

# KALIN BETON KAPLAMALI MADEN KUYUSU VE TUNEL ASTARLARINDA BETONUN HİDRATASYONU SIRASINDA OLUŞAN SICAKLIK DAĞILIMLARI VE İSİSAL GERİLMELER

Ömer AYDAN(\*)  
Alpaslan ERSEN(\*\*)  
Yasuaki ICHIKAWA(\*\*\*)  
Toshikazu KAWAMOTO(\*\*\*\*)

## ÖZET

*Bu yazıda kalın beton kaplamalı maden kuyusu ve tünel astarlarında betonun hidrasyonu sırasında oluşan sıcaklık değişimleri ile ilgili yapılmış deneysel ve nümerik modelleme çalışmaları sunulmuştur. Deneysel çalışmalar hem laboratuvarda yapılan model çalışmaları hem de yerinde yapılan ölçümleri kapsamaktadır. Laboratuvar çalışmaları ile yerinde yapılan ölçümlerin sonuçları sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan nümerik modelleme sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Daha sonra nümerik modelleme sonuçları yine sonlu elemanlar yöntemi aracılığıyla yapılan nümerik modellemelerde beton kaplamadaki ısıl gerilmelerinin bulunması için veri olarak kullanılmıştır.*

## ABSTRACT

*In this paper, the numerical and experimental studies regarding temperature changes due to hydration of concrete in shaft and tunnel concrete lining are presented. The experimental studies involve both laboratory modelling and in-situ measurements. The results obtained from numerical studies by using the Finite Element Method and experimental studies are compared. The results of these numerical studies are used as data for further numerical studies in order to find thermal stresses in the concrete lining.*

- (\*) Maden Yuk. Muh., Dept. of Geotech. Eng., Nagoya üniversitesi, JAPAN  
(\*\*) Maden Yuk. Muh., TKİ Gen. Md., Etud Plan Proje Dairesi, Ankara, TÜRKİYE  
(\*\*\*) Research Ass., Dept. of Geotech. Eng., Nagoya University, JAPAN  
(\*\*\*\*) Professor, Dept. of Geotech. Eng., Nagoya university, JAPAN

## 1. GİRİŞ

Maden kuyusu ve tünel gibi herhangi bir açıklığın duraylılığını temin etmek üzere dökülen kalın beton kaplamalarında zaman zaman değişik boyutlardaki çatlaklar gözlenmektedir. Bu çatlakların oluşumu kaplamaya etki eden basınçlar, betonun hidratasyonu sırasında erken yaşlarda oluşan ısıl gerilmeler veya büzülme (Shrinkage) gibi nedenlere bağlıdır. Isıl gerilmeler (radyal ve teğetsel) özellikle masif beton yapılarda betonun erken yaşlardaki hidratasyonu sırasında neden olduğu sıcaklık değişimlerinden dolayı oluşur. Eğer bu gerilmeler betonun o yaşlardaki çekme direncini aşarsa betonda ısıl çatlaklar diye adlandırılan çatlamlara neden olur.

Özellikle yeraltı suyunu içeren tabakaları geçen kuyu ve tünellerle açıklığa gelen suyun büyük bir miktarı bu çatlaklardan dolayıdır. Bu çatlaklardan sızan sular kuyu ve tünel havasının nemlenmesine, buradaki donanımların çürümesine, paslanmasına, güç çalışma koşullarına, büyük su atımı problemlerine ve zaman zaman da duraylılık problemlerine yol açmaktadır(1).

## 2. MASİF BETON YAPILARINDA SICAKLIK ARTIŞI

B ilindiği gibi çimentonun su ile olan reaksiyonu ekzotermik olup yaklaşık 28 günlük bir kür süresi boyunca önemli bir miktarda ısıyı açığa çıkarır(2). Eğer bu ısı dağılmazsa, sıcaklıkta bir artışa neden olur. Bu sıcaklık artışı, hidratasyon süresince oluşan ısı ile betondan çevreye kaçan ısı arasındaki dengeye bağlıdır. Bu dengeyi etkileyen faktörler arasında beton kaplamanın kalınlığı, çimentoyu oluşturan malzemenin cinsi ve kaynağı, su-çimento oranı, betonun dökülme sıcaklığı, çevre koşulları, kalıp ve yalıtma sayılabılır(3).

Betonun kendisi zayıf bir yalıtıcıdır(4). Hacmine göre geniş bir yüzeye sahip olan ince beton yapı elemanları geniş yüzey ısı alışverişinden dolayı ısıyı kolayca dağıtabilirler ve böylece yapıda önemli bir ısı artışı olmaz. Masif beton yapılarında oluşan ısının bir kısmı ise sıcaklık artışını önleyecek oranda ısı dışarıya kaçamadığı için betonun içinde kalır. Bu da sıcaklıkta bir artışa ve kütlelerin genişlemesine neden olur. Isının kaybolma hızı ısının oluşum hızını geçerse beton soğumaya ve büzülmeye başlar. Herhangi bir engellenin (restraint) olmadığı koşullarda beton hiç bir gerilme yaratmadan genişler ve büzülür. Fakat gerçekte kısmi veya tam engelleme her zaman mevcut olduğu için, ısıl gerilmeler oluşur.

## 3. ISISAL GERİLMELERİN OLUŞUMU

Isıl gerilmeler, erken yaşlarda ısıdan dolayı oluşan genişleme ve daha sonra ısının düşmesiyle oluşan büzülme gibi ısıl hareketlerin sınırlandırılmasıyla oluşur. Bu sınırlama (engelleme) içten veya dıştan olabilir(3). Kuyu veya tünel beton astarları için dış sınırlamaya örnek olarak çevreleyen tabaka ve/veya arkasına betonun döküldüğü kalıp verilebilir. İç sınırlama ise yüzeylerinin çabuk soğumasına rağmen merkezinin halen sıcak olduğu büyük beton dökümlerinin içindeki farklı ısıl birim deformasyonlardan (strains) oluşur.

Sabit özelliklere sahip ve sünme (creep) göstermeyen bir malzeme için sınırlamanın etkisi, sıcaklığın artışı sırasında basınç gerilmesi oluşturmaktır. Daha sonra soğurken bu gerilme tamamen ortadan kalkar. Halbuki beton, özellikle sünmenin yüksek olduğu ve hem direncinin hem de sertliğinin süratle arttığı erken yaşlarda böyle ideal şartlara sahip değildir(4). Bunun bir sonucu olarak, elastisite modülünün küçük olduğu ısı çıkış zamanında gelişen basınç gerilmeleri de küçüktür. Çekme gerilmeleri sıcaklığın düşmeye başlamasından hemen sonra oluşmaya başlar. Soğuma devam ederken çekme gerilmesi; sıcaklığın denge durumuna gelmesine veya betonun o yaştaki çekme direncine eşit olmasına kadar artar. Gerilme değerinin bu direnç değerine ulaşması kısmi bir çatlama ile sınırlamanın (restraint) ortadan kalkmasına sebep olur.

Özetlemek gerekirse, sıcaklık, sınırlama ve masif betonun özellikleri birbiriyle öyle ilişkidirler ki, beton ilk dönemlerinde sıkışır ve daha sonra gerilir. Sıcaklıktaki değişimlerden dolayı oluşan gerilmeler sünme ve betonun yaşı tarafından etkilenir. Malzemenin mekanik özellikleri, sünme ve büzüşme karakteristikleri ve betonun etkili yaşı sıcaklık zaman ilişkisine bağlıdır.

Eğer sıcaklık değişiminden oluşan çekme gerilmesinin değeri betonun çekme direnci değerinden aşağıda tutulabilirse çatlama önlenecektir. Çekme gerilmesi; düşük ısı çıkışını sağlayan, düşük sıcaklıkta ve elverişli döküm nispetinde olan ve uygun ısıl, elastik ve plastik özelliklere (düşük elastisite modülü, yüksek sünme ve yüksek çekme direnci gibi) sahip betonun kullanılmasıyla azaltılabilir(3,5).

#### 4. NÜMERİK ANALİZ ÇALIŞMALARI

Nümerik analiz yöntemleri (örneğin sonlu elemanlar, sonlu farklar veya sınır elemanlar yöntemi) bir cismin içinden ısı çıkışı ve akışı ile ilgili denklemler ve buna bağlı olarak oluşan ısıl gerilmeler gibi analitik yolla çözümü mümkün olmayan formülasyonların çözümünde başarıyla kullanılmaktadır(6,7,8). Bu yazıda sadece sonlu elemanlar yöntemi;

a) Muna'da açılan tüneller ve North Selby'de açılan kuyulardan alınan kesitlerde; kaplamadaki betonun hidrasyonu sırasında zamana bağlı sıcaklık değişimlerini canlandırmak (to simulate),

b) Elde edilen neticeleri laboratuvar ve yerinde yapılan ölçüm neticeleriyle karşılaştırmak,

c) Gene elde edilen bu neticelerin veri olarak kullanılarak erken yaşlarda oluşan ısıl gerilmeleri hesaplamak ve

d) Bu oluşan ısıl gerilmelerin gelişimine kalıbın varlığının ne tip bir etkisi olduğunu görmek için kullanıldı.

Ayrıca değişik çimento türü içeren beton karışımlarının sertleşmesine kadar geçen süre içinde, elastisite modülü ve poisson oranının zamana bağlı olan değişimlerinin yapabileceği etkilerini de görmek üzere bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan zamana bağlı değişimler yapılan test neticeleri sonucunda elde edilmişlerdir(8,9).

Nümerik analiz çalışmalarında aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

- a) Açılan kuyu ve tünel kesitlerinin kaplamayla birlikte dairesel olması nedeniyle problem eksenel simetrik olarak düşünülecektir.
- b) Kaplama içindeki sıcaklık değerinde kuyu veya tünel eksenini boyunca ve ayrıca teğetsel yönde bir değişme olmayacaktır. Yani eksenden ve açıdan bağımsız olacaktır.
- c) Herhangi bir kesitte beton ve kayaya ait ısı iletkenlik katsayısı ( $k$ ), özgül ısı ( $c$ ) ve yoğunluk ( $\rho$ ) gibi ısısal ve fiziksel özellikler sabit olacaktır.
- d) Kum ve çakıl tarafından herhangi bir ısı yayılmayacaktır.
- e) Isısal gerilmelerin bulunmasında beton kaplamada oluşacak yer değiştirmeler radyal olacaktır (axisimetrik plane strain analiz).

## 5. SICAKLIK ÖLÇÜMLERİYLE İLGİLİ DENEYLER VE YERİNDE ÖLÇÜMLER

Burada Suudi Arabistan'daki Muna tünelleri ve İngiltere'deki Selby kömür havzasına ait kuyu kaplamaları ile ilgili yapılmış laboratuvar modelleme çalışmalarından ve yerinde yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçlar sunulacaktır. Bu değerler nümerik çalışmalardan elde edilenlerle karşılaştırılacaktır.

### 5.1. Muna Tünelleri

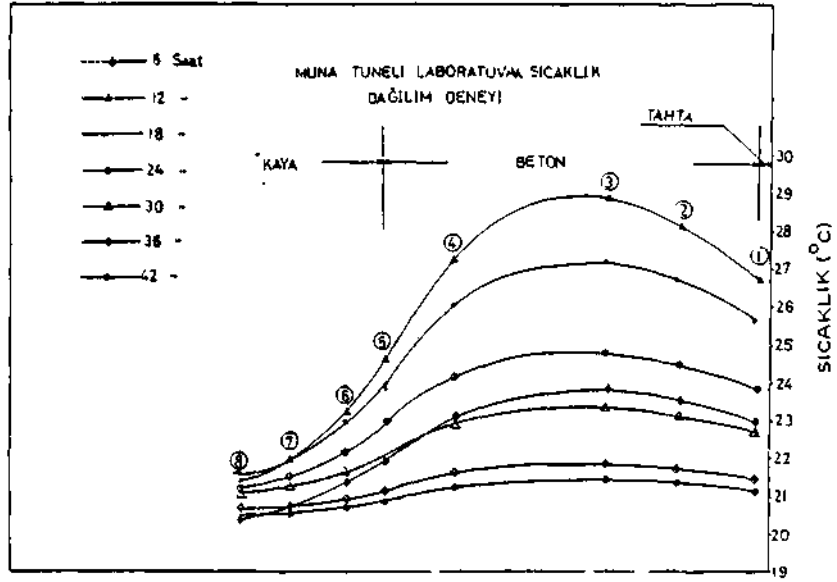
Muna tünellerine ait beton kaplamalarda oluşabilecek sıcaklık dağılımları ile ilgili iki deney yapılmıştır (IO). Bu deneylerde kullanılan kalıp  $100 \times 20 \times 20$  cm boyutunda olup Şekil 1'de görüldüğü gibi izole edilmiştir. Sıcaklık ölçerler uzunlukları 15 cm olan bakır tüpler içinde yerleştirilmiştir.

İlk yapılan deneyde, tünelde kullanılan beton karışımıyla aynı özelliklere sahip olarak hazırlanan beton karışımının kalıp içine dökülmesinden sonra, kalıp içine yerleştirilmiş ölçerlerden altışar saat aralıklarla ölçümler alınmıştır. Bu deneyde gözlenen en yüksek sıcaklık değişimi kalıbın merkezinde ve yaklaşık 11 C dolaylarındadır.

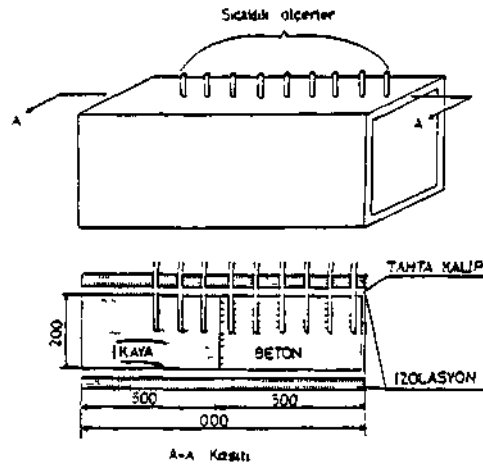
İkinci deneyde ise tüneldeki durumu tam olarak canlandırabilmek için getirilmiş olan çevre kayaç numunesi kalıbın boyutlarına uygun olarak kesilmiştir. Şekil 1'de görüldüğü üzere beton kayaç numunesinin yanına dökülmüş olup bir önceki deneyde olduğu gibi devamlı bir şekilde ölçümler alınmıştır, özellikleri Çizelge 1'de verilen betonun hidratasyonu sırasında elde edilen ölçüm neticeleri zamana bağlı olarak Şekil 1'de verilmiştir.

Çizelge 1- Deneyde kullanılan betonun karışım miktarları

Malzeme cinsi	Çimento (kg)	Kum (kg)	Çakıl (kg)	Su ( $m^3$ )	Su/çimento oranı
Miktar	365	715	1075	0.198	0.54

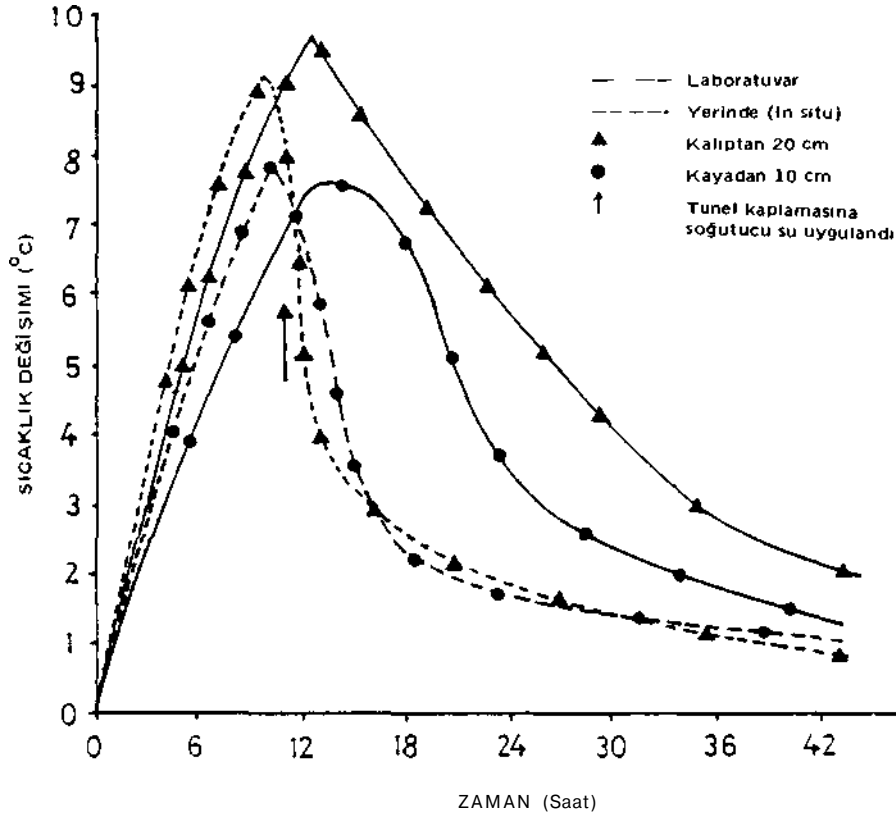


(a)



Şekil 1— Muna Tünelleri ilgili sıcaklık ölçüm sonuçları (a) ve deney düzeni (b)

Bu deneyde gözlenen en yüksek sıcaklık değişimi yaklaşık  $10^{\circ}\text{C}$  civarındadır. Kaya içinde ve betondan yaklaşık 5 cm uzaklıktaki bir noktada sıcaklık değişimi  $2,4^{\circ}\text{C}$  iken 18 cm uzaklıktaki bir noktada ise  $0,7^{\circ}\text{C}$ 'dir. Newcastle upon Tyne üniversitesi araştırma grubu tarafından yerinde yapılan ölçümlerde gözlenen en yüksek sıcaklık değişimleri 9 ile  $11^{\circ}\text{C}$  arasındadır(II). Karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla, beton-kaya sınırından, 50 cm'lik beton kaplama içinde 20 cm ve kaya içinde 10 cm uzaklıkta olan ölçerlerden, gerek laboratuvarda ve gerekse de yerinde yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçlar Şekil 2'de birlikte gösterilmiştir.



Şekil 2— Muna Tüneli ile ilgili yapılmış yerinde ve laboratuvar ölçüm sonuçları

Şekilden de görüleceği üzere tünel kaplamasında ölçülen en yüksek sıcaklık değerleri, laboratuvarda ölçülenlerle hemen hemen aynı olmasına rağmen daha önce oluşmaktadır. Bu da laboratuvardaki çevre sıcaklığı (19°C) ile tüneldeki sıcaklığın (39°C) farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Çevre sıcaklığının büyük olması çimentonun hidratasyonunu hızlandırmakta ve daha erken dönemlerde yüksek sıcaklıkların oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca tünel kaplamasında 9. saatteki ani sıcaklık düşüşü kaplamanın üzerine uygulanan soğutucu sudan ileri gelmektedir. Dolayısıyla laboratuvarda gözlenen dereceli sıcaklık düşmesi yerinde yapılan ölçümlerde gözlenememektedir. Böylece laboratuvarda yapılabilecek bu tip deneylerle, yerinde ölçüm yapılmaksızın, oluşacak sıcaklık değişim değerlerini iyi bir yaklaşımla bulmak mümkün olur.

##### 5.2. Nort Selby Kuyusu

Bu kuyunun iki istasyonunda sıcaklık ölçümleri yapılmıştır(1). İlk yapılan ölçüm 230. metre seviyesinde olup, betonun dökülmesinden önce beton kaplamaya ve kayaya sıcaklık ölçerler, kuyu açımında kullanılan yeraltı suyunu dondurma yönteminin etkisi-

ni kontrol etmek amacıyla, yerleştirildi(12,13). Mamafih ölçerlerden sebebi anlaşılma-  
yan bir arzadan dolayı sıcaklık ölçümleri elde edilemedi.

Kuyunun 415. metresinde kaplama kalınlığının yaklaşık 1 355 mm olması ve çabuk  
sertleşen çimentonun kullanılması nedeniyle yüksek sıcaklık değişimlerinin olması olası  
idi. Bu nedenle bu seviyede büyük ısıl gerilmelere sebep olacağı düşünülen sıcaklık deği-  
şimlerini gözlemek amacıyla her biri 4 sıcaklık ölçerden oluşan 3 ölçer dizisi özellikleri  
Çizelge 2'de verilen betonun dökümü esnasında(14) Şekil 3'de gösterildiği gibi beton  
kaplamaya ve kayaya yerleştirildi. Ölçüm neticelerinin de verildiği şekilden görüleceği  
üzere en büyük sıcaklık değişimi kaplamanın merkezine yakın olup 36ncı saatte 34 C'ye  
kadar çıkmaktadır. Bu oldukça yüksek sıcaklık değişimi olup neticesinde yüksel ısıl  
gerilmelere neden olması kaçınılmazdır. Özellikle bu tür gerilmeler taze beton için ol-  
dukça kritiktir.

## 6. SICAKLIK DAĞILIMLARININ NÜMERİK YÖNTEMLE ANALİZLERİ

İlk analiz, Muna tünelleri için yapılan deneysel modellemenin sonlu elemanlar yönte-  
mi kullanılarak canlandırılması üzerinedir. Analizde kullanılan malzemelerin ısıl özel-  
likleri ve ısı çıkış miktarları Çizelge 3'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar deney çalış-  
malarını neticesiyle karşılaştırılmak üzere Şekil 4'te gösterilmiştir. Şekilden görüleceği  
üzere iki modelleme çalışması ile elde edilen sonuçlar iyi bir uyum içersindedir. Yerinde  
yapılan ölçümlere ait sonuçlara atıf yaparsak bunların nümerik modelleme sonuçların-  
dan biraz daha yüksek olduğu görülür.

İkinci analizde N.Selby 2 no.lu kuyusunun ikinci ölçüm istasyonundaki sıcaklık deği-  
şimleri incelenmiştir. Simulasyonda kullanılan malzemelerin ısıl özellikleri ve ısı çıkış  
miktarları Çizelge 4'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlar yerinde yapılan ölçüm neticele-  
riyle Şekil 5'te görüleceği üzere iyi bir uyum içindedirler.

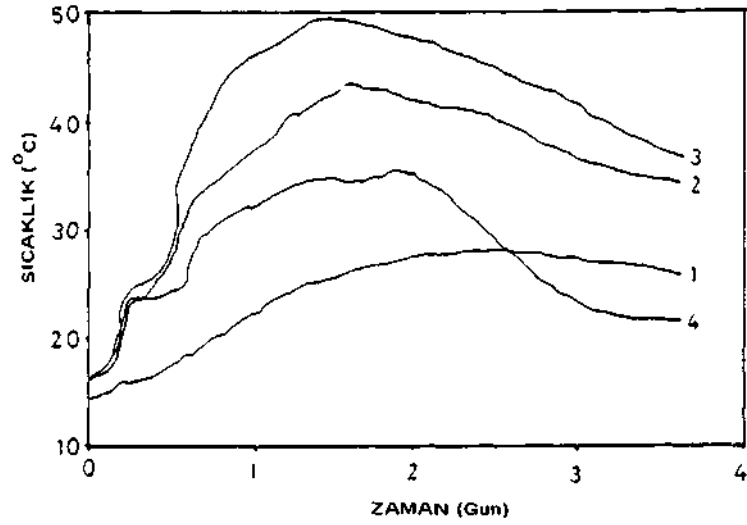
## 7. ISISAL GERİLMELERİN NÜMERİK YÖNTEMLE ANALİZLERİ

Bir önceki bölümde sıcaklık dağılımları ile ilgili nümerik analizlerden elde edilen neti-  
celer burada erken yaşlardaki ısıl gerilmelerin daha iyi anlaşılmasında kullanılacaktır.

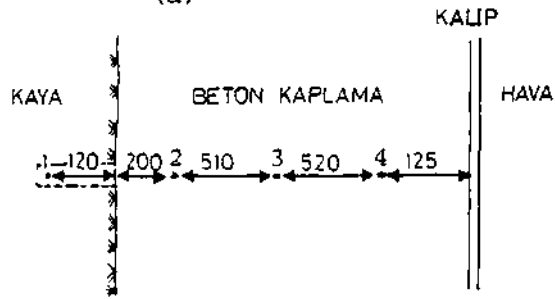
İlk analiz Muna tünelleri için yapılmış olup elde edilen radyal ve teğetsel gerilme (*a*  
ve *o*) dağılımları zamana ve havadan (kalıptan) olan uzaklığa bağlı olarak Şekil 6 ve 7'  
de gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere radyal ve teğetsel gerilmeler sıcaklığın  
maksimum olduğu noktaya kadar basınç türü gerilmeler olarak artmakta ve en yüksek  
değerine ulaşmaktadır. Bu gerilmeler sıcaklığın azalmasıyla düşmeye başlamakta ve gi-  
derek kaplama içinde çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Teğetsel gerilmeler kaplamanın  
ortasına yakın yerlerinde maksimum, kenarlarında ise minimum değerlerini almasına  
karşılık radyal gerilmeler kayayla olan sınıra yakın yerlerde maksimum değerini alır.  
Oluşan maksimum çekme gerilmeleri radyal ve teğetsel gerilmeler için sırasıyla 0,026  
MPa ve 0,3 MPa'lık değerlerini almaktadır. Bu değerler oldukça düşük olup kaplama  
içinde çatlaklara neden olması beklenemez.

Çizelge 2— N.Selby'de kullanılan betonun karışım miktarları

Malzeme cinsi	Çimento (kg)	Kum (kg)	Çakıl (kg)	Su (m <sup>3</sup> )	Su/çimento oranı
Miktarı	420	685	1 050	0.180	0.43



(a)



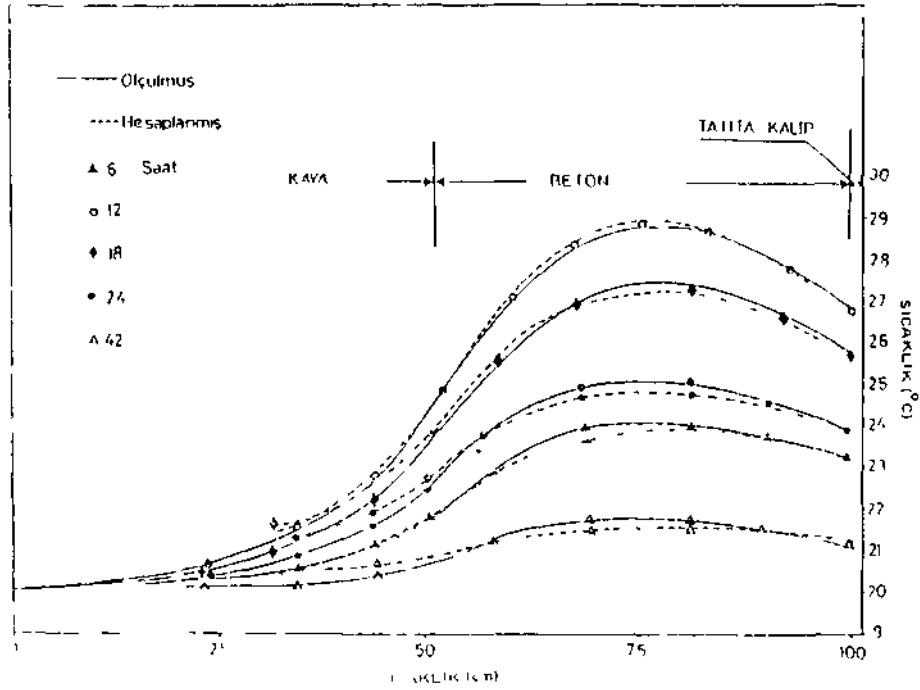
(b)

Şekil 3— N Selby 2 nolu kuyunun 415 metresinde sıcaklık ölçerlerin konumu (b) ve sıcaklığın zamana bağlı değişimi (a)



Çizelge 3— Birinci analizde kullanılan malzemelere ait ısısal özellikler

	K (kcal/mhr°C)	C (kcal/kg°C)	P (kg/m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> /hr)
Tahta	0.1022	0.668	510	0.0003
Beton	3.187	0.22	2 300	0.0062
Kaya	2.28	0.146	2 500	0.0062



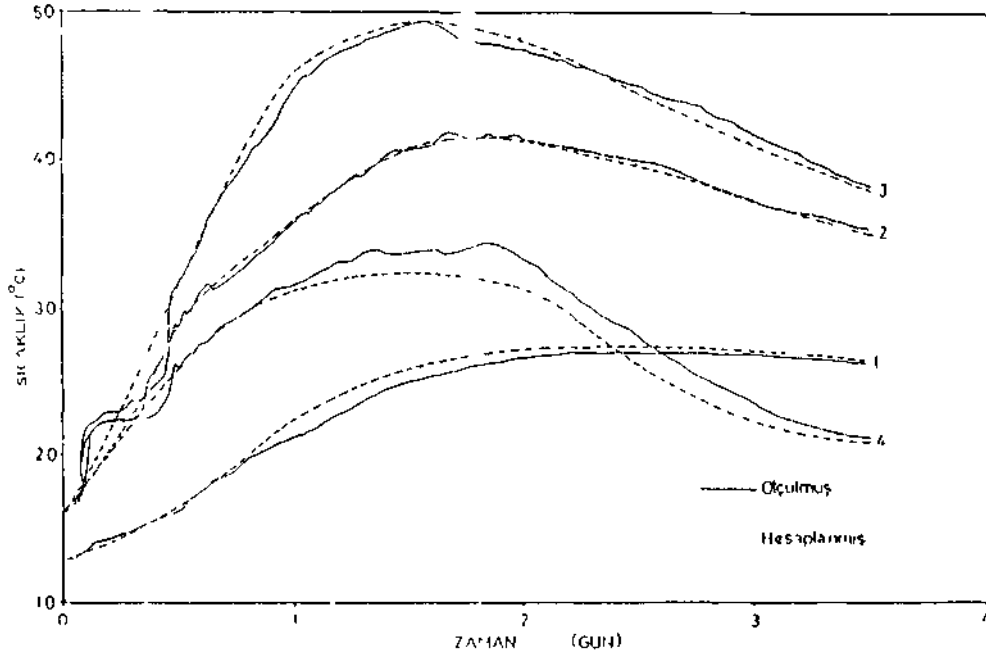
Şekil 4— Beton kaplama içinde hesaplanmış ve ölçülmüş zamana bağlı sıcaklık değişimleri (Muna Tünelleri)

Şekil 6 ve 7 aynı zamanda kalıbın varlığının etkisini görmek üzere elde edilen sonuçları da kapsamaktadır. Teğetsel gerilmelerin değeri kalıbın varlığından fazla etkilenmemesine karşılık radyal gerilmeler ilk 40 saat içinde oldukça etkilenmektedir. 50 nci saat geçildiğinde radyal gerilmeler eşit hale gelmektedir.

İkinci analiz ise North Selby kuyu kaplamasının inşasında kullanılan 2 tür beton karışımı (WSRC ve NSI) için ayrı ayrı yapılmıştır. Bu iki tip beton karışımına ait en büyük özellik elastisite modülleri ile Poisson oranlarının hidrasyon sırasında zamana bağlı olarak gösterdikleri değişimdir(8,9). Şekil 8 ve 9'dan görüleceği üzere WSRC karışımında

**Çizelge 4- İkinci analizde kullanılan malzemelere ait ısısal özellikler**

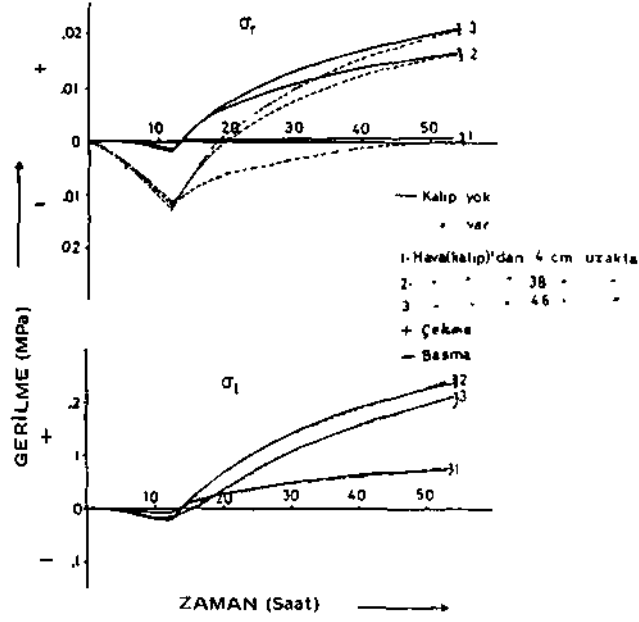
	K (kcal/mhr°C)	C (kcal/kg°C)	P (kg/m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> /nr)
Çelik Kalıp	32	0.153	7 800	0.0267
Beton	2.088	0.22	2 300	0.003263
Kaya	1.728	0.257	2 171	0.00249174



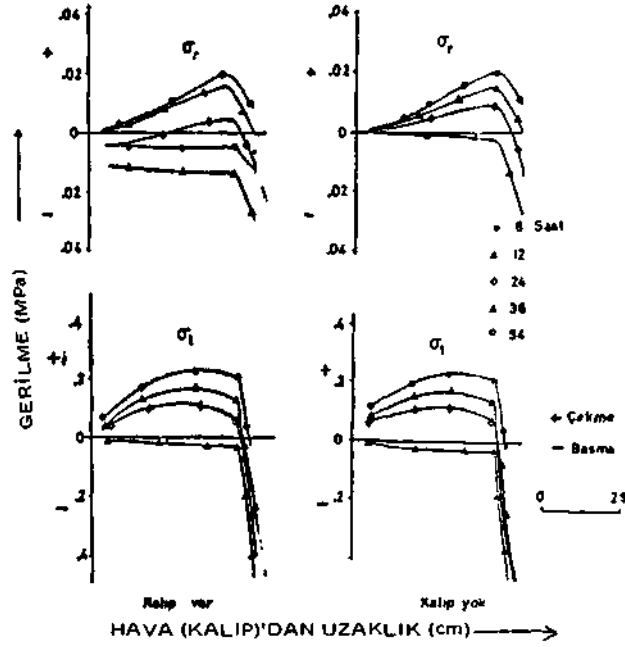
Şekil 5— N.Selby kuyusunun kaplamasında 1, 2, 3 ve 4 nolu ölçerlerden ölçülmüş sonuçlar ile hesaplanmış sonuçlar

elastisite modülündeki artış ile Poisson oranındaki azalış NSI karışımından elde edilen- den daha süratli olmaktadır.

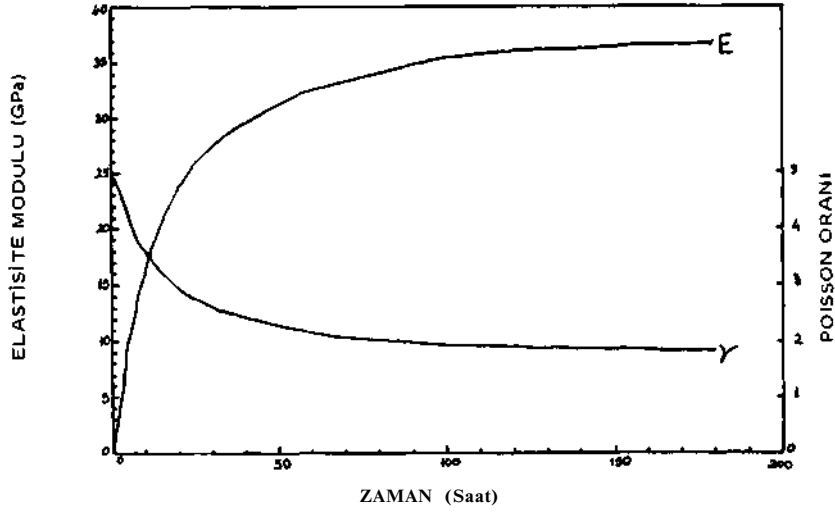
Her iki karışım için elde edilen radyal ve teğetsel gerilme değerleri zamana bağlı olarak beton kaplamada havadan 5,35 ve 125 cm uzaklıktaki noktalar için Şekil 10 ve İT de verilmiştir. Bir önceki analizde elde edilen bazı sonuçlar burada da gözlenebilir, önce basınç gerilmeleri şeklinde olan radyal ve teğetsel gerilmeler sıcaklığın en yüksek değerinde maksimum değerini aldıktan sonra sıcaklığın düşmesiyle azalarak yerlerini çekme gerilmelerine bırakmaktadır. Teğetsel gerilmeler en yüksek değerlerini beton astarın ortalarına yakın yerde almaktadır.



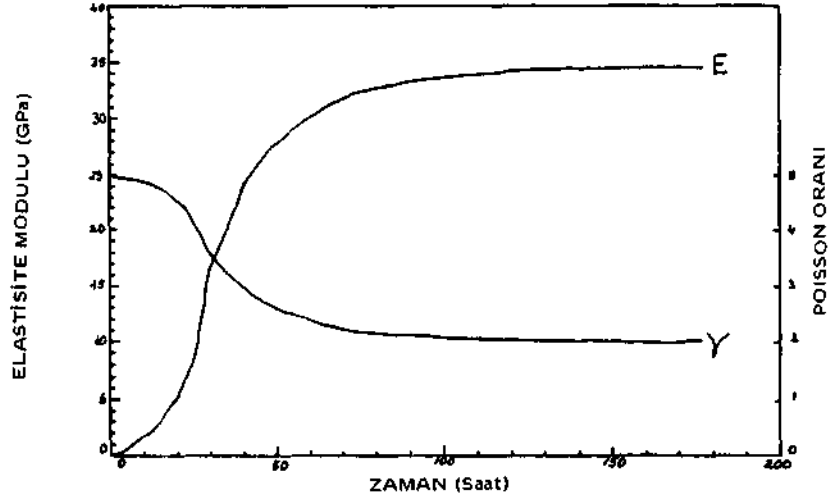
Şekil 6~ Muna Tüneli kaplamasının belirli noktalarında  $\sigma_r$  ile  $\sigma_l$ 'nin zamana bağlı değişimi



Şekil 7— Muna Tüneli kaplamasında ısıl gerilmelerin zamanla değişmesi



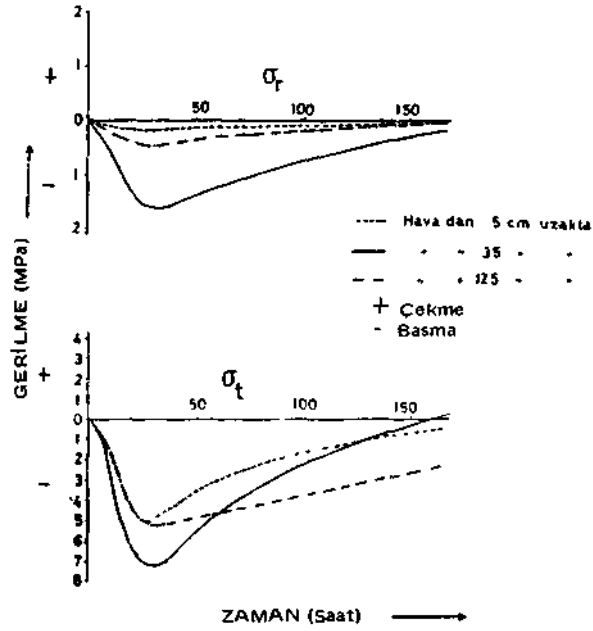
Şekil 8— Betonun elastisite modulu ile Poisson oranının zamanla değişimi (WSRC karışımı)



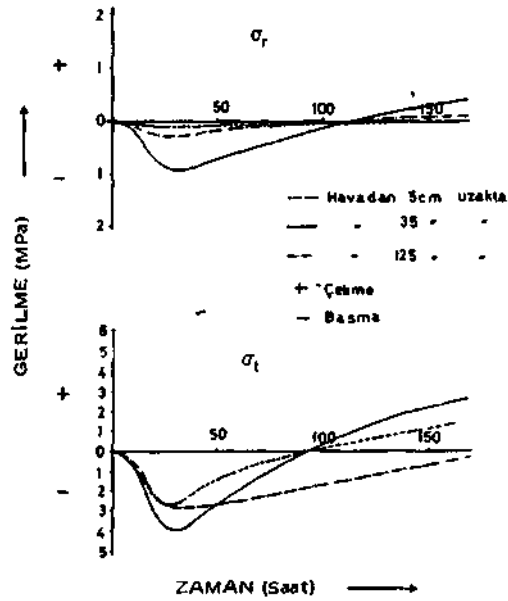
Şekil 9— Betonun elastisite modulu ile Poisson oranının zamanla değişimi (NSI karışımı)

Oluşan maksimum teğetsel basınç gerilmeleri WSRC ve NSI karışımları için sırasıyla 8 MPa ve 5 MPa civarındadır. Her ne kadar WSRC karışımında NSI karışımına nazaran daha büyük teğetsel basınç gerilmeleri oluşuyorsa da sonuçta oluşan teğetsel çekme gerilmeleri daha küçüktür. Ayrıca NSI karışımında elastisite modülündeki artış daha kısa zamanda olduğu için bu karışımında elde edilen çekme gerilmeleride daha kısa zamanda oluşmaktadır.

Her iki karışımın yapılan deneylerden 28 günlük çekme dirençleri WSRC için 3,15 MPa ve NSI için ise 2,7 MPa olarak bulunmuştur(9). Bu yüzden NSI karışımı çatlak oluşumunun etkisinde kalması muhtemeldir.



Şekil 10— N.Selby kuyu kaplamasının belirli noktalarında  $\sigma_r$  ile  $\sigma_t$ 'nin zamanla değişimi (WSRC karışımı)



Şekil 11— N.Selby kuyu kaplamasının belirli noktalarında  $\sigma_r$  ile  $\sigma_t$ 'nin zamanla değişimi (NSI karışımı)

## 8. SONUÇ

Yapılan nümerik çalışmalarla, önce kalın beton kaplamalı kuyu ve tünel astarlarında betonun hidratasyonu sırasında oluşan sıcaklık dağılımları elde edilmiş ve daha sonra bu değerler ısıl gerilmelerin bulunmasında kullanılmıştır. Bu çalışmalarda yapılan kabul-ler ve kullanılan bazı parametre değerleri ısıl gerilme değerlerinin tam olarak saptandı-ğı konusunda kesinlik sağlamamaktadır, bununla beraber kuyu ve tünel astarlarının hid-ratasyon sırasındaki davranışlarına açıklık getirmesi açısından oldukça önemlidir. Elde edilen bazı sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

— Nümerik çalışmalar sonucu elde edilen sıcaklık dağılımları ölçümler neticesinde elde edilenlerle iyi bir uyum içerisindedir.

— Beton hidratasyon sırasında sıcaklık yükselmesiyle birlikte basınç gerilmelerine maruzdur. Çekme gerilmeleri sıcaklığın azalmasıyla gelişir.

— En yüksek çekme gerilmeleri hemen hemen beton kaplamanın merkezinde olaca-ğında herhangi bir çatlak oluşumu merkezde daha fazla olacaktır.

— Kalıbın varlığının daha ziyade radyal gerilmeleri üzerinde etkisi vardır.

— Elastisite modülündeki artışı daha kısa zamanda olan beton karışımları çekme ge-rilmelerinin daha önce oluşmasını sağlar.

Sonuç olarak yazarlar, yaptıkları bu ve daha başka çalışmaların ışığı altında bu tip modellemelerin, daha ileri seviyede kompitür programlarına yapılacak değişiklikler ve *betonun* özellikleri üzerindeki araştırmalarla, geniş çapta yerinde deney ve ölçümler ya-pılmaksızın kalın beton kaplamalı maden kuyusu ve tünel astarlarında daha hassas bir şe-kilde uygulanabileceğini umuyorlar. Bu tür çalışmalar bazı kuyu ve tünel astarlarında rastlanan çatlamların analizine bir ışık tutması açısından da önemlidir

## KAYNAKLAR

1. AYDAN, o.- Shaft Lining Design and Performance at North Seiby Mine, M Sc Thesis, University of Newcastle upon Tyne, December, 1982
2. THURSTON, S.J., PRIESTLEY, M.J.N, and COOKE. No Thermal Analysis of Thick Concrete Sections, Journal of A.C.I., September-October, 1980
3. HARRISON, T.A.: Early Age Thermal Crack Control in Concrete. Construction Industry Rese arch and Information Report 91. 1981
4. NEVILLE, A. M.: Properties of Concrete, 3 rd Edn., Pitman, 1981
5. ACI Committee 224, Control of Cracking in Concrete Structures, Journal of A.C.I., December, 1972
6. CARSLAW, H.S. and JEEGER, J.C.: Conduction of Heat in Solids, 2 nd Edn., Oxford, 1959
7. ZIENKIEWICZ, O.C.: Finite Element Method in Engineering Science, Mc Graw Hill, London, 1971
8. ERSEN, A.: Design of Concrete Shaft Linings in Frozen Strata at Whitemoor Mine, M.Sc. Thesis, University of Newcastle upon Tyne, June, 1983
9. WAINWRIGHT, P.J.: Test Results on Coefficient of Thermal Expansion, Elasticity and Strength of Concretes Used in Seiby Coalfield Shaft Linings, Internal Report, Leeds University, 1981
10. AYDAN, ö.: Tests on Temperature Distributions in Concrete and Rock in Muna Tunnels, Interim Report, University of Newcastle upon Tyne, 1981
11. GULOĞLU, R.: Stability of Hard Rock Tunnels at Shallow Depts, Ph. D. Thesis, University of Newcastle upon Tyne, 1982
12. AYDAN, o.ve ERSEN, A.: Yeraltı Suyunu Dondurma Yöntemi ve Bir Uygulaması, Madencilik, Cilt XXII, sayı 2, 1983
13. ERSEN, A. ve AYDAN, ö.: Titreşimli Tel Esaslı Ölçerlerle Beton Kaplamalı Kuyularda Gerilme, Birim Deformasyon ve Sıcaklık Ölçümleri, 4. Kömür Kongresi, Zonguldak, 1984
14. AYDAN, ö.: Tests on Hydration and Strengths of Concrete Used in N. Seiby Shafts Linings, Interim Report, University of Newcastle upon Tyne, February, 1982