

## BİRİNCİL ALÜMİNYUM ÜRETİM TEKNOLOJİLERİNE GENEL BİR BAKIŞ

Erman CAR  
Metalurji Mühendisi

### Özet :

Bu çalışmada dünyada yaygın olan birincil alüminyum teknolojilerine ilişkin genel bir bilgi verilmeye çalışılmıştır.

**Birincil alüminyum üretimi**, birbirinden bağımsız 4 süreçten oluşur :

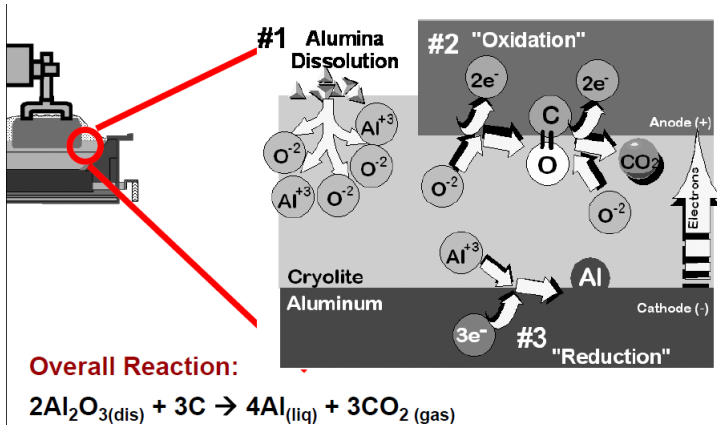
1. Boksit madenciliği
2. Boksit cevherlerinden Bayer Prosesi ile alümina üretimi,
3. Alüminadan “ergimis tuz elektrolizi (Hall-Herault Prosesi)” ile metalik alüminyum üretimi,
4. Enerji üretimi ya da temini.

Şekil 1 : Birincil alüminyum üretim süreçleri:



Günümüz dünyasında, ticari boyutta birincil alüminyum üretiminin tamamı alüminyum elektroliz hücrelerinde gerçekleştirilmektedir. Hall-Heroult yöntemi olarak bilinen elektroliz yoluyla alüminyum üretim prosesi yerine, alternatif yöntemler üzerinde uzun süreden beri çalışılıyorsa da ve hatta bazı pilot tesisler kurulmuş olsa da, bu yöntemlerin endüstriyel uygulama alanı bulacaklarına dair tüm ümitler kaybolmuş gibidir. 100 yılı aşkın geçerli olan klasik yöntemin daha uzun yıllar bizimle birlikte olacağı artık kesinleşmiş ve araştırmalar bu yöntemin performansını artırma yönünde yoğunlaştırılmıştır. Dünyada yapılmakta olan ve planlanan tüm birincil alüminyum tesisleri Hall- Heroult yöntemine dayalıdır.

Şekil 2: Şematik olarak alüminyum elektrolizi



Yaklaşık 150 yıl önce ticari anlamda üretime başlanan alüminyum hala çok genç bir metal olmasına karşın, insanoğlunun binlerce yıl boyunca kullandığı bakır, kalay ve kurşunun bugünkü toplam üretimlerinden çok daha fazla bir miktarda üretilmektedir.

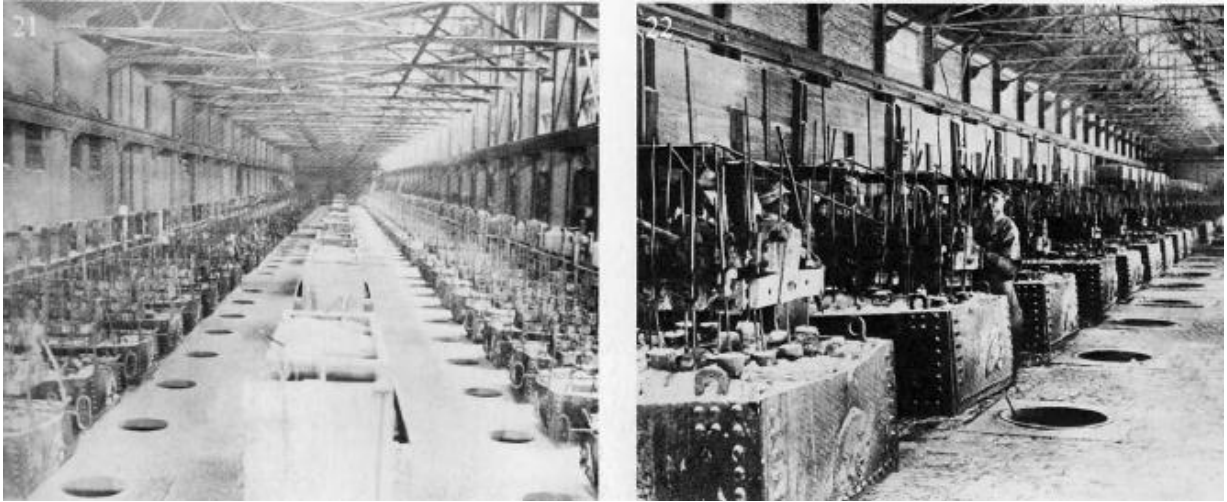
## 1. BİRİNCİL ALÜMİNYUM TEKNOLOJİLERİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ

### Enerji ve Ekolojik Etkilerle Değişim Süreci

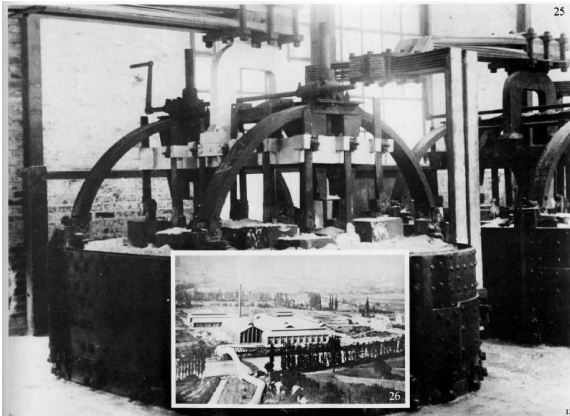
Birincil alüminyum üretimi için, yatırımlar, enerji ve çevresel duyarlılık anlamında tarihsel olarak üç dönemden sözedilebilir:

- **A dönemi**, 1886-1888 yıllarında Hall-Herault elektrolitik prosesi ile başlar ve 1970'li yılların ortalarına kadar sürer. Bu dönem enerjinin yoğun olarak kullanıldığı ve çevresel kaygıların olmadığı bir dönemdir ve bu uzun dönem kullan-at düşüncesinin planlı olarak uygulandığı yıllara karşı gelir. Özellikle II. Dünya Savaşı sonrası yaşananlar, ekonomik zorluklar sonucu enerji üretim tesislerine, hammadde endüstrilerine ve enerji israfına olanak veren yapılaşmalara hızlı yatırımlar yapılmıştır. Genel kaniya göre 1950-1960 yılları arasında alüminyum altın çağını yaşamıştır. 1973 yılındaki Petrol Krizi'ne kadar enerji kullanımı ve çevresel kaygılar hep ikinci planda kalmıştır. 1973 yılında Petrol Krizi ile birlikte A dönemi bir gece içinde son bulmuştur. Bu dönem 10 kA'lık elektroliz hücrelerinde 1 kg. alüminyum üretmek için 50 kWatt.saat enerji harcanan dönemlerden 180 kA'lık hücrelerin çalıştığı ve 1 kg. alüminyum üretmek için 14-14.5 kWatt.saat enerji harcanan döneme kadar sürdü.

Şekil 3 : Elektroliz hücreleri 1912 Alcoa:



Şekil 4: Alcoa Tennessee 1914:



- **B dönemi**, Petrol Krizi sonrası enerji tüketimi ve çevresel kaygıların ön planda olduğu dönemdir. "Borunun sonuna gelmek" olarak tanımlanan bu dönemde otomotiv sektöründeki katalitik konverterlerin geliştirilmesine benzer düşünüşle, birincil üreticiler özellikle elektroliz hücrelerde yeniliklere ve değişikliklere gitmişlerdir.

Yeniden değerlendirme olgusunun gündeme geldiği ve giderek güçlendiği ve daha az enerji ile daha fazla üretim düşüncesinin yerleştiği dönem olmuştur. Bu dönem yaşanan sorunların parça parça çözümlendiği ve A dönemine taban tabana zıt bir dönemdir.

Sonuç olarak kuşkusuz etkileyici sonuçlara ulaşılmıştır ve dönemin en başarılı ülkesi Japonya'dır. Enerji santralleri için gerekli yakıtı bile dışalım yolu ile karşılayabilen Japon birincil üreticileri hammadde-enerji üçgenini tersine çevirerek -ki Nippon Hafif Metaller Grubu Genel Müdürü'nün söylemi ile Fuji Dağı'nı ters çevirerek-krizi atlatmışlardır. 180 kA'lık elektroliz hücreleri ile enerji tüketiminin kg. alüminyum başına 14-14.5 kwatt.saatlere düşürüldüğü, Soderberg hücrelerin terkedilmeye başlandığı ve sonraki büyük değişim döneminin teknolojik altyapısının hazırlandığı dönemdir.

- **C dönemi**, 1980'li yılların ortasından başlayan ve tüm sistemlerin yeniden tasarlandığı bir dönemdir. Bu döneme geçiş bilimsel çalışmaları ve gelişmelerin maliyetlerinin dikkate değer rakamlara ulaşması ile başlamıştır. Şu anda içinde bulunduğumuz 3. Endüstri Devrimi döneminde, B döneminde gündeme gelen daha az enerji ile daha çok üretim yaklaşımı artarak değerini koruyacaktır ve teknolojik gelişmelerin itici gücü olacaktır. Bununla birlikte günümüzde ve gelecekte daha yeşil teknolojiler ve ürünler artarak önem kazanacaktır. Endüstrileşmiş ülkelerde devlet etkisi ile yapılmaya başlanan kullanım ömrü analizi (a life cycle anaysis) nin yaygınlaşması ile devlet ile birlikte, bu verilere göre malzeme seçimi ve üretimi senaryoları oluşturulacaktır. Tüm bunlar, alüminyumun malzeme özellikleri dikkate alındığında yeniden yeni altın çağını yaşamasının olanaklı olduğunu göstermektedir.

1980-1985 yılları arasındaki 5 yıllık dönemde ulaşılan teknolojik gelişimin düzeyi, geçmiş yaklaşık yüzyıllık düzeyle karşılaştırıldığında, neredeyse eşdeğerdir. Bu döneme kadar 180 kA'lık hücrelerden 320 kA'lık dev hücrelere (320 kA'lık hücreler üretim yapmakta olup 500 kA'lık hücreler yavaş yavaş yaygınlaşmakta ve 700 kA'lık hücreler projelendirilmektedir) geline ve 1 kg. alüminyum üretimi için 12.5 kWatt.saate enerji harcadığı, Soderberg teknolojisinin büyük ölçüde terkedilerek, bilgisayar kontrollu ve otomatik alumina beslemeli modern prebaked hücrelerin devreye alındığı, gaz salınımlarının minimize edildiği dönemdir.

Şimdi tüm hesaplar 2020 yılında, malzeme teknolojisindeki gelişmelere koşut olarak birincil alüminyum üretim kapasitesinin 50.000.000 tona ulaşacağı üzerine yapılmaktadır.

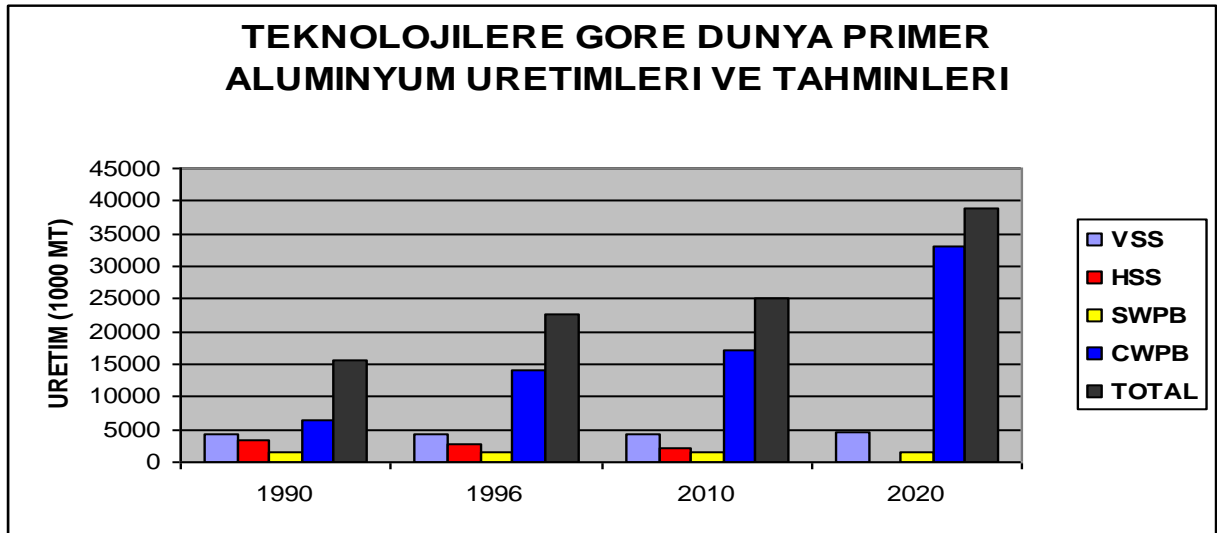
Şekil 5 : Alcoa Fjardaal birincil alüminyum tesisi



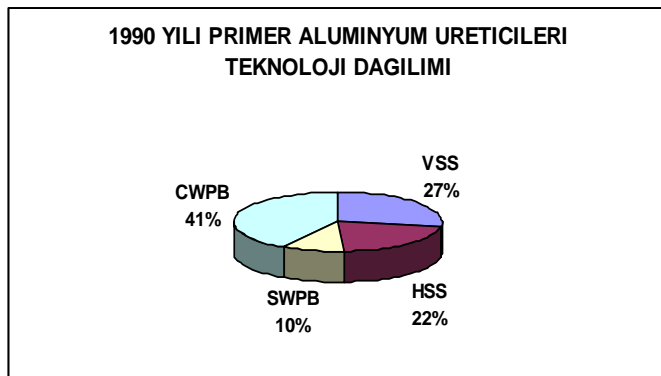
Tablo 1: Üretim, yatırım bedeli, çevre kirliliği ve enerji tüketimi ilişkilerinin dönemsel değişimi.

Dönem	Ayrırt edici özellik	Etkiler
<b>A</b> 1975 Petrol krizine kadar	<b>Makina çağı</b> Kaynakların yanlış kullanımı ve tamamen demode teknolojiler	Enerji savurganlığı ve kirlilik
<b>B</b> 1980'li yılların ortalarına kadar	<b>Hataların onarımı</b> Teknolojilerin yeniden tasarlanması	Enerji tutumluluğu ve çevre kirliliğinin azaltılması
<b>C</b> Bugün ve gelecekte baskın olan yatırımlar	<b>Hatadan kaçınma</b> Tamamen yeni sistemlerin kullanılması	Minimum enerji tüketimi ve çevre kirliliği

Şekil 6 : Teknolojilere göre birincil alüminyum üretimi:

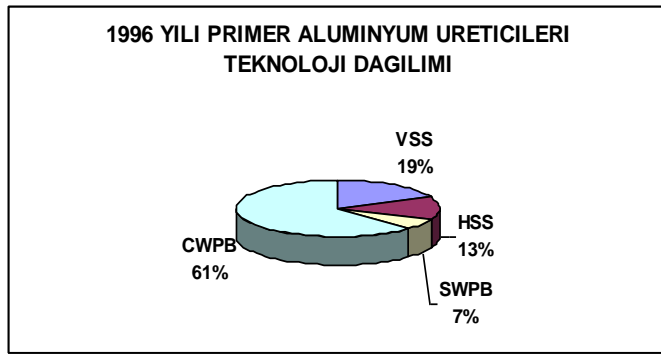


Şekil 7: Birincil alüminyum üreticileri teknoloji dağılımı 1990



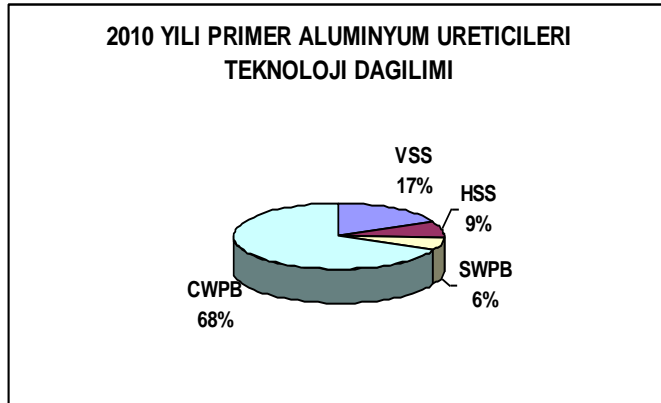
1990 yılında toplam yıllık alüminyum üretimi 15.700.000 ton iken, bu üretimin % 49'u Soderberg teknoloji ile % 51'i ise Prebaked teknoloji ile üretilmekteydi.

Şekil 8 : Birincil alüminyum üreticileri teknoloji dağılımı 1996



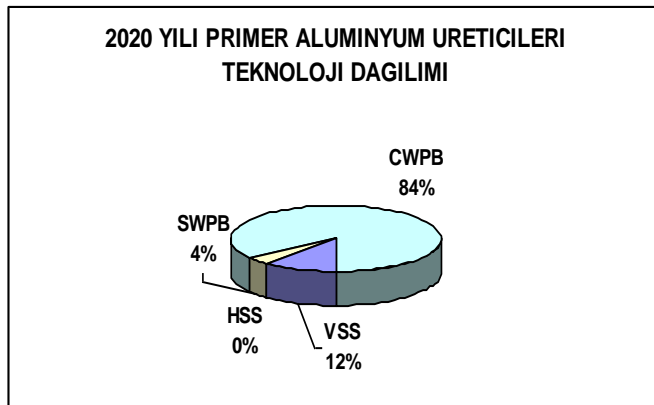
1996 yılında ise toplam yıllık alüminyum üretimi 22.700.000 tona ulaşmıştır ve bu üretim içinde Soderberg teknolojisinin payı % 32'ye düşerken Prebaked teknolojisinin payı % 68'e çıkmıştır. Bu süreçteki önemli bir gelişmede nokta besleme sistemlerinin yaygınlaşmasıdır.

Şekil 9 : Birincil alüminyum üreticileri teknoloji dağılımı tahminleri 2010:



2010 yılında toplam alüminyum üretiminin 37.000.000 tona ulaşması öngörülmektedir ve elektroliz prosesindeki gelişmeler ile ekolojik kaygılardan ötürü Prebaked teknolojisi ile üretimin payının % 76'ya çıkması beklenmektedir. Prebaked teknoloji içinde ağırlıkta olan CWPB sistemler nokta besleme ile birlikte dizayn edilmektedir.

Şekil 10: Birincil alüminyum üreticileri teknoloji dağılımı tahminleri 2020:



2020 yılında toplam alüminyum üretiminin 50.000.000 tona ulaşması öngörülmektedir ve benzer nedenlerle Soderberg teknolojisinin payı % 12'ye düşerken, Prebaked teknolojisi ile üretimin payı % 88'e çıkacaktır.

Birincil alüminyum üretiminde araştırmalar, pilot tesisler ve endüstriyel prototip uygulamalarhemen hemen tümüyle enerji canavarı olarak adlandırılan elektroliz işlemine odaklanmıştır. Bütün çabalar enerji tüketimini ve çevreye zararlı salınımları düşürmeye yöneliktir. Alüminyum üretim teknolojisinde görülen gelişmelerin en önemlileri aşağıdaki gibi sıralanabilir :

- Kimyasal prosesin kontrolü ve analitik ölçümlerdeki gelişmeler,
- Tasarım ile ilgili matematiksel modellerin ve simulasyon programlarının geliştirilip uygulanması,
- Proses kontrolünün otomatikleşmesi ( otomatik hücre kontrolü,



- Hücre yapısında daha kaliteli malzeme kullanımı,
- Nokta kırıcılar ve alümina besleme sistemlerindeki gelişmeler.

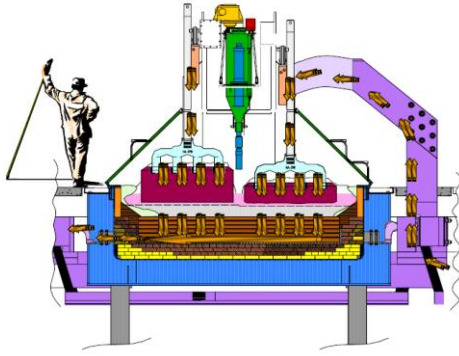
Üretim teknolojisindeki gelişmeler, aşağıda sıralanmış olan son yıllarda ulaşılan bazı veriler ile daha somut olarak görülebilir:

Tablo 2 : Birincil alüminyum teknolojisindeki gelişmeler

	1950-1969	1970-1979	1980-1983	1984-1988	1989-2000
Akım şiddeti (kA)	30-120	145-155	175-220	280-300	500
Akım verimi (%)	80-85	87-92	93-95	94-95	95.9
Enerji tüketimi (kWh/kg.Al)	15.5-20.0	13.9-15.5	12.9-13.5	12.9-13.5	13.39
Birim üretim (ton Al/hücre)	0.3-1.0	1.0-1.3	1.5-1.7	2.0-2.4	3.5-3.8
Hücre ömrü (gun)	700-1100	1200-1800	2000-3000	2200-3300	>3300
Besleme yöntemi	SW+CW	CW+PF	PF	PF	PF
Besleme miktarı (kg. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /kırma)	100-250	3-100	1-3	05-2	0.5-2

Şüphesiz yukarıdaki değerlere ulaşmak, ancak yeni tesislerle mümkün olacaktır. Eski tesislerin bu potansiyelden yararlanma düzeyi alt yapılarının modifikasyona uygunluğu ile doğru orantılıdır.

Şekil 10 : Modern elektroliz hücresi:



**Çağdaş teknolojilerin ortaya koyduğu potansiyelden yararlanmanın bir diğer koşulu da anodun Prebaked olması ya da Soderberg'ten Prebaked'e dönüştürülmüş olmasıdır. Tipik örnek olarak söylenebilir ki, bugün Çin'deki bütün Soderberg tesisler, ya kapanmış ya da Prebaked tesislere dönüştürülmüştür.**

Bugün dünyada Soderberg anotlu sistemler, Prebaked anotlu sistemlere dönüştürülmektedir.

İnşaa halinde olan ve planlanan tüm tesisler Prebaked anot tipine dayalıdır. Soderberg anotlu sistemleri iyileştirmeye yönelik araştırma-geliştirme çalışmaları ise gündemden çıkmıştır.

Şekil 11: 320 kA Prebaked hücre –Aostar-Çin



#### Yüksek akım şiddetine sahip hücreler

Birincil alüminyum üretimindeki tüm gelişmeler, yüksek akım şiddetinde ve düşük enerji tüketimi ve emisyon değerlerinde çalışmaya yöneliktir. Bir birincil alüminyum üretim tesisi planlanırken, öncelikle toleranslı bir kapasite seçilir. Bugün teknolojik gelişimin getirdiği olanaklar, 10 yıl öncesine kadar 100.000 ton/yıl olarak belirlenen optimum ekonomik kapasiteyi 200.000 ton/yıla yükseltmiştir. Kapasite seçiminin ardından

kapasite ile uygulanacak akım yoğunluğu arasında bir denge kurulur.

Burada akımın uygulanabilecek aralığın en üst sınırında olması çok önemlidir. Çünkü yüksek akım yoğunluğu, belli bir kapasitede, daha az sayıda hücrenin dizayn edilip kurulmasına olanak sağlar. Saptanmış bir kapasitede hücre sayısının az olmasının yatırım ve işletme maliyetleri açısından avantajları şu şekilde özetlenebilir :

- İnşaat yüzey alanının, hücre toplam yüzey alanına oranı azaldıkça, birim yıllık üretime, inşaat bedelinin payı düşer.
- Hücre hizmetleri ve proses kontrolü için gereken bazı ekipman ve araçlar ile yedek parçaların toplam maliyetleri akım ile değil, hücre sayısı ile doğru orantılıdır. Bu etmenlerin yıllık birim üretim maliyetlerine etkileri büyüktür ve yatırım bedellerinin düşmesinde payları önemlidir. Belirli bir akım şiddeti için optimum yatırım maliyeti, aynı silikon redresör istasyonu için, kabul edilebilir maksimum sayıda hücre olduğunda gerçekleşir. Serideki hücre sayısı düştüğünde toplam yatırım maliyetinin % 13-15'i tutan SR istasyonunun maliyeti çok az etkilenir.

Bu nedenle hücre sayısının, bazı faktörlerin etkisi ile, belirli bir sınırın altında olması zorunluluğu var ise de, daha düşük akım yoğunluklu teknolojiyi seçmek daha ekonomik olabilir.

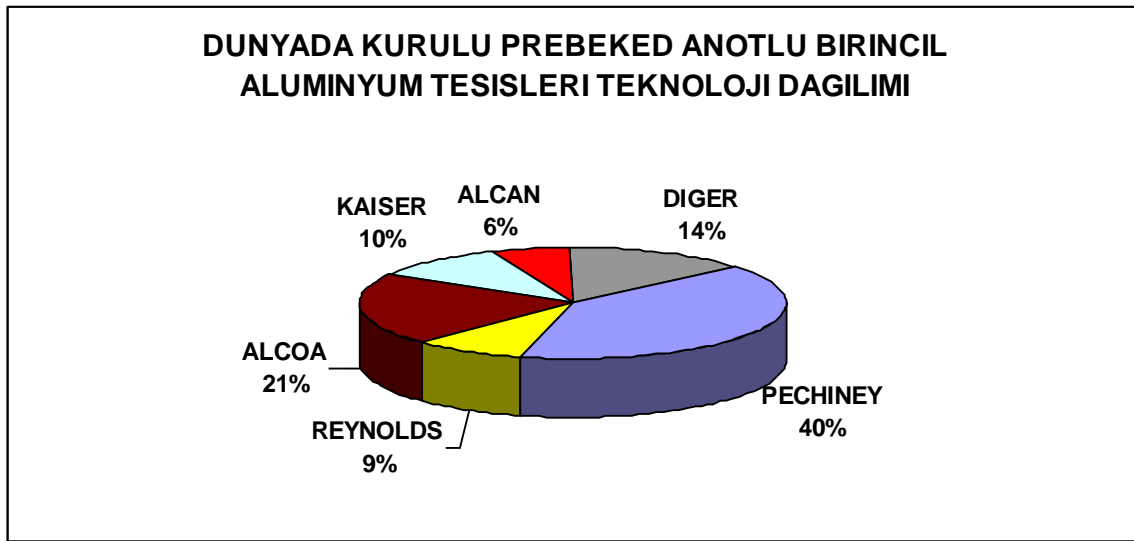
- Yukarıdakine benzer nedenlerle, belirli bir akım için, hücre sayısı arttıkça, birim üretim başına gereken yatırım bedeli azalır. Ancak bu azalış, bir noktada ani bir değişim gösterir. 1 ton ek üretim için yapılacak bir yatırım SR istasyonunda asgari kapasite ve özellikle yatırım yapılmasını gerektireceğinden, toplam yatırım bedelinde ani bir artış olacaktır.
- Yüksek akımlı hücrelere sahip tesislerde, aynı akım yoğunluğuna ve ısı izolasyon seviyesine sahip hücrelerdeki akım şiddeti ve hücre boyutundaki artış ısı kaybı/enerji girdisi oranını düşüreceğinden, enerji tüketimi açısından avantaj sağlayacaktır.
- Akım şiddetinin artışı hücre sayısının azalmasına, buna karşılık hücre boyutunun artmasına olanak sağladığından, modern teknolojilerin getirdiği otomasyon sistemlerinin de katkısı ile de işçiliğin maliyet içindeki payı düşecektir. Çünkü işçi sayısı akım şiddetine bağlı olmayıp, hücre sayısı ile ilgilidir.

### **Prebaked Anotlu Üretim Teknolojileri**

Alcan'ın Pechiney'i, Hydro'nun VAW'yu satın almasından önce, kurulu Prebaked anotlu birincil alüminyum fabrikalarının % 40'i Pechiney teknolojisini tercih etmişti. Reynolds'un devreden çıkması ve Kaiser'in Hatch adıyla tesis kuran değil, kurulu tesislere mühendislik hizmeti veren bir kimliğe bürünmesinden sonra, Alcan destekli Pechiney teknolojisinin yaygınlığı daha da artmıştır.

*Kurulu kapasitenin yaklaşık %86'sını oluşturan bu teknolojiler arasındaki farklılıkların analizini yapmak gerektiğinde ise, gerek bilgilerin gizliliği gerekse elektroliz prosesinin proses anlamında değişmediği dikkate alınığında kalem kalem bir liste yapmak mümkün değildir. Bununla birlikte bir çok birincil alüminyum tesisi, başlangıç teknolojisine, zaman içinde özgül koşullarının zorlaması ile yenilikler katmaktadır ya da bu amaçla mühendislik firmalarını satın almaktadır.*

Şekil 12 : Prebaked anotlu üretimin teknolojilere göre dağılımı :



Son 20 yıl içinde HYDRO VAW'yu, ALCAN PECHINEY'i, RUSAL ise VAMI'yi satın almıştır. Öte yandan DUBAL teknolojisini sürekli yenilemektedir. Kaiser teknolojisi ile yola çıkan DUBAL, şu an kendi teknolojisini satmaktadır. Bu arada çok önemli bir diğer gelişme ise Çin'in iki önemli teknoloji & araştırma enstitüsü olan GAMI ve SAMI CHALCO bünyesindeki CHALIECO şemsiyesi altında birleşmiştir. HYDRO, ALCAN (şimdiki adı RIO TINTO-ALCAN), RUSAL (şimdiki adı United RUSAL) ve DUBAL daha çok teknoloji satmak yerine, yeni yatırımlara ortak olarak katılmayı tercih ederken, CHALIECO teknoloji satışında, neredeyse dünyadaki tek bağımsız teknoloji tedarikçisi olarak kalmıştır. Özellikle son 5 yıl içerisinde JAZAN (Suudi Arabistan) 1,1 milyon ton, VEDANTA (Hindistan) 2 milyon ton ve diğer Malezya ve Endonezya'da toplam 1 milyon tonluk 4 yeni ülke dışı proje ve yaklaşık 9 milyon ton kapasiteli Çin içinde 8 yeni projeyi almıştır.

Tablo 3 : Yatırımı devam eden birincil alüminyum projeleri

Fabrika	Firma	Ülke	Kapasite (tpy)	Yatırım bedeli (US\$)	Baslangic tarihi
Qatalum	Hydro/Qatar Petroleum	Katar	585.000	5.6 milyar	2009
Taishet	URusal	Rusya	750.000	700 milyon	2009
Sarawak	Rio Tinto/Malaysian Conglomerate	Malezya	550.000	2 milyar	2010
Nordural Helgøvik	Alcoa	İzlanda	150.000	1,1 milyar	2010
Abu Dhabi	Dubal/Mubadala Dev Co.	Abu Dhabi	1,500.000	5 milyar	2010
Az Zahirah	Ma'aden/Rio Tinto/ Dubal	Suudi Arabistan	750.000	3.8 milyar	2011
Jazan Economic City	Chalco (GAMI) /Saudi Consortium/MMc	Suudi Arabistan	1,100.000	3 milyar	2012



Şekil 13 : Dubai



Şekil 14 : GAMI tarafından tasarlanmış 360 kA Prebaked hücre

Şekil 15 : Çok fonksiyonlu hücre hizmet vinci, Shenyang Metalurji-Çin



Elektroliz işleminin genel ilkelerini koruyarak teknolojiler arasında farklılıkların ortaya çıktığı işlemleri sıralayabiliriz :

- Son 30-35 yıl içinde oldukça popüler olan Soderberg anotlu hücreleri aynı fabrika altyapısını kullanarak Prebaked anotlu hücrelere dönüştürme teknolojileri,
- Magnetohidrodinamik (MHD) etkileri minimize etmeye yönelik magnetik kompanzasyon ölçüm sistemleri ve buna bağlı olarak busbar dizaynları,
- Otomatik hücre kontrol sistemleri,
- Hücrelere hizmet veren ekipmanlar (pot tending machines),
- Elektrolitin kimyasal kompozisyonu ve bu kompozisyonu sağlamak için dışarıdan verilen katkı malzemelerinin beslenmesi,
- Hücreye alümina besleme teknikleri,
- Yan ve dip katod bloklar ile katot blok altı refrakter izolasyonunda malzeme seçimi,
- Anot üretim teknolojileri,
- Düşük emisyon ile çalışma ve gaz temizleme.

**Modern Birincil Alüminyum Fabrikaları aşağıda sıralanmış özellikler ile karakterize edilir:**

- a) Hücre voltajını düşük (4,2-4,3) V'da tutabilmek için düşük anodik akım yoğunluğu ( $0.75 - 0.85 \text{ A/cm}^2$ ),
- b) Hücre voltajını düşük (4,2-4,3) V'da tutabilmek için düşük anot- katot uzaklığı ile çalışmak (ACD 4.5 cm),
- c) Elektrolit sıcaklığını düşürebilmek için ( $10-20^\circ \text{C}$ ), yüksek  $\text{AlF}_3$  (12-14 %) konsatrasyonu ile çalışmak,
- d) Akım verimini yükseltebilmek için (94-96%), düşük elektrolit sıcaklığı ( $950 - 960^\circ \text{C}$ ) ile çalışmak,
- e) Metalik alüminyum ile katot arasındaki mesafeyi 1-2 cm. de tutarak deformasyonu azaltmak ve anot-katot arasındaki uzaklığı 4,5 cm.' de tutabilmek için özgün alüminyum bus-bar konfigürasyonu,
- f) Yüksek akım veriminde (94-96%) çalışabilmek için metalik alüminyum hareketliliğinin minimum olmasını sağlamak,
- g) Alümina, alüminyum florür ve kırılmış elektrolit parçalarını, elektroliz banyosuna nokta besleyiciler (point feeder) ile beslemek ve böylece:
  - elektrolitin kimyasal kompozisyonu sabit tutulabilir,
  - likidüs sıcaklığı (donma noktası) elektrolit sıcaklığının  $6 - 12^\circ \text{C}$  altında tutulabilir,
- h) Hücre direnci ve güç girişinin otomatik olarak kontrol edilmesi ile :
  - anot-katot mesafesi minimum da sabit olarak tutulabilir, (bakınız "b")
  - elektrolit kompozisyonu sabit tutulabilir (bakınız "f")
  - elektrolit sıcaklığı minimumda sabit olarak tutulabilir (bakınız "d")
  - günlük anot etkisi frekansı 0,1-0,3' de minimize edilebilir ve böylece  $\text{CF}_4$  oluşum faktörü 10-20 arasında tutulabilir,
- ı) Hücresinin anot bölümünün dizayni ile flor içeren atık gazlar ve tozlar büyük oranda toplanabilir (96 – 98 %),
- i) " Kuru gaz temizleme" ile hücre gazlarındaki florlü bileşenler, taze alümina aracılığı ile büyük oranda tutularak (96 – 98 %), sisteme geri beslenebilir,
- j) Katot blokların içeriğinde geleneksel amorf malzemeler yerine:
  - 30 % grafit, 70 % antrasit ve bağlayıcı,
  - 100 % grafit ve bağlayıcı ya da
  - 100 % grafitleştirilmiş kok ve bağlayıcı bulunmaktadır.

Tablo 4 : Birincil üretim teknolojilerinin karşılaştırılması:

	AP	DUBAL	HYDRO	RUSAL	GAMI
Anodik akım yoğunluğu (A/cm <sup>2</sup> )	0.80 <sup>1)</sup>	0.84	0.78	0.81	0.75 – 0.78
Anot-katot mesafesi (cm) (teorik)	4.4	n.m.	n.m.	n.m.	4.5
Elektrolitteki AlF <sub>3</sub> konsantrasyonu (%)	12 - 14	n.a.	12 – 14	11 - 13	11 - 13
Elektrolit sıcaklığı (° C)	955	960	955	960	960
Magnetik optimizasyon (BZ: max. Gauss) <sup>2)</sup>	17	n.a.	19	n.m.	14
Nokta besleme (European or American)	E	A	E	E & A	E
Proses kontrol algoritması					
Sofistikasyon: 1 – 10 (en yüksek)	10	8	9	7	9
Toz-gaz tutma verimliliği (%)	98	96	98	96	96

**Modern Birincil Alüminyum teknolojileri benzer teknolojik performansları verirler:**

Tablo 5 : Birincil üretim teknolojileri performans karşılaştırılması:

	AP	DUBAL	HYDRO	RUSAL	GAMI
DC Elektrik tüketimi (MWh /t Al)	12.7	13.7	13.3	13.5	13.2
Akım verimi (% Faraday)	95.2	94.5	95.0	94	94
Alümina tüketimi (t/ t Al)	1.92	n.a.	1.92	1.93	1.95
Net anot tüketimi (t / t Al)	0.400	0.420	0.405	0.435	0.420
Florid tüketimi(t / t Al)	0.018	0.020	0.018	0.023	0.020
Hücre ömrü (ay)	90/70 <sup>5)</sup>	70	80	60	72
Florid salınımı (kg / t Al)	0.40	0.60	0.40	0.90	0.70
Anot etkisi frekansı (sayı/gün.hücre)	0.1 max.	0.2	0.1	0.3	0.3

- AP (Aluminium Pechiney) en iyi performansı veren teknolojidir.
- GAMI teknolojisi performans olarak batılı teknolojilere çok yakındır ve hatta bazı noktalarda üstündür:
  - Çin'deki birincil alüminyum fabrikalarında kullanılan alümina kalitesi nedeni ile (kumsu-unsu/sandy-floury karışımı ya da yarı unsu/-floury) akım verimi 1-1,5% daha düşüktür.
  - Çin'de kullanılan katot bloklar daha pöröz olduğu için, daha fazla florid elektrolitten absorbe ederler.
  - Çin'de kullanılan malzeme kalitesi, batı kaynaklı malzemelerden daha düşük olduğu için, daha düşük performans ve hücre ömrü söz konusudur.
  - GAMI'nin bus-bar dizaynı, batılı teknolojilerden daha üstündür.

## **2. YATIRIM MALİYETLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI :**

Birincil alüminyum endüstrisine teknoloji sağlayan firmalar Rio Tinto – Alcan (Aluminium Pechiney=AP), Dubal, Hydro, Rusal ve GAMI (CHALIECO) olarak sayılabilir. Bunların tümü aynı zamanda birincil alüminyum üreticisi olup, GAMI dışında kalanlar ortaklık dışında teknoloji satışını genelde tercih etmemektedirler.

Birincil alüminyum fabrikası yatırımı 4 ana bileşenden oluşmaktadır :

1. Teknolojik ve mühendislik proje,
2. İnşaat,
3. Ekipman alımı ve montajı,
4. Ekipmanların devreye alınması.

Toplam yatırım bedeli içinde inşaat, ekipman alımı ve montajı ve bunların devreye alınması yaklaşık % 60-80 arasında pay almaktadır. Bu nedenle aynı teknolojiye sahip, ancak farklı lokasyonlarda farklı maliyetler oluşumu söz konusu olabilmektedir.

### **Kapasite-akım şiddeti ilişkisi**

Teknolojik ve mühendislik proje aşamasında ilk adım kapasiteye bağlı olarak akım şiddeti seçimidir.

Tablo 6 : Kapasite – akım şiddeti ilişkisi:

Üretim kapasitesi ( bin ton/yıl)	Akım şiddeti kA
<50	70 – 135
50 – 100	155 – 200
100 – 160	180 – 240
160 – 250	280 – 350

Burada belirleyici olan silikon redresör istasyonunun kapasitesidir. Enerji verimliliği, yatırım minimizasyonu ve sürekli, problemsiz elektrik temini için SR istasyonunun limitleri dahilinde sorunsuz nominal voltaj değerlerinde çalışabilecek ve maksimum sayıda hücre besleyecek şekilde çalıştırılabilmesidir.

Tablo 7: Silikon redresör istasyonları için nominal voltaj-verimlilik ilişkisi:

Çıkış voltajı V	SR istasyonu verimliliği %
200 – 400	94 – 96
400 – 600	96 – 97.5
600 – 800	97.5 – 98.5
800 – 1300	98.5 – 99

### **Proses Maliyetleri**

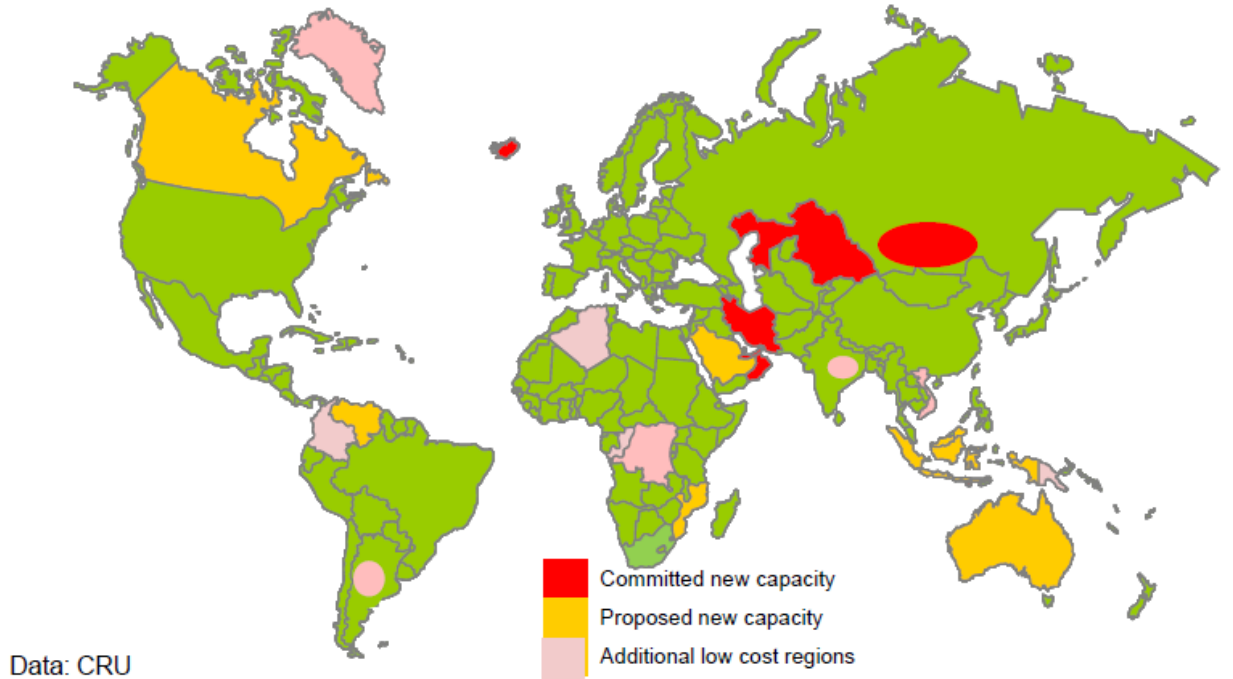
Dünya birincil alüminyum endüstrisinin bugün üzerinde odaklandığı 3 ana konu vardır:

1. Enerji tüketimi ve dolayısıyla enerji masraflarının azaltılması,
2. Hammadde bulunabilirliği,
3. Sürdürülebilir kalkınma projesi ışığında çevresel ve sosyal sorumlulukları yerine getirmek kaygısı.

Birincil alüminyum üretiminin temel girdisi alümina ile birlikte enerji olmaktadır. Metalik alüminyumun cevherden kazanımında boksit-alümine çevrimi hariç, ton başına, teknolojiye bağlı olarak 12.500 ile 16.500 kWh arasında elektrik enerjisi tüketilmektedir. Bu yoğun tüketim, ülkelerin enerji politikalarına bağlı olarak, son yıllarda birincil alüminyum üretiminin dünya ölçeğinde dağılımında değişimlere neden olmuştur. Artan nüfus ve teknolojik gelişime paralel olarak, birincil alüminyum üretiminin de artması olağandır.

Şekil 17 : Yeni birincil alüminyum tesisi yatırımları için gözde lokasyonlar

### Location of committed and proposed new low-cost smelting capacity



Ancak özellikle Amerika ve Batı Avrupa birincil alüminyum üretimlerini azaltarak, sınırlı olan enerji kaynaklarını diğer alanlarda kullanmayı tercih ederken, özellikle enerjinin ucuz olduğu Rusya ve Gulf ülkeleri, geleceğin alüminyum dünyasında başrol oynamaya soyunmuşlardır. Burada Çin, diğer endüstrilerde olduğu gibi özel bir konumdadır ve cevheri olmamasına ve oldukça pahalı enerji kullanmasına karşın, üretimini hızla arttırmaktadır.

Tablo :8: Birincil alüminyum üreticileri için ortalama enerji fiyatları(cent/kWh) :

<b>Bölge</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>
Kanada	1,22	1,40	1,59	1,58	1,50
Okyanusya	1,72	1,81	1,75	1,65	1,62
Afrika	1,32	1,46	1,56	1,44	1,39
Latin Amerika	1,63	1,95	2,09	2,03	1,95
Orta Doğu	1,95	2,05	1,92	1,79	1,69
Batı Avrupa	2,39	2,75	2,95	2,87	2,76
Amerika	2,59	2,57	2,56	2,60	2,66
Asya	3,24	3,24	3,23	3,29	3,38
BDT	1,03	1,09	1,10	0,99	0,92
Doğu Avrupa	2,51	2,49	2,54	2,58	2,63
Çin	3,57	3,92	4,01	4,00	3,99
<b>Dünya ortalaması</b>	<b>2,18</b>	<b>2,41</b>	<b>2,50</b>	<b>2,47</b>	<b>2,44</b>

Ancak Çin`deki birincil alüminyum üreticilerinin büyük çoğunluğu enerji üreten firmalar olduğu için elektrik tarifeleri çok sağlıklı değildir. Bu nedenle Çin hariç ikinci bir tablo hazırlamak ihtiyacı duyulmuştur.

Tablo :8: Birincil alüminyum üreticileri için ortalama enerji fiyatları (Çin hariç) (cent/kWh) :

<b>Bölge</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>
Kanada	1,22	1,40	1,59	1,58	1,50
Okyanusya	1,72	1,81	1,75	1,65	1,62
Afrika	1,32	1,46	1,56	1,44	1,39
Latin Amerika	1,63	1,95	2,09	2,03	1,95
Orta Doğu	1,95	2,05	1,92	1,79	1,69
Batı Avrupa	2,39	2,75	2,95	2,87	2,76
Amerika	2,59	2,57	2,56	2,60	2,66
Asya	3,24	3,24	3,23	3,29	3,38
BDT	1,03	1,09	1,10	0,99	0,92
Doğu Avrupa	2,51	2,49	2,54	2,58	2,63
<b>Dünya ortalaması</b>	<b>1,80</b>	<b>1,99</b>	<b>2,07</b>	<b>2,04</b>	<b>2,02</b>

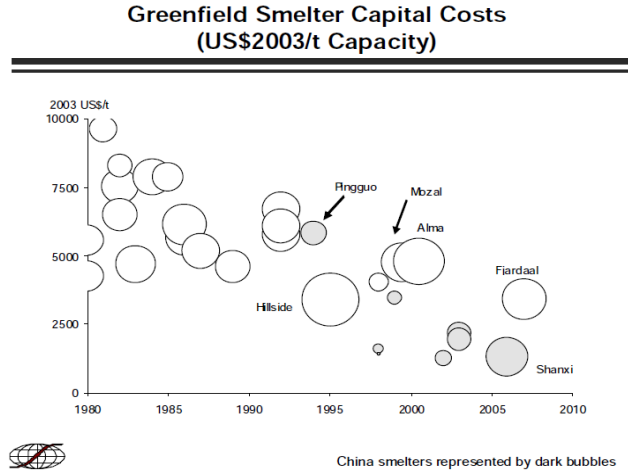
1980-2003 yılları arasında, yüksek enerji fiyatlarına bağlı olarak, Avrupa`daki birincil alüminyum üretimi %12 (toplam dünya üretimindeki payı % 40`dan % 28`e) ve Amerika`daki birincil alüminyum üretimi ise % 13 (toplam dünya üretimindeki payı % 26`dan % 13`e) gerilemiştir.

#### **Birincil Alüminyum Tesisleri Yatırım Maliyetleri**



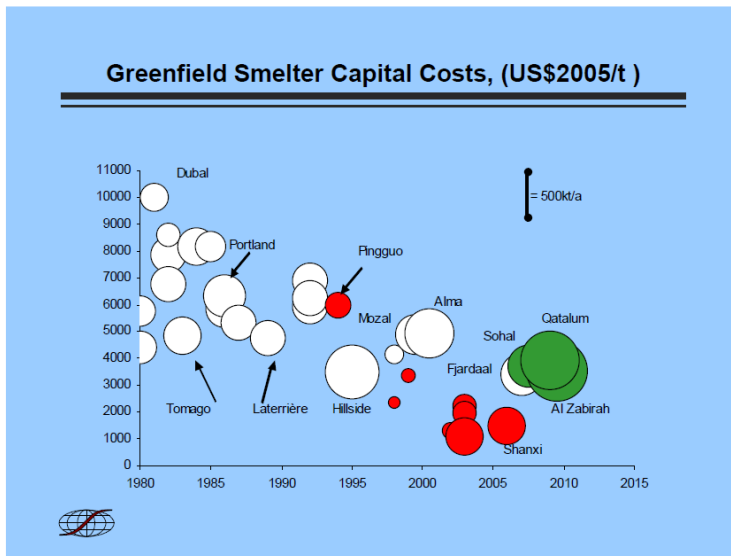
Şekil 17’de 2003 yılı için hesaplanmış üretilecek ton alüminyum başına yatırım bedelleri görülmektedir. Çin kökenli teknolojiler 2000-2500 \$/ton aralığında iken, batı kökenli teknolojilerde fiyatlar 2500 \$/ton alüminyum’dan 10 000 \$/ton alüminyuma kadar değişmektedir.

Şekil 17: 2003 yılı için hesaplanmış üretilecek ton alüminyum başına yatırım bedelleri



Şekil 18’de ise Şekil 17’nin güncellenmiş, yani GULF bölgesi yatırımları eklenmiş hali verilmiştir. Ucuz enerji ve coğrafi lokasyon nedeni ile son yıllarda GULF bölgesinde birincil alüminyum yatırımları çok popüler olmuştur. Brook Hunt verilerine göre ALBA (Bahreyn) son ilave yatırımını AP 30 teknolojisi ile ve 3600 \$/ton alüminyum, DUBAL (Birleşik Arap Emirlikleri) D-20 teknolojisi ile ilave yatırımını 2840 \$/ton alüminyum, Qatalum (Katar Devleti ve HYDRO) HAL 300 teknolojisini kullanarak yeni yatırımını 3950 \$/ton alüminyum, Suudi Arabistan’da başlanmış olan iki proje ise AP 35 teknolojisini 3500-3700 \$/ton alüminyum fiyatlarla hayata geçirmiştir. Yine Suudi Arabistan’daki Jazan projesi GAMI tarafından 2750 \$/ton alüminyum bedel ile projelendirilmiştir.

Şekil 4 : 2005 yılı için hesaplanmış üretilecek ton alüminyum başına yatırım bedelleri



Bunlara karşın Aluminium Pechiney kendi web sitesinde AP 18 için 4500 \$/ton alüminyum ve AP 30 için 4000 \$/ton alüminyum yatırım bedeli öngörmektedir <sup>3</sup>.

Ek olarak RUSAL, kendi geliştirdiği RA 300 ve RA-400 tipli teknolojiler için 2500-2800 \$/ton alüminyum maliyet hesaplamıştır (satış bedeli değil, kendi üretimi için maliyet).

## TEMEL TANIMLAR

<b>HSS</b>	: Horizontal stud Soderberg (yatay pimli Soderberg),
<b>VSS</b>	: Vertical stud Soderberg (dikey pimli Soderberg),
<b>SWPB</b>	: Side-worked prebaked (yandan calisilan prebaked),
<b>SWPB</b>	: Central-worked prebaked (merkezden beslemeli prebaked),
<b>PF</b>	: Point feeding (nokta besleme).

## SONUÇ

Yaşanan ekonomik krizler ve enerji darboğazlarına karşın dünya alüminyum talebi her yıl % 4 oranında artmaktadır. Özellikle yeni kullanım alanları ve ileri teknoloji maizemelerine alüminyumun yaptığı katkılar gün geçtikçe artmaktadır. Ancak özellikle Çin'in dünyaya entegrasyonundan sonra teknoloji de su başlarını tutan aktörler değişmektedir. Benzer olarak enerji bulunabilirliği ve maliyetleri yeni kapasitelerin, devletlerin de petrol-dışı endüstrilere getirdiği büyük kolaylıkların da katkısı ile enerji yoğun bölgelere kaymaktadır.

Peki bu resim içinde Türkiye nerededir? Bu sorunun yanıtı ancak iki farklı soru ile verilebilir:

- Elektrik enerjisinin yarısından fazlasını ithal doğal gaz ile üreten ve maliyetleri dünya ortalamasının 3 katı olan bir ülkede birincil alüminyum yatırımı ne derece ekonomiktir?

- Stratejik olarak elektroliz proses bilgisinin ve teknolojilerinin oluşturulması ve korunması magnezyum ve bor gibi diğer metal ekstraksiyon teknolojilerine alt yapı sağlamaz mı?

## Referanslar

- 1- What is driving smelter location-the long term perspective / Julian Kettle / Brook Hunt Mining & Metal Industry Consultants / Metal bulletin's 19<sup>th</sup> International Aluminium Conference / Oslo / September 2004
- 2- Gulf Smelter Projects: Update and Viability Analysis / Julian Kettle / Brook Hunt Mining & Metal Industry Consultants / Metal Bulletin's 20<sup>th</sup> International Aluminium Conference / Atlanta / September 2005
- 3- Pechiney Coeaga Aluminium Smelter / [www.ap-technology.com](http://www.ap-technology.com)
- 4- Aluminium Technology & Production in Russia / Viktor Mann Deputy General Manager / RUSAL / [www.rusal.com](http://www.rusal.com)
- 5- Aluminium Technology&Production in Russia / Victor Mann / RUSAL / Metal Bulletin 21<sup>st</sup> International Aluminium Conference / Moscow / September 2006
- 6- Gulf Smelter Projects : Update and Viability Analysis / Julian Kettle / Brook Hunt / Metal Bulletin 20<sup>th</sup> Aluminium Conference / Atlanta / September 2005
- 7- Opportunities and Challenges for Chinese Aluminium Industry / Liu Xianguin / Chalco / Metal Bulletin 21<sup>st</sup> International Aluminium Conference / Moscow / September 2006

- 8- Hall-Herault - First Century of Aluminium Process Technology 1886-1986 – TMS 115<sup>Th</sup> Annual Meeting – New Orleans.
- 9- 2. Alüminyum Sempozyum ve Sergisi Açılış Sunusu / Prof. Dr. İsmail Duman - İ.T.Ü. Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü / Seydişehir / Mayıs 2004
- 10- What is driving smelter location-the long term perspective / Julian Kettle / Brook Hunt Mining & Metal Industry Consultants / Metal bulletin's 19<sup>th</sup> International Aluminium Conference / Oslo / September 2004
- 11- Gulf Smelter Projects: Update and Viability Analysis / Julian Kettle / Brook Hunt Mining & Metal Industry Consultants / Metal bulletin's 20<sup>th</sup> International Aluminium Conference / Atlanta / September 2005
- 12- Pechiney Coeaga Aluminium Smelter / [www.ap-technology.com](http://www.ap-technology.com)
- 13- Aluminium Technology & Production in Russia / Viktor Mann Deputy General Manager / RUSAL / [www.rusal.com](http://www.rusal.com)
- 14- Aluminium Technology, Applications and Environment / A Profile of a Modern Metal / Dietrich G. Altenpohl / 6<sup>th</sup> Edition / TMS 1999
- 15- Aluminium Smelter Power Tariffs to 2007-CRU International Ltd.