylül, 1958
	GURAL - I	Beloyarsk	24	Aralık, 1962
	WWR - I	Novo - Voronej	190	Aralık, 1963
	YES - 5	Obninsk	5,5	1964
	AREUS	Moskova	6,75	Haziran, 1965
	VG-20 (JULYANOVSK)	Moskova	70	Mayıs, 1965
WWR - II	Novo - Voronej	365	1965	
GURAL - II	Beloyarsk	200	1965	
BN - 350	Chernobyl (Kievin deince)	350	1967	
Filipinler	PARADISE POINT	Karakol	132	1968

¹ 1 MW, = 1000 KW olarak.

² Bu reaktör elektrik üretimi amacıyla değil, sadece, hem Belçika'ya ve hem de Fransa'ya enerji sağlamaktır. NOT : İtalya DIMORFAMA tarafından 125 MW, iki reaktör olarak, 1970 yılında ve Almanya BURDIGH - ARAD ile beraber 150 MW, iki reaktör ile 1969'da tasarlanmaktadır.

Tablo - 8
1960 - 1980 Yılları Arasında Dünyada Elektrik Üretimi için İşliyen ve İşliyecek Olan Nükleer Santrallerin Güç Durumu

M e m l e k e t l e r	1960 - 1970 dönemi			1970 - 1980 dönemi		
	Toplam güç (M W e)	Nükleer santral- lerin gücü		Toplam güç (M W e)	Nükleer santral- lerin gücü	
		(M W e)	%		(M W e)	(M W e)
Birleşik Amerika	150 000	5 000	3	190 000	38 000	20
Kanada	25 000	1 000	4	28 000	5 000	18
Büyük Britanya	40 000	5 000	13	65 000	12 000	18
Avrupa Atom Enerjisi Birliği (Euratom)	55 000	4 000	7	115 000	30 000	26
Diğer Avrupa memleketleri	20 000	1 500	7	46 000	5 000	10
Uzak ve Orta Doğu memleketleri (Hindistan, Japonya ve Pakistan dahil)	60 000	4 000	6	100 000	10 000	10
Toplam :	350 000	20 500	6	544 000	100 000	18

İngiltere'de de benzer şekilde fiyat artmaları gözlenmiştir. «Bradwell» santralının fiyatı, 132 milyon dolardan 163 milyon dolara, «Hunterston» santralının fiyatı ise, 107 milyon dolardan 146 milyon dolara çıkmıştır.

Fransa'da da «EDF-1» ve «EDF-2» nükleer santralleri için benzer artmalar tesbit edilmiştir.

Çeşitli sebeplerle öncü reaktörlere göre hesaplanan nükleer elektrik maliyeti büyük olmuş ve bu sebepler, nükleer enerjinin ekonomik olarak rekabet edilebilir bir duruma gelmesinin gecikmesine yol açmıştır. Bununla beraber, atomik elektrik gelecek için çok ümit vericidir. Yani istikbal atomdan üretilen elektriktir.

İngiltere'de kullanılan tabii uranyum-grafit-gaz reaktörlerinde, «Bradwell» ve «Berkeley» gibi istasyonlarda çalışan reaktörlerde tesis bedeli kilovat başına 460 dolar iken, «Sizewell» gibi 1966 da hizmete girecek daha büyük üniteler için tesis bedeli kilovat başına 280 dolar olacaktır. Birleşik Amerika'da zenginleştirilmiş uranyum ile çalışan «Yankee» santrali için 470 \$/kW_e ve «Indian Point» santrali için 390 \$/kW_e olarak tesbit edilen tesis bedelleri bunları tâkibeden santrallerde çok daha düşecektir. Meselâ, 1966 da servise girecek olan «Bodega Bay» santralının tesis bedeli, kilovat elektrik başına 220 dolar olacaktır. Fransa'da da son zamanlarda bu alanda fiyatlarda önemli düşmeler görülmektedir. Meselâ, «EDF-3» atom santralının tesis bedeli, 300 \$/kW_e mertebesindedir.

Ayrıca işletilmekte olan reaktörlerden kazanılan denemeler de çok cesaret vericidir. İlk kurulan kuvvet santrallerinin elektrik güçleri, evvelce tasarlanan sayıların üstüne çıkarılmıştır. Meselâ, «Calder Hall» ve «Ghapelcross» un gücü ortalama olarak 34.5 MW_e iken 45 MW_e yükseltilmiş, «Yankee» santrali için de atomik güç, 110MW_e iken 175 MW_e olmuştur.

Yakın bir gelecekte nükleer elektrik üretiminde kWh Bedelinin çok düşmesi beklenmektedir. Birleşik Amerika'da «Yankee» santrali için elektriğin bedeli 12 mill/kWh⁶ iken «Bodega Bay» santrali için 5.6 mill/kWh olacağı hesaplanmıştır. 600 MW_e lik santrallerde bu enerji maliyeti kilovat saat başına 4.2 mill ve 1000 MW_e lik santraller için ise 3.8 mill olacağı hesaplanmıştır.

⁶ 1 mill = 0.1 sent = 0.001 dolar (Amerika parası) = 0.9 (Türk kuruşu) 1 kWh = 1 kilovat saat.

Bütün bu durumlar, nükleer enerjinin diğerleri yanında çok çabuk yer alacağı'nın bir işaretidir. 1975 yılında Batı Avrupa'da 20 000 MW_e lik nükleer enerji tesisi kurulmuş olacağı ve Avrupa ihtiyacının en az % 6 ilâ % 11 kadarının nükleer yolla üretileceği tahmin edilmektedir.

Avrupa Atom Birliği Teşkilâtı (EURATOM) na mensup altı memleketin (Fransa, İtalya, Batı Almanya, Belçika, Lüksemburg, Holânda) nükleer enerji tesisleri toplamı 1980 yılında 32 000 MW_e olacak ve toplam üretimin % 30 unu sağlayacaktır (Şek. 1).

Avrupa Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Teşkilâtı (OEGD) nın Nükleer Enerji Ajansı (ENEA) da Avrupa'da 1968 den itibaren nükleer tesisler güçlerini yılda 2500 MW_e artırmak suretiyle 1975 yılında atomik gücün 25 000 MW_e e ulaşacağını bildirmektedir (Şek. 2).

DÜNYADA ATOMİK YAKITLAR KAYNAKLARI

Bütün dünyada, atom enerjisi hammaddeleri olan radyoaktif mineral yataklarının prospeksiyonu, aranması, tenor ve rezervlerinin tâyin ve tesbiti ile işletilmeleri aktüel bir önem ve değer taşımaktadır. Uranyum ve toryum ihtiva eden cevherler yeryüzünde nadirdir ve bunların yatakları çok dağınıktır. Dünyada uranyum ve toryum jizmanlarının bulunduğu bölgelerin coğrafi dağılışı Şek. 3 te gösterilmiştir. Ayrıca bilinen uranyum rezervleri Tablo 9 da ve toryum rezervleri ise Tablo 10 da verilmiştir.

Uranyum bakımından zengin depozitler, Belçika Kongosu'nda, Kanada'da, Birleşik Amerika'da, Güney Afrika'da, Japonya'da, Fransa'da, Portekiz'de, Madagaskar'da, Sovyetler Birliği'nde ve Avustralya'da bulunmaktadır.

Genci olarak, primer uranyum cevherleri peşblend (pechblende),⁷ uraninit,⁸ ve Sekonder uranyum cevherleri ise karnotit,⁹ autunit,¹⁰ cleveit¹¹ ve torbernit¹² halinde bulunur. Yani uranyum hammaddeleri, genel olarak uranyum ihtiva eden oksid, karbonat, fosfat ve vanadatlardan müteşekkildirler.

⁷ *Pechblende*, uranyumun en zengin cevheridir. Başlıca siyah uran oksidinden teşekkül eden bu cevher, Kanada, Belçika Kongosu ve Çekoslovakya'da bol miktarda bulunmaktadır. Peşblend, genel olarak siyah opak şeklinde, kahverengi-siyah, koyu gri veya zeytuni yeşil renkte filizler halinde bulunur. Yoğunluğu 6.5-8.5 ve sertliği ise 5-6 arasındadır. Uranyum tenörü % 90 dir. Bileşimi (U₃O₈) veya (2UO₃ . UO₂) ile gösterilebilir.

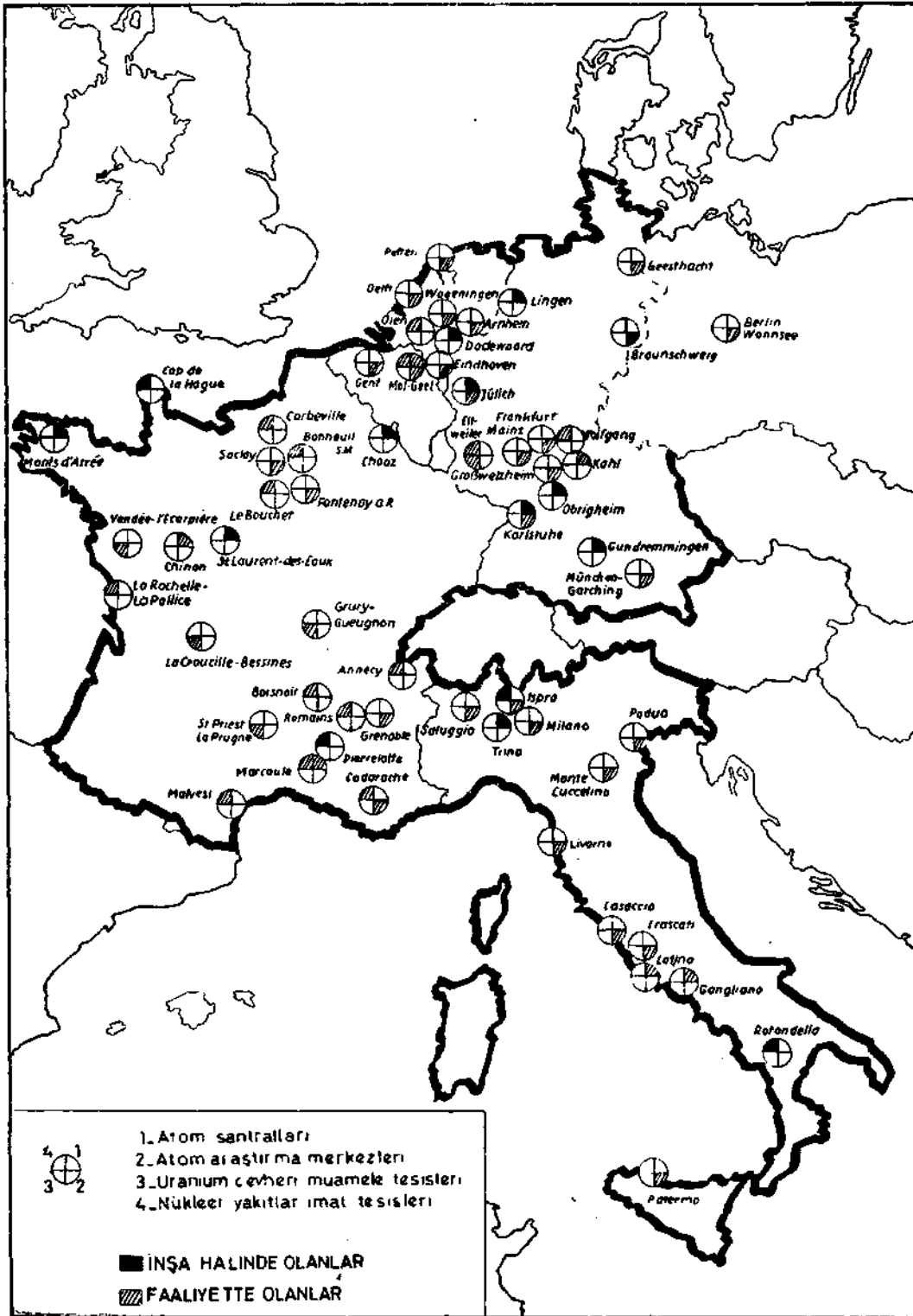
⁸ *Uraninit*, mat veya parlak, kahverengi, yeşil veya kurşuniye çalar, zifte benzer bir siyahlıktadır. Yoğunluğu 7.5-9.7 ve sertliği ise 5-6 arasındadır. Tenörü ortalama % 80 dir. Başlıca yatakları Joachimsthal'da (Çekoslovakya), Kanada'da Büyük Ayı gölünün (Great Bear Lake) doğu kıyısında bulunan «La Bine» burnu dolaylarında ve Shinkolobwe (Katanga) da bulunmaktadır. Buralardan başka, İsveç, Norveç ve Doğu Afrika'da mevcut granit pegmatitlerinde de fazla miktarda fakat düşük tenörde mevcuttur.

Karnotit cevheri, uranyumun önemli bir filizi olup, ayrıca vanadyum ve potasyum ihtiva eden san renkteki ince ortorombik kristal taneciklerinden ibarettir. Yoğunluğu 4.5 ve sertliği de 4 tür. Bazı yerlerde kumtaşları halinde geniş saha kaplamaktadır. Kimyasal bileşimi : [(K, Na, Ga, Cu, Pb), [(UO₂)₂ (VO₄)₂] . 3H₂O] dur. Başlıca yatakları; Katanga, Colorado ve Utah'ta bulunur. Karnotitten eskiden radyum, ondan sonra vanadyum ve bugün ise uranyum çıkarılmaktadır. Kalsiyum-uran-vanadinitten müteşekkil bir zengin yatak da halen Tuju Mujun (Fergana) da işletilmektedir.

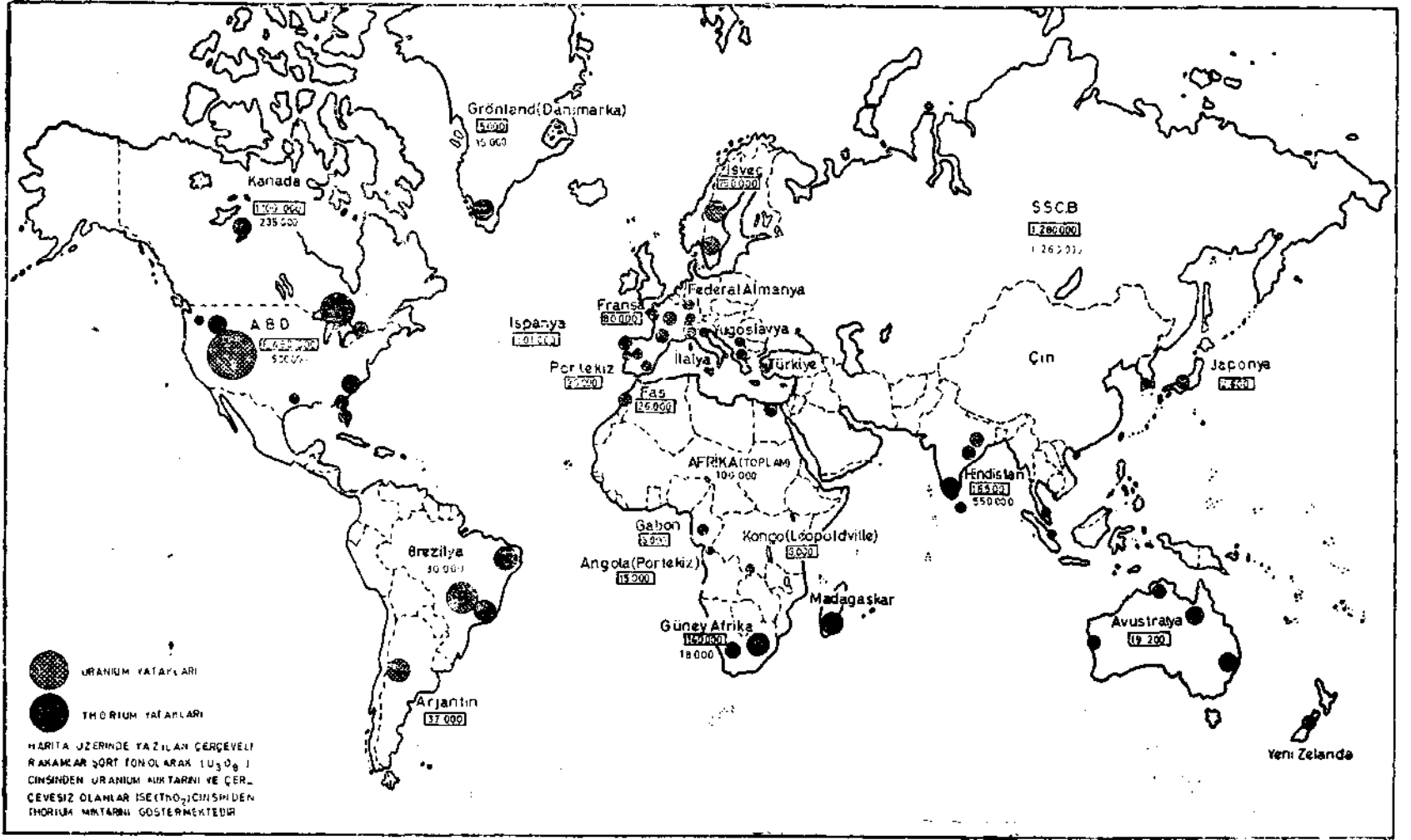
¹⁰ *Autunitin* kimyasal bileşimi : [Ca(UO₂)₂ (PO₄)₂.10-12.H₂O] dur. Görüldüğü gibi kalsiyum uranyum fosfattır. Limon şansı rengindedir. Yoğunluğu 3.1, sertliği ise 2-2.5 arasındadır. Tenörü % 55-62 dir. Ekseriya uraninite asosiye şekilde bulunur.

¹¹ Kristal suyu kaçmış uraninitten ibaret olan *cleveit*. İskandinavya yarımadası (bilhassa Norveç'te) pegmatitlerinde yterbium, toryum, argon ve helyum ile birlikte bulunur. Tenörü % 60 tr.

¹² Bakır uranit halinde ve [(PO₄)₂ (UO₂)₂.Cu.8H₂O] kimyasal bileşiminde bulunan *torbernitin* yoğunluğu 3.4-3.6 ve sertliği de 2.0-2.5 arasındadır. Genellikle %61 kadar (UO₂) ihtiva edebilir. Başlıca yatakları: Wölsendorf (Almanya), Cornwall (İngiltere) ve Katanga (Kongo) da bulunmaktadır.



Sek. 1 - Avrupa Atom Birliğinde (EURATOM) nükleer enerji durumu.



Şek. 3 - Dünyada uranyum ve toryum rezervleri.

Tablo - 9
Dünya Uranyum Rezervleri
(U_3O_8 cinsinden)

Memleket	(şort ton) [1]
Birleşik Amerika	1 490 000
Sovyetler Birliği	1 280 000
Kanada	1 100 000
İsveç	750 000
İspanya	301 000
Güney Afrika Birliği	140 000
Fransa	80 000
Arjantin	37 000
Fas	26 000
Portekiz	25 000
Avustralya	19 200
Hindistan	16 500
Angola (Portekiz)	15 000
Kongo (Léopoldville)	6 000
Gabon	5 000
Grönland (Danimarka)	5 000
Japonya	2 700
İtalya	2 600
Batı Almanya	2 800
Türkiye	900
Diğer memleketler (toplam)	33 500
Toplam :	5 338 200

[1] 1 şort ton U_3O_8 = 770 kg uranyum metali.

Tablo - 10
Dünya Toryum Rezervleri
(ThO_2 cinsinden)

Memleket	Şort ton [1]
Sovyetler Birliği	1 260 000
Birleşik Amerika	600 000
Hindistan	550 000
Kanada	235 000
Afrika (toplam)	100 000
Seylan	56 000
Brezilya	30 000
Güney Afrika Birliği	18 000
Batı Afrika	17 000
Grönland (Danimarka)	15 000
Nyassaland (Rodezya)	11 300
Avustralya ve Güney Doğu Asya (toplam)	10 000
Diğer memleketler	24 000
Toplam :	2 926 000

[1] 1 şort ton ThO_2 = 795 kg toryum metali.

Uranyumun ikinci önemli kaynağını, kompleks yapılı bazı mineral yatakları teşkil etmektedir. Bunlara bir misal olarak, Birleşik Amerika'da Colorado platosunu örten büyük kumtaşı (gre) tabakaları arasında yer yer saklanmış olarak bulunan ve küçük poşlar halinde tezahür eden karnotit yataklarını gösterebiliriz. Bu yataklar, aynı zamanda radyum¹³ bakımından da kıymetli olup, evvelce dünyanın radyum ihtiyacının büyük bir kısmını karşılamakta idi. Buna benzer birçok yataklar, Birleşik Amerika'nın diğer çeşitli bölgelerinde ve dünyanın birçok kısımlarında (Arjantin, Kolombiya, Peru, Bolivya, Şili, Fas) keşfolunmuştur. Gevherin tonunda ortalama olarak 1 kg uranyum vardır. Buna benzer yataklar, Avustralya'nın kuzeyinde (Rum Jungle) ve güneyinde (Radium Hill) bulunmaktadır. Güney Afrika'da altın filizleri içinde de kuars ile karışık olarak uranyum bulunmaktadır.

Deniz fosfatlarından da yan ürün olarak bir miktar uranyum elde etmek mümkündür. A.B.D. nin güneydoğusundaki fosfat ocakları buna misal olarak gösterilebilir. İsveç'te ve Sovyet Rusya'da Leningrad civarında bulunan bazı kil tabakalarında da uranyum elde etmenin mümkün olduğu anlaşılmıştır.

Toryum ise, urandioksit ile karışık şekilde torianit¹⁴ ve torit¹⁵ primer cevherleri halinde Tayland, Malaya, Tasmanya, Yeni Zelanda, Formosa ve Kore'de ve monazit¹⁸ kumu şeklinde Hindistan ve Brezilya'da bulunmaktadır. Hindistan'da en önemli monazit zuhurlarını, Hint yarımadasının güney ucundaki Travankore-Gochin eyaletinin sahillerinde bulunan monazitli kum zonu teşkil etmektedir (kumlar % 7.9 kadar toryum ihtiva ederler). Burada 2 500 ton yıllık kapasiteli bir konsantrasyon tesisi halen faaliyettedir. Daha düşük monazitli kum sahaları ise Brezilya'da bulunmaktadır.

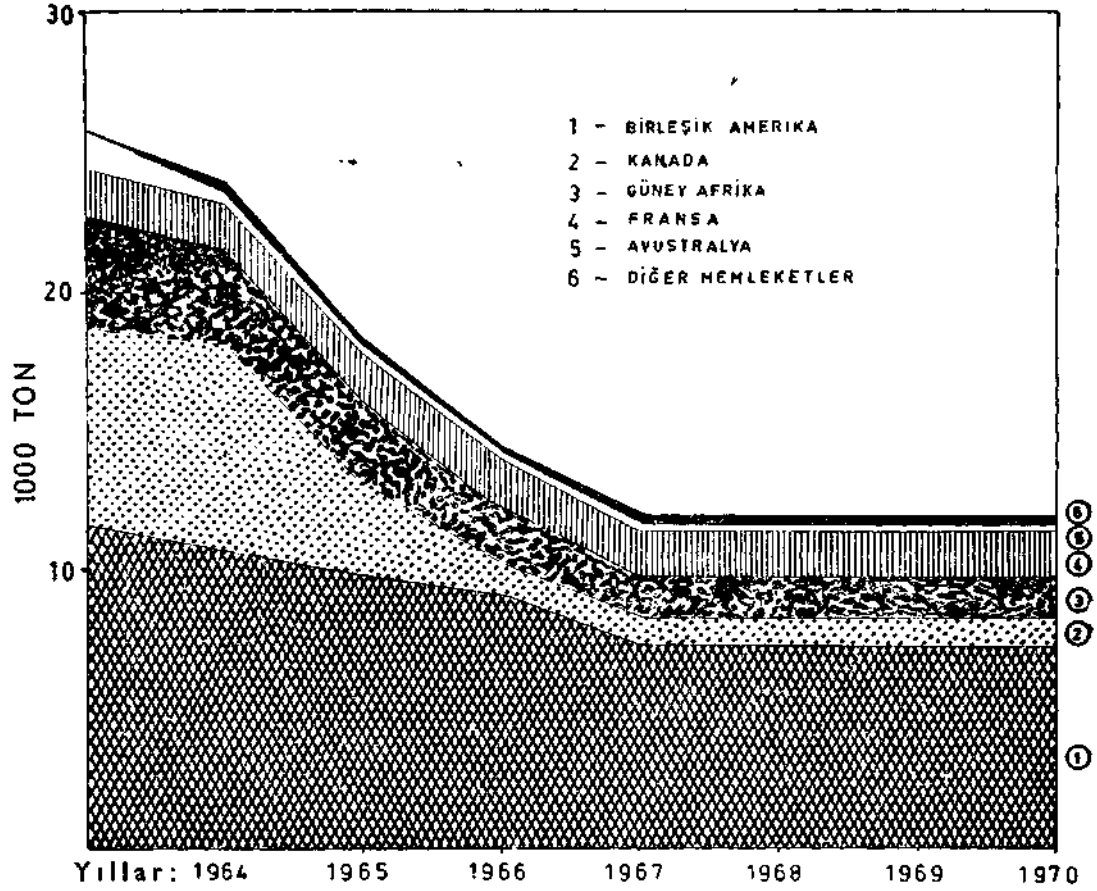
Dünya uranyum üretimi, askerî sebepler yüzünden 1953 ilâ 1957 yılları arasında büyük artışlar kaydetmiş ve üretim 1958 de 35 000 ton, 1960 ta 42 000 ton olmuş ve 1961 de ise 35 000 ton (U_3O_8) u bulmuştur. Fakat 1962 yılında Cenevre'de imzalanan atom silâhlarının yasaklanması ile ilgili uluslararası anlaşma gereğince, bu tarihten itibaren uranyum üretimi düşmeye başlamıştır. Şek. 4 teki diyagramdan da görüldüğü gibi bu azalma, 1967 yılına kadar devam edecek ve ondan sonra da atomun barışçı gayelerle kullanılmasına paralel olarak sivil maksatlar için üretime devam edile-

¹³ Kuvvetli bir radyoaktiviteye sahip olan ve kurşuna dönüşünceye kadar bu radyoaktiviteyi binlerce yıl muhafaza eden (1590 yıl) radyum (Rd), yalnız uranyum cevherlerinde ve çok az miktarda (3 milyonda bir arasında: yani 3 ton uranyum cevherinde takriben 1 gr radyum) bulunur. 1 gr radyumun verdiği radyoaktivitenin karşılığına küri (curie) denir ve bu birim, bugün radyoaktivite ölçüsünün standard birimidir.

¹⁴ Toryum ve uranyum oksit karışımından ibaret olan *torianit*; siyah renkte muntazam kübler halinde bulunur. Yoğunluğu 5.5-9.5 ve sertliği ise 6.5-8 arasındadır. Bilhassa Seylan adasında % 50-90 (ThO_2) ve % 22 (U_3O_8) ihtiva eden poşlarda bulunur. Madagaskar ve Sibirya'da da bu cevherlerden çıkarılmaktadır.

¹⁵ Kimyasal bileşimi $ThSiO_4$ olan *torit*, koyu kahverenginde, siyaha çalar cam parlaklığında veya koyu turuncu, yağimsı parlak, şeffaf veya yarı şeffaf halde bulunur. En çok % 22 (U_3O_8) ihtiva edebildiğinden, bu cevherlerden uranyum üretimi için de faydalanılmaktadır. Yoğunluğu 4.5-5.4 ve sertliği ise 4.3-5.0 arasındadır. Yanında nadir toprak minerallerine de raslanmaktadır. Bilhassa Norveç pegmatitlerinde bulunmaktadır.

¹⁶ Toryumun en tanınmış minerali olan *Monazit*, beyaz, açık sarı, koyu kahverengi kristallerden müteşekkildir. Bilhassa cerium, lanthan neodym ve praseodym gibi nadir toprakların fosfatları yanında bulunur. % 19 toryum ihtiva ederler. Brezilya monazit kumlarının toryum tenörü çok düşüktür (% 8-9). Monazitin yoğunluğu 4.9-5.3 ve sertliği ise 5.0-5.5 arasındadır. Hindistan'daki «Trovancore» monazit kumları yeryüzü monazit yataklarının % 75 ini teşkil ederler. Birleşik Amerika'da da North Carolina'da vardır.



Şek. 4 - Dünya uranyum üretimi.

çektir. 1958 de (U_3O_8) in fiyatı kilogram başına 26 dolar iken, 1962 de 17.5 dolara düşmüş ve son yıllarda da 11 dolara ve hattâ bazı yerlerde 9 dolara kadar inmiştir.

Tabiatte bulunan uranyum filizi : % 99.28 ${}_{92}U^{238}$, % 0.715 ${}_{92}U^{235}$ ve % 0.0058 ${}_{92}U^{234}$ izotoplarından¹⁷ ibarettir. Bu izotopların yarı ömürleri sırasıyla : 4,49. 10^9 ; 7,13. 10^8 ve 2,48. 10^5 yıldan ibarettir.

Nükleer yakıt olarak, tabii uranyum kullanılması halinde, muhtelif fizikokimyasal işlemler¹⁸ ile uranyumda bulunan fisil (U-235) oranını artırmak mümkündür. Böylece izotop ayrılması yapılarak % 2 den % 95 e kadar zenginleştirilmiş uranyum elde edilir. Muhtelif memleketler için çeşitli yıllara göre, nükleer elektrik enerjisi üretiminde gerekli tabii ve zenginleştirilmiş uranyum miktarları Tablo 11 de gösterilmiştir.

¹⁷ İzotoplar, aynı kimyasal elementin değişik atomlarıdır. Bunların hepsi çekirdeklerinde aynı sayıda proton ve dış kısımda aynı sayıda elektronu ihtiva ederler. Böylece aynı kimyasal özellikleri taşıyan bu atomları bir diğerinden ayıran nokta, çekirdeklerindeki nötron sayılarının farklı oluşu ve bunun sonucu olarak da atom ağırlıklarının değişik oluşudur.

¹⁸ Bu iş için Birleşik Amerika Hükümeti, Oak Ridge'de dev bir tesis kurmuştur. Bu tesis «osmos usulü» denilen bir metod ile çalışmaktadır. Bu metoddan başka, «termal difüzyon» ve «elektromanyetik usul» denilen iki metod daha vardır. İzotopların separasyonu sahasında Fransızların da çok ileri çalışmaları vardır. Fakat bütün bu usulleri uygulayan tesisler çok pahalıya mal olmuştur.

Tablo - 11
Dünyada Nükleer Elektrik Enerjisi Üretimi İçin Muhtelif Yıllarda Sarfedilmiş ve Sarfedilecek Uranyum Miktarları
(ton olarak)

Memleketler	Uranyum cinsi	Yıllar		
		1960	1966	1971
Büyük Britanya	Tabii uranyum	1 400	3 000	5 000
Batı Avrupa	Tabii uranyum	390	1 940	3 970
	Zenginleştirilmiş uranyum	650	2 270	4 480
Birleşik Amerika	Zenginleştirilmiş uranyum	900	2 960	6 920
Japonya	Tabii uranyum		690	2 080
Kanada	Tabii uranyum		150	460
Diğer memleketler	Tabii uranyum		120	190
	Zenginleştirilmiş uranyum		120	200
Toplam :	Tabii uranyum	1 790	5 900	11 700
	Zenginleştirilmiş uranyum	1 550	5 350	11 600

Normal olarak dört muhtelif tip ve konsantrasyonda (U-235) nükleer yakıtı ile karşılaşmak mümkündür. Bunlar sırayla: % 0.7 (U-235) ihtiva eden tabii uranyum, % 2 (U-235) ihtiva eden hafif konsantre uran, % 20 (U-235) ihtiva eden konsantre uran ve % 90 kadar (U-235) ihtiva eden yüksek konsantrasyonlu uran nükleer yakıtlarıdır. Bu sonuncu yakıtlar, genellikle alüminyum veya bizmut ile alaşım halinde kullanılmaktadır.

Bugün için, nükleer yakıt olarak kullanılmaya müsait ancak üç muhtelif eleman vardır. Bunlardan bir tanesinin yani (U-235) in, yukarıda belirttiğimiz gibi, tabii halde bulunmasına karşılık, diğer ikisi yani (U-235)¹⁹ ve (Pu-239)²⁰, bir üretici (breeding) sisteminin²¹ sonuçları olarak elde edilebilir.

¹⁹ (Uranyum-233) yani ${}_{92}\text{U}^{233}$, (toryum-232) elementini nötron bombardımanına tutmak suretiyle üretilir. Çünkü, toryum bizzat fisyonu uğrıyamaz, fakat nötron yutarak fisyonu müsait (U-233)ü verir.

²⁰ (Plutonyum-239) yani ${}_{94}\text{Pu}^{239}$, transuran (uran ötesi) bir element olup, tabiiatta mevcut değildir. Ancak (U-238) elemanını nötron bombardımanına tabi tutmak suretiyle elde edilir. Genel olarak uranyum reaktöründe bir yan üretim mamulü olarak elde edilen plütonyumun bu çeşit üretim tarzına «kuluçka üretme» denir. Birleşik Amerika'da Columbia nehri kenarında Hanford'da büyük bir plütonyum fabrikası kurulmuştur.

²¹ Bu sistemi uygulayan «breeder» denilen üretici (kuluçka veya yumurtlayıcı) reaktör, enerjiyi üretirken kullandığı nükleer yakıttan daha fazlasını meydana getiren reaktördür. (U-238)i fisil uranyuma dönüştürür veya (Th-232) den fisil (U-233) elde eder ve böylece fisil olmayan elemanlardan yakıt yapar. Meselâ İskoçya'da kurulan 60 MW gücündeki «Dounreay» reaktörü «breeder» tipi bir hızlı yenileme reaktörüdür.

Nükleer yakıt cinsine göre, atom reaktörlerini altı muhtelif sınıfa ayırmak mümkündür.²² Bunlar sırasıyla : Tabii uranyumlu, yani ancak yedi (U-235) ihtiva eden nükleer yakıt ile çalışan reaktörler, hafif konsantre uran ihtiva eden nükleer yakıt ile çalışan reaktörler, konsantre uran ihtiva eden nükleer yakıt ile çalışan reaktörler ve yüksek konsantre uran yakıtı ile çalışan reaktörlerdir. Bütün bunlardan başka, (U-233) ve (Pu-239) ile çalışan toryum ve plütonyumlu reaktörler de vardır.²³

Genel olarak zenginleştirilmiş ve tabii uranyum ile çalışan enerji üretim santrallerinin, karakteristiklerine göre maliyet farkları şöyle kıyaslanabilir: Grafit moderatörlü bir tabii uranyum santralının kuruluş maliyeti oldukça yüksektir, kilovat başına 2400-2800 TL. dir. Kullanılan (U₃O₈) in uluslararası piyasa fiyatı kilogram başına 180 TL. dir. Su moderatörlü, zenginleştirilmiş uranyumlu, nükleer santrallerin kuruluş maliyeti nispeten düşüktür ve kilovat başına 2000-2200 TL. dir. Buna karşılık, alçak derecede zenginleştirilmiş uranyumlu santraller için ise, bu rakam 1850 ilâ 2500 TL. arasındadır. Bu iki halde de-nükleer elektriğin kilovatının toplam maliyeti aşağı yukarı eşittir ve kömür yakan santrallerde elde edilen elektriğin toplam maliyetinden biraz düşüktür. Kömür yakan bir termik santralin kuruluş maliyeti ise, kilovat başına 1425 TL. sı civarındadır. Fakat, işletme masrafları atom santralının takriben iki katıdır.²⁴

Birleşik Amerika'daki «General Electric» ve «Westinghouse» şirketleri, takriben 479 milyon TL. sına 3000 megavat gücünde, anahtarı üzerinde teslim atom santralleri kurmayı bütün dünya piyasasına teklif etmektedirler. Bu nükleer santrallerde, alçak derecede zenginleştirilmiş uranyum kullanılacaktır. Meselâ, İngiltere'de inşa edilmekte olan «Dragon» reaktörü, atom santrallerinin gelişimine güzel bir numunedir. Bu reaktör, yakıt olarak % 20 zenginleştirilmiş uranyum, grafit ve toryumdan müteşekkil topaklar kullanmaktadır. Bu tip nükleer santrallerin kuruluş maliyeti, kilovat başına 1450 TL. sı gibi gayet ekonomik bir değer civarında olacaktır.

Nükleer yakıt olarak kullanılan tabii uranyumun²⁵ gerçekten birtakım önemli nitelikleri vardır. Şöyleki: 1 kilogram tabii uranyumun termik eşdeğeri, yani vereceği enerji miktarı, takriben 800 ilâ 1100 ton kadar maden kömürünün vereceği enerjiye

²² Atom reaktörlerinin diğer tasnif tarzları ise şöyle özetlenebilir:

I. Reaktörler iki grupta sınıflanır. Şöyleki:

a) Termal reaktörler (bir moderatör yardımıyla elde edilen yavaş nötronlar fisyon meydana getirirler).

b) Hızlı reaktörler (bunlarda moderatör bulunmaz ve yüksek enerjili nötronlar fisyon meydana getirirler). Meselâ, Nevv Mexico'daki «Los Alamos» hızlı reaktörü 10 kw gücünde olup, yakıt olarak (Pu-239) kullanır.

II. Bu tasnif tarzında ise reaktörler gene iki sınıfa ayrılır:

a) Heterojen reaktörler (yakıt elemanları arasında yan yana moderatör de bulunur).

b) Homojen reaktörler (bunlarda yakıt ve moderatör, karışık ve homojen bir akışkan teşkil eder).

III. Bu tip sınıflama ise özelliklerine göre adlandırmadan ibarettir. Meselâ, kaynar sulu reaktör, basınçlı su tipi reaktör, sodyum-grafit reaktörü gibi.

²³ Bir atom reaktörünün başlıca elemanları şunlardır: Nükleer yakıt maddesi (U-235, U-233, Pu-239... gibi); moderatör, yani yavaşlatıcı (ağır su, grafit... gibi); kontrol çubukları (kadmiyum, bor... gibi); reflektör (âdi su, ağır su, grafit, berilyum...); soğutucu (hava, karbondioksit gazı, su buharı, su, ağır su, sodyum, civa ve sodyum-potasyum karışımı); koruyucu zırh; nötron huzme (demet) borulan ve nötron (flux) akışını ölçen apareyler.

²⁴ Bütün bu ekonomik kıyaslamalarda, her iki tip santralin ömrü, 30 yıl kabul edilmiştir.

²⁵ Bir ton granit içerisinde dağılmış bulunan tabii uranyumun kalorifik değeri takriben 15 ton taşkömürünün termik değerine eşittir.

eşit bir enerjidir. 1000 kilovat saatlik bir enerji üretimi için takriben 125 kg taşkömürü ve 400 kg linyit kömürü veya 85 kg petrol gerektiği halde 0.04 gram (U-235), bu iş için yeter miktardır. Çünkü 1000 kilovat saatlik ısı enerjisi meydana getiren bir atom reaktöründe zincir reaksiyonları²⁶ sayesinde 10 katrilyon, yani 10^{15} kadar atom dezentegrasyona uğrar, yani parçalanır ve 450 gram tutarındaki (U-235) in bitmesi aşağı yukarı 15 ay sürer. Bu miktardaki (U-235) in meydana getireceği enerji ise takriben 1300 ton maden kömürünün sağlayacağı termik enerjiye eşdeğerdir.

Bütün buraya kadar yapılan tetkik ve açıklamalardan görüldüğü gibi, nükleer yakıtlardan enerji kaynağı olarak faydalanabilmek için radyoaktif maden cevherlerinden atomik hammaddelerin anıklanması lâzımdır. Bu iş çok zor ve pahalıdır, özel ve karışık kimyasal ve metalurjik işlem ve materyele ihtiyaç vardır. Ayrıca işletmede de bilgi ve maharet şarttır. Bunun için bu gibi işlerde yetmişmiş ve ihtisas sahibi olmuş elemanları çalıştırmak lâzımdır.

Genel olarak şunu söylemek isteriz ki, son zamanlarda dünyadaki ülkelerin çoğu, uranyum cevheri prospeksiyonu ile ekstraksiyonu ve düşük tenörlü cevherlerin zenginleştirilmesi için en rantabl metodları bularak ve geliştirerek en fakir radyoaktif mineral yataklarından bile faydalanmak için âzami gayret sarfetmektedirler.

Meselâ, Yugoslavya'da zayıf tenörlü cevherler buldukları yerlerde, yığınlar halinde asitlerle yıkanmak suretiyle zenginleştirilmeye tabi tutulmaktadır. Düşük tenörlü küçük cevher yatakları için ayrı ayrı cevher zenginleştirme tesisleri kurulması pek ekonomik olmadığı cihetle, Portekiz'de günde 35 tonluk üretimi olan yarı seyyar bir cevher zenginleştirme tesisi kurulmuş bulunmaktadır (%75 U_3O_8 elde olunuyor).

Avustralya'da sahil kumundaki monazitler, toryum üretimi için asitle muamele görmekte ve % 95 tenörlü toryum cevheri üretilmektedir. Monazitten toryum elde edilirken, konsantrasyonda seryum da hâsıl olmaktadır. Birleşik Arap Cumhuriyeti Devletlerinden Mısır'da da fosforlu organik bileşiklerle ekstraksiyon ve separasyon denenmiş ve sıvı halinde iken toryumun çoğaldıkça, seryumun azaldığı görülmüştür.

Macaristan'da karbonat bakımından zengin radyoaktif cevherlerdeki karbonatın redüksiyonu, yani indirgenmesi, flotasyon ve asit muamelesi ile yapılmaktadır. Arjantinliler ise, cevher üretiminin maliyetinin düşürülmesi için, katı ve sıvı iyon alışverişini denemişler ve ara ürün olarak (yellow cake) amonyum-uranyum-trikarbonatı kullanmışlardır.

Rusya'da (UO_2) nin oksidasyonu konusunda, nitrat asidi ve demir iyonlarının rolü etüd edilmiş ve iyi neticeler alınmıştır. Keza, Batı Almanya'da iyon alışverişi ve sıvı ekstraksiyon metodları ile saf (U_3O_8) solüsyonu ve uranatlar elde edilmiştir.

Fransa'da üç büyük cevher konsantrasyon tesisi vardır. Fransızlar artık fiziksel cevher zenginleştirme usullerini yavaş yavaş terketmekte ve daha ziyade hidrometalojik

²⁶ Zincir reaksiyonu, nükleer enerjinin fisyon halinde açığa çıkmasına sebep olan reaksiyondur. Bundan bir anda muazzam enerji doğar. Bu fisyon olayı, son derece kısa bir zaman içinde olup biter (milyonda bir saniyenin birkaçı). Bu olay sonunda doğan sıcaklık milyonlarca derecelik şiddettedir. Esası fisyon olan ve ilk defa yeryüzünde gerçekleştirilen nükleer infilâk, 1945 yılı Ağustosunda Hiroşima'ya atılan atom bombası (esasen bu bir hızlı reaktördür) ile vuku bulmuş olduğu hatırlardadır. Bu bombanın patlayıcılık kudreti, en kuvvetli klâsik patlayıcı olan (TNT) trinitro-tolüenin 20 000 tonunun kudretine eşittir (20 kilotonluk bomba). Bir (kt) kiloton demek, TNT nin bin tonu demektir. 20 kt luk normal bir atom bombasının vereceği enerji 230 milyon kilovat-saatlik bir enerjiye tekabül eder ki, bu da 30 yıl gece gündüz çalışan 100 beygirlik bir dinamonun vereceği enerjiye bedeldir. Son yıllarda (U-233) gömlekli ve (Pu-239) çekirdekli, 500 kilotonluk atom bombalan yapılmıştır.

metodları uygulamaktadırlar. Narbonne'daki uranyum metali üreten tesislerde uygulanan metod da geliştirilmiştir. Burada günde 30 kiloluk ve 60 kiloluk saf uranyum metal briketleri üretilmektedir. Bunların 60 kilolukları barışçı amaçlarla kullanılacak tesislere tahsis edilmek üzere (CEA) Atom Enerjisi Yüksek Komiserliğinin emrine verilmektedir.

Sonuç olarak şunu söyleyebiliriz ki, Dünyada atomik hammadde ve nükleer yakıtta olan ihtiyacın çok büyük olduğu bugünlerde ve gelecek için, düşük tenörlü cevherlerin ve küçük yatakların değerlendirilmesi ile ilgili tekniklerin geliştirilmesi ve nükleer yakıt üretim masrafını azaltmak amacı ile geniş ölçüde etüd ve araştırmalara hızla devam etmek bütün uluslar için ortak bir görev sayılır.

TÜRKİYE'NİN NÜKLEER ENERJİ ALANINDAKİ ARAŞTIRMALARI

Türkiye'nin atom çalışmaları, 27 Ağustos 1956 yılında yürürlüğe giren Atom Enerjisi Kanunu ile kurulan Türkiye Cumhuriyeti Atom Enerjisi Komisyonu tarafından yürütülmektedir. 2 Şubat 1964 tarihine kadar Başbakanlığa bağlı olarak faaliyette bulunan işbu Komisyon, bu tarihten sonra, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığına bağlanmıştır. Komisyonun daimî Genel Sekreterliği Ankara'da olup, birinci Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi İstanbul'da Çekmece civarında kurulmuş ve ikinci Nükleer Merkez ise Ankara'da kurulmak üzeredir.

Çekmece gölü kenarında, eski Nakkaş Çiftliği arazisinde kurulmuş olan Nükleer Araştırma Merkezinde, bir atom reaktörü ile çeşitli nükleer etüd ve araştırma lâboratuvarları (çekirdek fiziği, teorik fizik, plâzma fiziği, radyobiyojoloji, elektronik, sağlık fiziği, radyokimya...v.b.) vardır. 27 Mayıs 1962 tarihinde bu Merkezde çalışmaya başlayan ve «(TR-1) reaktörü» adını alan «swimming pool» (yüzme havuzu) tipi bir eğitim reaktörü, 1 MW kapasitededir. % 90 zenginleştirilmiş (Uranium - 235)²⁷ ile çalışan ve Amerikalıların A.M.F. (American Machine and Foundry Company) firması tarafından kurulan bu heterojen deneme reaktörünün moderatörü âdi sudur. Halen, bu reaktörde [Au- 198 (radyo - altın), Ir - 192 (radyo - iridium), P - 32 (radyo - fosfor), Zn - 65 (radyo - çinko), Cr-51 (radyo - krom), Ca-45 (radyo - kalsiyum), Na-24 (radyo - sodyum)] gibi muhtelif periyod (yan ömür)²⁸ lu radyoaktif elementler üretilmekte ve başta üniversitelerimiz olmak üzere, muhtelif kurumlara faydalanılmak üzere dağıtılmaktadır.

Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi, Türkiye'deki İstanbul Teknik Üniversitesinin Nükleer Enerji Enstitüsü, İstanbul Üniversitesinin Fen Fakültesi Atom Fiziği Enstitüsü ile Tıp Fakültesi, Ankara Üniversitesinin Fen ve Tıp Fakülteleri, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ege Üniversitesi Fen Fakültesi ve Birleşik Amerika'daki «Brookhaven» Ulusal Lâboratuvarı ile daimî bilimsel ve teknik işbirliği halindedir.

²⁷ Nükleer yakıt miktarı: 2705.54 gramdır.

²⁸ Yarı ömür (periyod), atomların parçalanması ile bir miktar radyoaktif elemanın kitesinin yarıya inmesi için gereken zamandır. Muhtelif radyoelemanların yarı ömürleri pek farklıdır. Bu süre, bir saniyeden çok küçük olabildiği gibi, milyonlarca yıl da olabilir. Meselâ, uranyum ${}_{92}\text{U}^{234}$ un periyodu 5.10^9 yıl, radyum ${}_{88}\text{Ra}^{226}$ nın 1600 yıl, kurşun ${}_{82}\text{Pb}^{214}$ un 26,8 dakika ve polonyum ${}_{84}\text{Po}^{213}$ un ise 3.10^{-7} saniyedir. Bu sebeple radyoaktif elemanlar, aralarında yarı ömürleri ile mukayese edilirler.

T. G. Atom Enerjisi Komisyonu, bir taraftan da memleketimizin günden güne artan elektrik enerjisi ihtiyacını²⁹ atom enerjisi ile karşılamak için atom santrallerinin kurulması ile ilgili çalışmalar yapmaktadır. Türkiye'de nükleer elektrik üretimi projesinin gerçekleştirilmesi Üçüncü Beş Yıllık Kalkınma Plânına bırakılması kararlaştırılmıştır. Bu hususta E.İ.E.İ. (Elektrik İşleri Etüd İdaresi) ile İ.T.Ü. (İstanbul Teknik Üniversitesi Nükleer Enerji Enstitüsü) ortak etüdler yapmaktadırlar.

Türkiye'de radyoaktif mineral aramaları 1957 yılından beri M.T.A. Enstitüsünce yürütülmektedir. Bugüne kadar otomobile ve uçağa bindirilmiş apareylerle karadan ve havadan uçuşlarla birçok prospeksiyonlar gerçekleştirilmiştir.

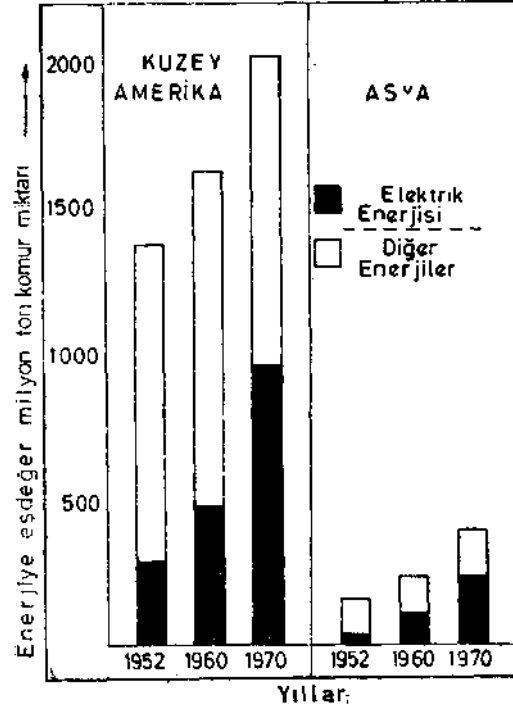
Bu çalışmalar silsilesinden olarak, 494 000 kilometre kare havadan, 40 000 kilometre oto ile, 73 226 kilometre kare yerden ve 8871 kilometre kare de detaylı prospeksiyon yapılmıştır. Bu arada birtakım sondaj, kuyu, galeri ve yarma gibi maden arama işlemleri de uygulanmıştır.

Radyometrik etüdlere Neojen ve yakın zaman sedimanlarına münhasır bir çalışma tarzı izlenmektedir. Başlangıçta, daha ziyade granitler içinde autunit ve daha sonra siyenit ve flüoritler içerisinde uranyum prospeksiyon ve aramaları yapılmış ve bilâhara Menderes masifinde metamorfik şist ve gnayslar detaylı etüde tabi tutulmuştur. Tektonik faaliyetler civarında bulunan formasyonlar, uranyum cevheri bakımından daha ümitlidir. Prospeksiyonlar sonunda daima yeni anomaliler tesbit edilmekte ve bu anomalilerin yorumlanmasına gayret edilmektedir.³⁰

Bütün bu sistematik çalışmalar sonucunda memleketimizin iki bölgesinde zengin radyoaktif cevher yatakları bulunmuştur. Bunlardan en önemlisi Kuzey Menderes bölgesindedir. Manisa-Köprübaşı-Kasar-Salihli bölgesinde sedimanter formasyonlar içinde yapılan prospeksiyonlarla 610 ton (U_3O_8) e tekabül eden cevher rezervi bulunduğu

²⁹ Halen, Türkiye'de nüfus başına düşen brüt enerji üretimi, yılda 142 kwh (kilovat saat) olup, Orta Doğu memleketleri ortalaması civarındadır (Şek. 5). Sarfedilen bütün gayretlere ve hızlı gelişme temposuna rağmen, Avrupa ülkelerinin sonuncusu durumundayız. 1964 yılında dahi Macaristan'ın 1938'deki (143 kwh/nüfus) seviyesine ulaşamamıştır. Yapılan Kalkınma Plânı tam gerçekleştiği takdirde 20 yıl kadar sonra, 1985 te ulaşabileceğimiz merhale, nüfus başına 1274 kwh olacaktır. 1962 yılındaki $3,412 \cdot 10^6$ kwh olan elektrik enerjisi üretimi, 1963 yılında 3 832 500 000 kilovat saat ve 1964 yılında ise, 4309 100 000 kilovat/saat olmuştur. Bu değer, Avrupa'nın, bugünkü ortalamasının altındadır (1640 kwh/nüfus). Keban enerji barajı ve santrali tamamlanınca, yıllık üretim gücü 5.5-6 milyar kwh civarında olacaktır. 1985 te elektrik enerjisi üretimimizin $53 \cdot 10^9$ kwh/yıl mertebesine varacağı öngörülmüştür. Halbuki aynı yılki ihtiyacımız $56,3 \cdot 10^9$ kwh olarak tahmin edilmiştir. Buna göre, $3,28 \cdot 10^9$ kwh lik bir enerji açığı bulunacaktır ve bu açığın ileride artacağı da aşikârdır.

³⁰ Bu hususlara, Üçüncü Uluslararası Atom Enerjisi Barışçı Gayelerle Kullanılması Konferansı (1964, Cenevre) da M.T.A. Enstitüsü Genel Direktörü Dr. Sadrettin Alban tarafından işaret edilmiştir.



Şek. 5 - Enerji üretim kıyaslaması.

tesbit edilmiştir. Kasar yatağında gevşek bir şekilde konsolide olmuş çakıl, silt, kum ve kil içinde de ince taneler halinde yayılmış Sekonder uranyum mineralleri de bulunmuştur. Bu yataklar, açık işletmeye elverişli ve ana yollara yakın bulunmaktadır. Buralardan elde edilecek uranyum madeninin kilogramının 12.5 dolar mertebesinde olup, dünya piyasasına yakın bir değerde olabileceği hesaplanmıştır.

Güney Menderes masif bölgesinde ise, Aydın-Muğla havalisinde, Koçarlı, Çavdar, Söke, Demirtepe, Kisir, Osmankuyu, Karacahayıt, Milas, Kargıcak ve Selimiye'de şistler ve gnayslar içerisinde 250 ton (U_3O_8) şeklinde uranyuma tekabül edecek cevher rezervi tesbit edilmiştir. Yalnız bu bölgede cevherin derinde bulunuşu, yol ve işletme imkânları durumu dolayısıyla elde edilen uranyum dünya piyasa fiyatlarına göre çok pahalı olacağı ve takriben ortalama olarak kgl'nin 65 dolar değerinde olacağı ileri sürülmektedir. Ayrıca, Kütahya civarında Emet'te ve Eskişehir civarında Sivrihisar'da da uranyum yatakları bulunduğu anlaşılmıştır. Sivrihisar'daki mümkün rezerv ile Emet'te bulunacak miktarı, görünür ve muhtemel rezerve katmak suretiyle halen takriben 965 ton (U_3O_8) rezervli depozitimiz bulunduğu görülür (Tablo 12). Bu miktar uranyum, 150 ilâ 200 megavatlık güçte bir tabii uranyum reaktörünü 20 yıllık amortisman müddetinin takriben yarısı süresince çalıştırmaya yetecek kadardır. Çünkü 200 MW lık bir santral, 250 ton kadar tabii uranyum yüklenir ve yılda 60 ton kadar harcanır.

Tablo - 12
Türkiye'de Radyoaktif Cevher Depozitleri

<i>Madenin yeri</i>	<i>Görünür-muhtemel rezerv (U_3O_8) olarak (ton cinsinden)</i>	<i>Muhtemel fiyat (U_3O_8) olarak (dolar cinsinden)</i>
Kasar-Salihli-Manisa	610 (% 0.1 tenörlü)	11-20 \$ kg
Demirtepe-Söke-Aydın	100	45-90 \$ kg
Kisir-Söke-Aydın	30	
Karacahayıt-Söke-Aydın	15	
Milas-Muğla	150 (% 0.1-0.2 tenörlü)	50-60 \$ kg
Emet-Kütahya	Tesbit edilmemiş	
Sivrihisar-Eskişehir	60 (mümkün)	
Toplam :	965	

Bununla beraber, Türkiye'de uranyum aramalarının yeni olduğu ve henüz yüzölçümünün 1/4 ünün tarandığı ve Türkiye'nin jeolojik yapısı gözönüne alınınca, yakın bir gelecekte rezervin artacağı tahmin edilebilir. Halihazırda, Demirci, Taşarman ve Gökeyüp ve civarındaki anomalilerin kıymetlendirilmesine çalışılmaktadır. Ayrıca, Eskişehir-Beylikasır ve Kayseri-Çukur'da toryum mineralizasyonları tesbit edilmiştir.

Netice olarak şunu söyleyebiliriz ki, yapılan plânlı çalışmalar sayesinde Türkiye'de halen bulunan ve ileride daha fazla artacağı tahmin edilen bu yeni birincil enerji kaynağının da enerji üretimimizde rolü büyük olacaktır. Sadece 0.1-0.2 (U_3O_8) ihtiva eden uranyum cevheri miktarı 1.5 milyon ton olarak tesbit edilmiştir. Şimdi yüksek tenörlü U_3O_8 «yellow cake»³¹ in elde edilmesi için cevher zenginleştirme ve tretman denemeleri yapılmaktadır. İleride kurulacak iyon mübadele konsantrasyon tesisi ile %80 U_3O_8 «yellow cake» üretililecektir.

³¹ Bunun için Türkçede «san pasta» deymi kullanılmaktadır.

Birleşmiş Milletler Atom Enerjisi Ajansı uzmanı Dr. Cameron'un M.T.A. Enstitüsünde yaptığı çalışmalar sonunda verdiği rapora göre, üretim kapasitesi yılda 50 ton (U_3O_8) olan bir tesis için 56 milyon liralık bir yatırım yapmak lâzımdır. Bu sermayenin 8 764 000 TL .sı yerli yatırım olacak ve 7518 000 lirası ise dış finansmana ayrılacaktır. Buna göre, ortalama üretim maliyetinde yarım kilogram (U_3O_8) in fiyatının 3.76-4.17 dolar olması gerekmektedir. Köprübaşı-Kasar bölgesindeki cevherimizin maliyeti ise, bu fiyatın üstünde ve 8 dolar civarında bulunmaktadır. Yurdumuzda kurulacak modern uranyum zenginleştirme tesisleriyle elde olunacak «yellow cake»in yarım kilosu takriben 4.5 dolar civarında olacaktır. Elde olunacak bu «yellow cake»ler, 1970 yılından itibaren ekonomik bir şekilde rekabetle satılabilecek,³² veya kendi memleketimizde kendi projelerimiz için kullanılabilecek ve stok yapılabilecektir.

SONUÇLAR

Dünya enerji tüketimi gittikçe arttığından, ve fosil yakıt rezervleri de az ve sınırlı olduğundan, yeni enerji kaynaklarına duyulan ihtiyaç, bugün artık herkesçe bilinen bir gerçektir. İnsanlık bunun için atomun barışçı gayelerle kullanılması ile ilgili uygulama bakımından atom enerjisine başvurmak zorunda kalmıştır. Atomik hammadde, dünyanın muhtelif yerlerinde (hattâ Okyanus'larda bile) bol miktarda bulunduğundan, nükleer enerji üretimi için yakıt imalinde bir sıkıntı bahis konusu olamayacaktır.

Yapılan bütün tetkiklerden anlaşılıyor ki, halen atom enerjisinden üretilen elektriğin maliyeti, klâsik termik santrallerden elde edilen elektriğin maliyeti civarındadır. Ancak daha büyük ünite güçlerine gidilmesiyle ve uranyum bedeli ile zenginleştirme, imalât ve proses masraflarındaki düşmeler ile nükleer enerji üretiminin maliyetinde zamanla büyük bir azalma olacaktır. Yapılan tahminî hesaplara göre, nükleer santrallerde uygulanan tekniğin hızla gelişmesinden dolayı üretim maliyetinin yılda % 4 kadar ineceği, ayrıca 10 yıllık bir aralıkta ünite güçlerinin iki misline çıkmasının da üretim maliyetini % 22 kadar düşüreceği mümkün görülmektedir.

Halen çeşitli tipte atom santralleri muhtelif memleketlerde çalışmakta ve birçokları da kuruluş halindedir. Kalkınmış ve endüstrileşmiş ülkelerde olduğu gibi gelişmekte olan memleketlerde de bol miktarda ve ucuz elektriğe ihtiyaç vardır. Hızla kalkınmakta olan Türkiye'mizde de 20-25 yıl sonra enerji ihtiyacımızı karşılamakta güçlük çekeceğimiz aşikârdır. Onun için bundan böyle, yurdumuzda da nükleer enerjinin birincil enerji kaynakları arasında sayılması ve derhal etüd edilmesi zorunluğu vardır. Gelecek Üçüncü Beş Yıllık Kalkınma Plânını nükleer santrallerin kurulması projesi muhakkak gerçekleştirilmelidir. Bu alanda kaybedilecek vaktimiz yoktur.

Bugüne kadar sistematik bir şekilde M.T.A. Enstitüsü tarafından gerçekleştirilen radyoaktif mineral prospeksiyon ve aramalarının daha da hızlandırılması ve bulunan uranyum cevherlerinin ekonomik olarak zenginleştirilmesi için en rantabl usulleri seçerek uygulamak yoluna girmenin, atomik enerji ihtiyacımızın sağlanmasını garanti etmekte takip edilecek en uygun yol olduğu kanısındayız.

³² Dünya piyasasında hammadde ticareti zenginleştirilmiş uranyum olan %65 (U_2O_8) üzerinden yapılmaktadır.