

Die Beobachtung der durch freie Konvektion verursachten Wärmeverluste und -ströme in einem Cavity-Modell.

Altay Onur  
TU München  
Lehrstuhl A für Thermodynamik

Johannes Straub  
TU München  
Lehrstuhl A für Thermodynamik

### Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden die durch freie Konvektion verursachten Wärmeübergangsvorgänge anhand eines Modells als die Absorbierstufe, wie sie in den mit der Sonnenenergie betriebenen Kraftwerken Anwendung finden, in einem Cavity (Hohlraum) mit den Abmessungen  $30 \times 30 \times 30$  untersucht, die Strömungsvorgänge bei verschiedenen Öffnungsgeometrien in diesem Labormodell durch optische Verfahren beobachtet.

In diesem Modell, dessen Oberflächen unabhängig voneinander einem Wärmestrom ausgesetzt werden können, wurden bei verschiedenen Öffnungen des Hohlraumes die Oberflächentemperaturen gemessen und Temperaturschwankungen in Abhängigkeit von der Höhe des Hohlraumes festgestellt. Mit Hilfe eines Rauches im Hohlraum wurden die Strömungsvorgänge sichtbar gemacht. In den Versuchen wurden Rayleigh-Werte bis  $4 \cdot 10^{10}$  erreicht und der Wärmeübergang in Form von  $Nu = A \cdot Ra^B$ , wobei die Geometrie des Hohlraumes als Parameter gewählt wurde, formuliert.

#### 1. Einleitung

Die Geometrie des Hohlraumes, der in den turmförmigen Sonnenkraftwerken als Absorbierstufe (receiver) angewendet wird und die Wärmeübergangsvorgänge sind in der Konstruktion solcher Anlagen sehr wichtige Punkte. Die von Spezialspiegeln, genannt Heliostat, in den Brennpunkt reflektierten Strahlen geben ihre Wärme an eine Flüssigkeit in einem Wärmetauscher ab, der sich in dem Hohlraum auf dem Turm befindet, wobei die Absorbierstufe im Brennpunkt dieser Spiegel ist.

Diese Wärme wird durch einen thermomechanischen Prozeß in Elektrizität umgewandelt. Der Wirkungsgrad eines solchen Absorbierers nimmt i. A. proportional dem Verhältnis der aktiven warmen Flächen zur Öffnungsfläche zu. Obwohl die Verkleinerung der Öffnung auf den ersten Blick als ein Faktor zur Verminderung der durch Strahlung (Radiation) und Transport (Konvektion) zu sein scheint, muß die Geometrie des Hohlraumes im Hinblick auf eine maximale Ausbeute des Wärmefflusses durch die Sonnenstrahlen, optimiert werden.

Da die Beobachtung der Wärmeübergangsvorgänge in einer Absorbierstufe in ihren reellen Abmessungen nicht möglich war, wurde ein Modell-Cavity entwickelt.

Für die Bestimmung der Temperaturverteilung im wärmeaustauschenden Fluid, welches in den Rohren der Absorbierstufe strömt und der Innenflächen des Hohlraumes, wurden in den letzten Jahren sehr umfangreiche Programme entwickelt. /1,2,3/. Der Grund dafür ist einerseits, daß sich die von den Heliostaten reflektierten Sonnenstrahlen i.A. von der Tages- und Jahreszeit ändern, andererseits die Komplexität der Wärmeübergangsvorgänge, die ausser Strahlung und Leitung auch durch freie und erzwungene Konvektion verursacht werden.

In den Arbeiten der französischen Sonnenenergieforschungsgesellschaft über die Optimierung der Hohlraumgeometrie wurden prismatische, offene und würfelförmige Modelle unter Zuhilfenahme numerischer Berechnungsverfahren unter verschiedenen Randbedingungen untersucht /4,5,6/. Ein umfangreiches Forschungsprogramm wird in den USA durch verschiedene Organisationen vorangetrieben.

## İÇİ BOŞ BİR OYUKTA DOĞAL TAŞINIM YOLUYLA ISIL KAYIPLAR VE AKIŞ HAREKETLERİNİN GÖZLENMESİ

Altay Onur

Münih Teknik Üniversitesi  
Termodinamik-A Kürsüsü

Johannes Straub

Münih Teknik Üniversitesi  
Termodinamik-A Kürsüsü

### Ö Z E T

Pratikte Kule Tipi Güneş Enerjisi Santrallerinin absorblayıcı (receiver) ünitesi model seçilerek yapılan bu çalışmada  $30 \times 30 \times 30$  cm<sup>3</sup> boyutlarındaki içi boş bir oyukta (cavity) doğal taşınım yoluyla ısı geçişi olayları incelenmiş, oyuk giriş ağzı açıklığı (aperture) geometrisinin değişik konumlarında deney modeli içindeki akış hareketleri optik yöntemlerle gözlenmiştir.

Yüzeylerine birbirinden bağımsız olarak ısı akısı verilebilen modelde, değişik oyuk açıklıklarında yüzey sıcaklıkları ölçülmüş ve oyuk yüksekliliği boyunca sıcaklık salınımları tespit edilmiştir. Model hacmine gönderilen duman yardımıyla doğal taşınımın neden olduğu akış hareketleri optik yollarla görünür hale getirilmiştir. Yapılan deneylerde Rayleigh sayısının  $4 \cdot 10^{10}$  değerlerine ulaşılmış ve ısı geçişi  $Nu = A \cdot Ra^B$  şeklinde oyuk geometrisi parametre seçilerek formüle edilmiştir.

### 1. GİRİŞ

Kule Tipi Güneş enerjisi Santrallerinde absorblayıcı ünitesini (receiver) oluşturan oyuk (cavity) geometrisi ve burada ortaya çıkan ısı geçişi olaylarının karakteri bu tip santrallerin konstrüksiyonunda önemli bir yer tutmaktadır. Heliostat adı verilen özel aynalardan yansıtılarak toplayıcı-absorblayıcı-ünitesine odaklanan güneş ışınları bir kule üzerinde bulunan oyuk içine yerleştirilmiş bir ısı değiştirgeci içinden geçen akışkana ısı enerjilerini verirler. Bu ısı enerjisi sistemdeki termomekanik bir çevrimle elektrik enerjisine dönüştürülür. Böyle bir toplayıcının verimlilik derecesi genel olarak; oyuk içindeki aktif sıcak yüzeylerin, giriş ağzı açıklığı alanına oranı ile artar. Oyuk ağzının küçültülmesi ilk bakışta toplayıcıdan ışınlım (radyasyon) ve taşınım (konveksiyon) ile olan ısı kayıpları azaltıcı bir etken olarak görülürse de oyuk geometrisi, güneş ışınlarından gelen ısı akısından en uygun yararlanılabilecek şekilde boyutlandırılmalıdır.

Böyle bir absorblayıcı ünitesi içindeki ısı geçişi olaylarının incelenmesi gerçek boyutlarda mümkün olmadığından, laboratuvar ölçülerine uygun bir model-cavity geliştirilmiştir.

Son yıllarda absorblayıcı ünitesi boruları içindeki ısı taşıyıcı akışkanlarda ve oyuk iç yüzeylerindeki sıcaklık dağılımları için oldukça büyük kapasiteli programlar geliştirilmiştir /1,2,3/. Bu denli büyük kapasiteli program yazılımının nedeni bir taraftan heliostatlardan yansıyan güneş ışınlarının günlük ve mevsimlik değişimler göstermeleri, diğer taraftan ışınının ve iletimin yanısıra doğal ve zorlanmış taşınımın neden olduğu ısı geçişi olaylarının oldukça karmaşık ve kompleks yapılar göstermelerinden kaynaklanmaktadır.

Fransız Güneş Enerjisi Araştırma Kurumu tarafından oyuk geometrisinin optimizasyonu üzerine yapılan çalışmalarda nümerik hesap yöntemleri yardımıyla prizmatik, açık ve kübik şekilli modeller çeşitli sınır şartları altında incelenmiştir /4,5,6/. Konu hakkında daha geniş bir araştırma programı Amerika'da çeşitli kuruluşlarca yürütülmektedir/7,8,9,11/.

## 2. DENEYLER VE BULGULAR

### 2.1. DENEY TESİSATI

Küb şeklinde 30x30x30 cm<sup>3</sup> boyutlarındaki model-oyuğun arka yüzeyi ①, tavan ② ve taban ③ yüzeyleri birbirinden bağımsız ısı akıları ve-rilebilen 14 mm kalınlığındaki alüminyum levhalardan oluşmuştur (Şekil-1). Modelin yanıl yüzeyleri ve ön yüz optik gözlemleri sağlamak amacıyla 8 mm kalınlığındaki sert kristal camdan yapılmıştır. Aktif yüzeylerdeki sıcaklık dağılımlarını ölçmek için Al-levhaların herbirine dokuzar adet CrNi-Konstantan termoeleman çiftleri yerleştirilmiştir. Al-levhalar dıştan 30 mm kalınlığında cam yünü ile izole edilmiş, ayrıca tesisatın tümü 40 mm kalınlığındaki styropor levhalarla örtülmüştür.

İncelenen oyuğun genel geometrisi Şekil-2 de görülmektedir. V1 hareketi ile ① numaralı yüzey konum değiştirebilmekte, böylece oyuğun hacmi değiştirilebilmektedir. V2 ve V3 yönlerindeki hareketlerle oyuk giriş ağız açıklığı (aperture) istenilen konuma ayarlanabilmektedir. Oyuuk yüksekliği b=L=300 mm olmak üzere, oyuk geometrisi parametreleri; a/b, c/b ve d/b boyutsuz büyüklükleri seçilmiştir. İncelenen çeşitli geometrilerdeki oyuk modeller Şekil-3 de görülmektedir.

## 2.2. SICAKLIK ÖLÇMELERİ

Sürekli rejim halinde ①, ② ve ③ nolu yüzey sıcaklıkları ve  $y/c = 0,5$  koordinatındaki oyuk yüksekliği boyunca sıcaklık dağılımları ısıl gerilimleri  $0,069 \text{ mV/K}$  olan CrNi-Konstantan termoelemanlarla ölçülmüştür. Oyuk taban ② ve tavan ③ yüzeyleri arasındaki sıcaklık dağılımları çeşitli oyuk geometrilerinde ve ısı akılarında ölçülmüştür. Şekil-4 de ölçülen sıcaklık değerleri  $x/b$  koordinatı boyunca ve ① nolu aktif düşey yüzeyin ısıtıldığı hale karşılık gelmektedir. Parametre olarak bu hal için  $d/b$  oranı seçilmiştir.

Farklı aktif yüzey sıcaklıklarında yapılan ölçmelerde belli bir oyuk geometrisi için iç bölgedeki sıcaklık dağılımlarının birbirlerine benzer özellikler gösterdiği görülmüştür. Oyuğun tamamen kapalı olduğu konumda ( $a/b = c/b = d/b = 1$ ) alt ve üst yüzeylerde oluşan sınır tabaka göz önüne alınmadığında, bu sıcaklık dağılımının oldukça lineer bir değişme gösterdiği gözlenmiştir. Sıcaklık gradyenti oyuğa verilen ısı şiddetiyle artmaktadır. Oyuk geometrisinin  $d/b < 1$  konumunda açıklık yüksekliği üstünde kalan  $1 < x/b < 1 - d/b$  bölgesinde sıcaklık dağılımı lineer olmakta, bu bölgenin altında ise sıcaklık profilinin bu düzgün dağılımı kaybolmakta ve gradyenti hissedilir derecede değişmektedir. Oyuk açıklığı yüksekliği seviyesinde ortaya çıkan dönüm noktasından geçen yatay doğru üzerinde "ölü bölge" diye adlandırabileceğimiz az hareketli bir konvektif akım oluşmakta, bu hattın altında ise giriş ve çıkış akış hareketlerinin birbirlerini tedirgin ettiği karmaşık akışlı bir bölge gözlenmektedir. Sıcaklık gradyentinin en büyük olduğu bu dönüm noktasında sıcaklık salınımları da en yüksek değerlerine ulaşmaktadır.

## 2.3. ISIL KAYIPLAR

Oyuk ısı kayıpları çeşitli model geometrilerinde sabit ısı akıları altında ölçülmüştür. Şekil-5 de ① nolu aktif yüzeyin sıcaklıkları  $T_{w1}$  apsis eksenini alınarak  $Q$  ısı kayıpları ikinci dereceden bir yaklaşımla çeşitli oyuk geometrileri için çizilmiştir. Yüzeyin oyuğa verdiği ısı akısı ( $Q$ ); taşınım ( $Q_t$ ), iletim ( $Q_i$ ) ve ışınım ( $Q_r$ ) yoluyla olan kayıp ısı akıları toplamına eşittir. İncelenen herhangi bir geometride dış ortama iletim ve ışınım olan kayıplar hesaplanarak diyagrama taşınırsa, herhangi bir aktif yüzey sıcaklığı için ordinat ekseninden taşınım olan ısı kaybı (1) bulunabilir;

$$Q_t = Q - Q_i - Q_r \quad (1)$$

Taşınım yoluyla olan ısı kayıplara iyi bir yaklaşım oyuk geometrisine uygun bir parametre ve efektif bir yüzey ( $A_{ef}$ ) tanımıyla sağlanmıştır. Taşınım yoluyla ısı kaybı;

$$Q_t = h \cdot A_{ef} \cdot (T_{cav} - T_{\infty}) \quad (2)$$

yazılabilir. Burada  $h$  aktif yüzeye ait ısı taşınım katsayısı,  $T_{cav}$  oyuk içindeki ortalama cavity sıcaklığı,  $T_{\infty}$  dış ortam (atmosfer) sıcaklığını belirtmekte olup

$$A_{ef} = U_{cav} \cdot H \quad (3)$$

şeklinde tanımlanmıştır.  $H$  oyuk açıklığı yüksekliğini,  $U_{cav}$  Cavity-Model çevresinin kapalı uzunluğunu ifade etmektedir. Karakteristik uzunluk olarak (4) denkleminde belirtilen  $H_{ef}$  efektif açıklık seçilmiştir;

$$H_{ef} = A_{ef} / b \quad (4)$$

Buna göre Grashof sayısı;

$$Gr = g \cdot B \cdot (T_{cav} - T_{\infty}) \cdot H_{ef}^3 / \nu^2 \quad (5)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Örneğin oyuk geometrisi  $d/b$  sırasıyla; 0,0 / 0,5 / 0,7 ve 0,9 seçilerek yapılan deneylerde  $h \cdot H_{ef} / k$  tanımına uyan Nusselt değerleri Şekil-6 da belirtilmiştir. Bu oyuk parametresine göre  $Nu = A \cdot Ra^B$  şeklinde lineer bir yaklaşım aranmış ve aşağıdaki katsayılar tablosu bulunmuştur;

$d/b$	A	B
0,9	$4,43 \cdot 10^{-4}$	0,7274
0,7	$9,31 \cdot 10^{-5}$	0,7288
0,5	$3,33 \cdot 10^{-3}$	0,5188
0,0	$1,72 \cdot 10^{-2}$	0,4270

Şekil-7 de oyuk giriş ağız açıklığı, cavity yüksekliğinin yarısı ( $d/b=0,5$ ) için  $Nu$  sayısının Rayleigh sayısına göre değişimi görülmektedir.

#### 2.4. AKIŞ HAREKETLERİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Oyuk içindeki oldukça karmaşık akış hareketlerinin gözlenmesini sağlamak amacıyla özel bir üreteçten alınan duman oyuk giriş ağız civarına verilmiştir. Konveksiyon hareketleri etkisiyle oyuk içine emilen dış hava, dumana da beraberinde sürüklediğinden akım çizgileri akım çizgileri iki boyutlu düzlemlerde incelenmiştir. Dumana görünür hale getirmek için düzlemsel ışık kaynağı veren bir diaprojektör kullanılmıştır. Aydınlatılan

bölgeden geçen duman parçacıkları ışığı yansıtmakta, dumanla karışmayan bölgeler ise karanlık kalmaktadır. Oyuk yüksekliği boyunca akış alanlarının iki boyutlu incelendiği sürekli rejim halinde aşağıdaki noktalar saptanmıştır;

a) Dumanın izlediği akış hareketleri: Sürekli rejim halinde herhangi bir  $t=0$  anında oyuğa sürekli gönderilen duman, oyuk içindeki hava akımlarının hareketini karakterize etmektedir.

b) Sürekli rejimde akış hareketlerini belirleyen akım çizgileri: Oyuğa duman gönderildikten bir süre sonra oyuk içindeki kararlı yapı gözlenmektedir. Bu halde periyodik salınımlar yapan girdaplı bölgeler ve akışın yığıldığı yöreler belirlenmektedir.

Oyuk içindeki akış hareketlerinin gözlenmesinde çok sayıda fotoğraf çekilmiştir. Sürekli gözlem ve fotoğrafların birlikte değerlendirilmesi /10/ sonucu oyuk model için aşağıdaki kalitatif (nitel) değerlendirmeler yapılmıştır:

1) Oyuk iç yüzeyleri: Isı akısı verilen ① numaralı düşey arka yüzey boyunca hava ısınmakta ve taşınım hareketlerinin neden olduğu yoğunluk farklılığı ile yukarıya yükselmektedir. Bu akış hareketi düşey duvar boyunca çok ince bir sınır tabaka içinde olmaktadır. Tavana çarpan bu akış  $90^{\circ}$  lik bir sapmaya uğramakla birlikte sınır tabakalı akış karakterini korumaktadır. Impuls kuvvetiyle daha sonra ön yüzeye çarpan bu akış hareketi karşı kaldırma kuvvetleri ile dengeleninceye kadar ön yüzey boyunca aşağıya doğru inmektedir. Oyuk açıklığına doğru ilerleyen bu sınır tabakalı akışın yanısıra, açıklık geometrisine bağlı olarak sınır tabakadan ayrılan ard arda bir dizi girdaplı hareketler ortaya çıkmaktadır. Ayrıca tavan yüzeyi boyunca oldukça yavaş hareketler yapan ve diğer iç bölgelerden kolayca ayırt edilebilen geniş bir girdaplı bölge oluşmaktadır.

2) Oyuk iç bölgesi: Yüzey cidarlarına göre daha yavaş akış hareketlerinin gözleendiği iç bölgede aktif yüzey sıcaklıkları ve model geometrisine bağlı olarak az veya çok sayıda girdaplı ve durgun bölgeler gözlenmektedir. Ön yüzey boyunca aşağıya doğru ilerleyen akışın impuls kuvvetlerinin, kaldırma kuvvetleriyle sönmüldüğü bölgede yığılma gösteren akışın bir kısmı oyuk açıklığına doğru ilerlerken, içerde kalan kısmı yatay doğrultuda iç bölgeye doğru ilerlemekte ve daha sonra açıklığa yönelmektedir.

3) Giriş ve çıkış akışları: Oyuğa giren ve çıkan hava akımları doğrudan doğruya oyuk geometrisi parametrelerine (c/b, d/b) bağlı olmaktadır. Açıklığın en alt bölgesinden içeriye doğru emilen dış hava taban ③ yüzeyi boyunca ilerlemekte ve bir kısmı türbülans akımları ile dışarıya sürüklen-

mekte, bir kısmı ise sıcak düşey yüzeye ① çarparak sınır tabaka hareketlerine karışmaktadır.(Şekil-8)

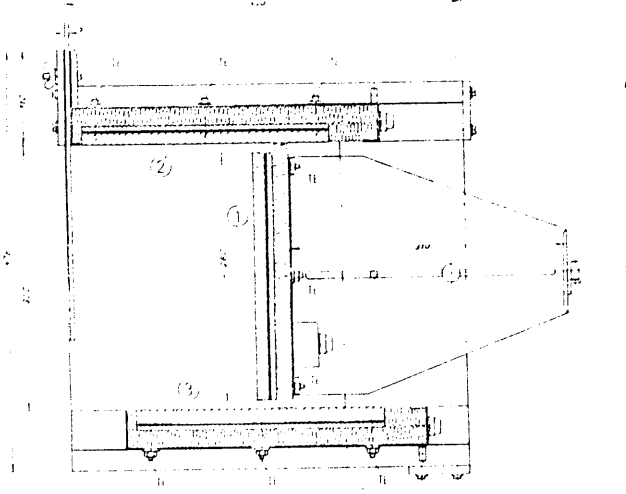
### 3. SONUÇ:

Güneş Kulesi Elektrik Santrallerinde güneş ışınlarının içi boş bir oyugu andıran bir toplayıcı içindeki havayı ısıtarak, bu enerjinin absorblayıcı borulardan geçen ısı taşıyıcı akışkana (ara madde) verilmesi konusunda uygun bir çözüm bulunabilmesi için yapılacak çalışmalar daha uzun yıllar süreceğe benzemektedir. Bunun için yüzeylerdeki ısı geçişi olayları ve taşınımın neden olduğu akış hareketlerinin çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Laboratuvar şartlarında, uygun modeller üzerinde yapılan deneylerden elde edilecek quantitatif ve qualitatif değerlendirmelerin nümerik simülasyon yöntemleriyle karşılaştırılması gerekir. Diğer taraftan içi boş oyuklardaki ısı geçişi olaylarının belirlenmesi, güncel ısı tekniği ve enerji depolaması problemlerinin çözümüne de önemli bir yaklaşıma getirecektir.

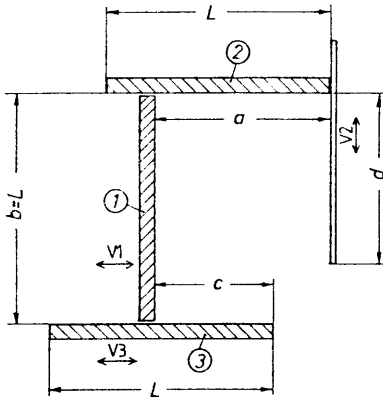
### KAYNAKLAR:

- /1/ Reinkenhof, J. Computersimulation eines Solarturmkraftwerks. Institut für Chemische Antriebe und Verfahrenstechnik der DFVLR, DFVLR-Nachrichten, Heft 37, Nov.1982.
- /2/ Küblbeck,K., Merker,G.P., Straub,J. Advanced numerical computation of two-dimensional time-dependent free convection in cavities, Int.J.Heat Mass Transfer, Vol.23, pp.203-217, 1980.
- /3/ Straub,J., Küblbeck,K., Numerische Berechnung der freien Konvektion in der Solarreceiver-Cavity des Projektes GAST, Bericht des Lehrstuhl A für Thermodynamik der TU München, 1982.
- /4/ Penst,F., Transfer de chaleur par convection naturelle dans une cavité rectangulaire isotherme ouverte sur une face, Revue Phys. Appl.15,207-212, 1980.
- /5/ Haziza,C., Blay,D., Analytical and experimental determination of radiation and temperature distributions inside solar receivers, Revue Phys. Appl.15, 139-142, 1980.
- /6/ Bernard,J., Contribution à l'étude des cavités rayonnantes et des chaudières solaires, Thèse de docteur-ing., Poitiers/France, Déc. 1977.
- /7/ Gallagher,R.J., Abrams,M., Kraabel,J.S., Energy Losses from Solar Thermal Central Receiver Systems, Sandia Nat. Lab.,Livermore,CA,USA,1980.
- /8/ Clausing,A.M., The convective energy loss from cavity receivers-predictions and experimental evidence, Dept. of Mechanical and Industrial Eng.,Univ.of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, USA, 1980.
- /9/ Kyriakides,I., Sernas,V., An experimental study of natural convection in an open cavity, Rutgers University, New Jersey, USA, 1981.
- /10/ Straub,J., Onur,A., Strömungsvorgaenge und Waermeverluste in einem Cavity-Modell, Bericht des Lehrstuhls A f. Thermodynamik der TUM,1983.
- /11/ Hess,C.F., Henze,R.H., Experimental investigation of natural convection losses from open cavities, J. Heat Transfer,vol.106,333-338, May 1984.



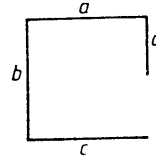


Şekil-1 : İçi boş oyuk (cavity--model) deney tesisatı.  
1, 2, 3 :Aktif yüzeyler  
TE :Termoeleman bağlantıları



Şekil-2 : Oyuk genel geometrisi

Geometri-I

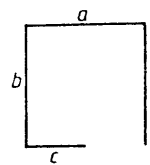


$$a/b = 1$$

$$c/b = 1$$

$$d/b : \text{değişken}$$

Geometri-II

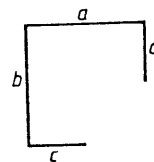


$$a/b = 1$$

$$c/b : \text{değişken}$$

$$d/b = 1$$

Geometri-III

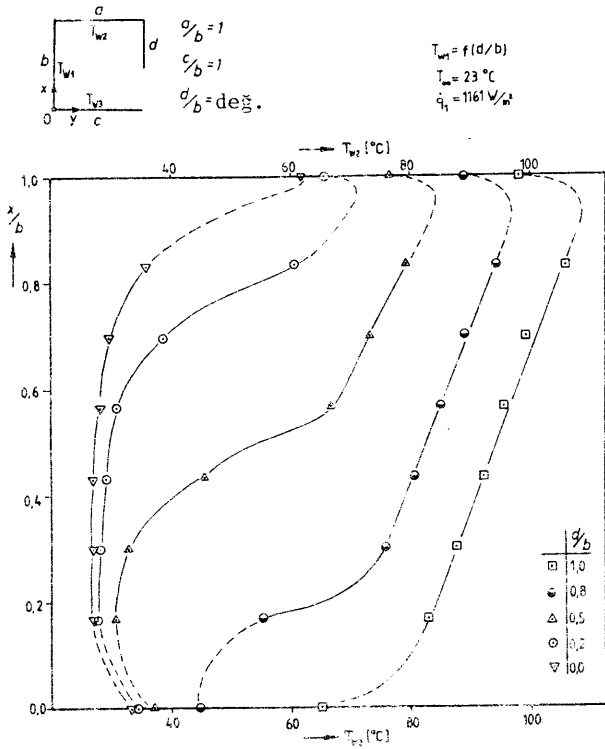


$$a/b = 1$$

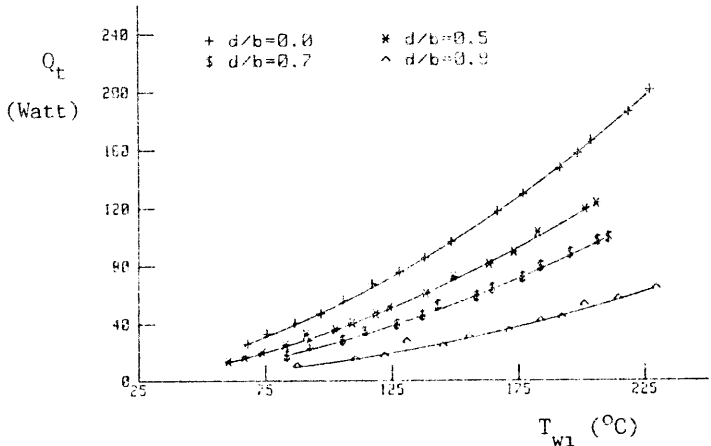
$$c/b : \text{değişken}$$

$$d/b : \text{değişken}$$

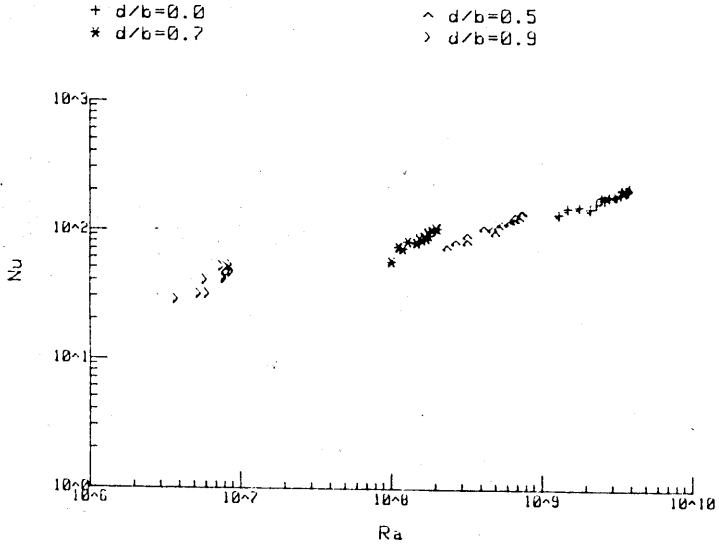
Şekil-3 : Çeşitli oyuk-model geometrileri.



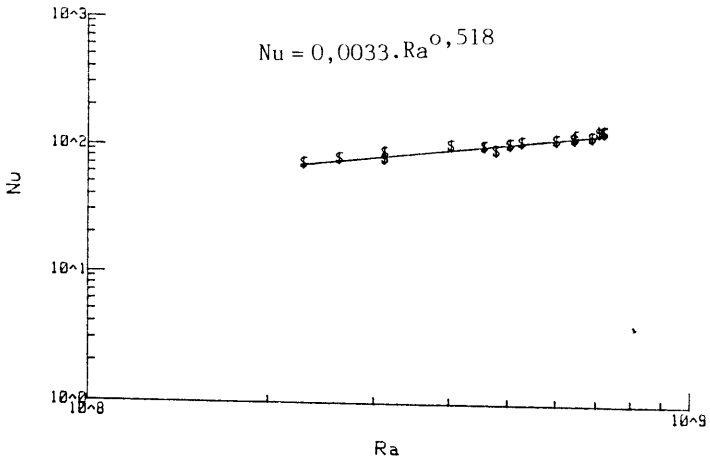
Şekil-4 :  $y/c = 0,5$  koordinatı boyunca, düşey yöndeki sıcaklık dağılımları ( $3 \cdot 10^6 < Ra < 3 \cdot 10^9$ ).



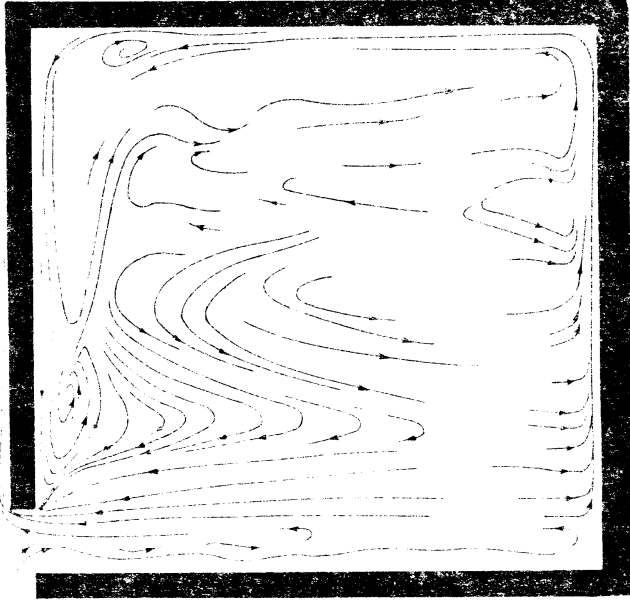
Şekil-5 : Oyuk geometrisi  $d/b$  parametresine göre doğal taşınım yoluyla ısı kaybı eğrileri.



Şekil-6 : Oyuk geometrisi  $d/b$  parametresi için Nusselt sayısının dağılımı.



Şekil-7 : Oyuk geometrisi  $d/b=0,5$  için Nusselt sayısının Rayleigh sayısına göre değişimi.



Şekil-8 : Oyuk geometrisi  $d/b=0,9$  halinde duman-fotoğrafı ve akış çizgilerinin tasviri. (Aktif yüzey ısı akısı  $Q_1=2618,2 \text{ W/m}^2$ ,  $T_{w1}=244 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_\infty=23,6 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $Ra \sim 8 \cdot 10^6$  ).