

169191

**DIŞ KAPLAMASINDA FIRINLAMA SONRASI  
OLUŞAN TERMAL GERİLMELERİN  
BULUNMASI**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Yüksek Lisans Tezi**

**Makina Mühendisliği Bölümü , Mekanik Anabilim Dalı**


**Ahmet BULCA**

**Haziran, 2005**


**İZMİR**

## YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU


AHMET BULCA, tarafından Doç. Dr. MEHMET ZOR yönetiminde hazırlanan “DİŞ KAPLAMASINDA FIRINLAMA SONRASI OLUŞAN TERMAL GERİLMELERİN BULUNMASI ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

  
Doç. Dr. Mehmet ZOR

Yönetici

  
Yrd. Doç. Dr. Erren Poygar

Jüri Üyesi

  
Yrd. Doç. Dr. İsmail ÖZDEMİR

Jüri Üyesi

  
Prof. Dr. Cahit HELWACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanmasında bilgi ve birikimini benden esirgemeyen karşılaştığım her problemde fikir ve önerileriyle bana destek olan danışmanım Doç.Dr. Mehmet ZOR 'a , bilgisini ve yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Yunus A. ÇENGEL'e , E.Ü. Diş Hekimliği Fakültesi'nden Dr. M.Ali GÜNGÖR 'e , D.E.Ü Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Anabilim Dalı 'ndaki değerli hocalarıma teşekkür ederim.

Bana her konuda maddi ve manevi olarak destek olan annem Şahsene BULCA 'ya , babam A.Cevat BULCA 'ya , ağabeyim E.Cüneyt BULCA 'ya , ablam Ayşegül B. GÖLBOYU 'na , diğer aile üyelerime ve desteklerinden dolayı arkadaşlarım Dilek ÜNAL'a , Erkin ALTUN SARAY 'a teşekkür ederim.

Ahmet BULCA , İzmir 2005

## **DİŞ KAPLAMASINDA FIRINLAMA SONRASI OLUŞAN TERMAL GERİLMELERİN BULUNMASI**

### **ÖZ**

Bu çalışmada, porselen kuronun firinlanması sonunda oluşan ısı gerilmeler incelenmiştir. Sıcaklık ölçümü deneyi ile porselen kuronun firından çıktıktan sonraki soğuma eğrisi elde edilmiştir. Yavaş soğumanın etkisini gözlemek için dört farklı ortam için de soğuma eğrileri tanımlanmıştır. Bu beş ortamda oluşan ısı gerilmeler incelenmiş ve mukayese edilmiştir.

Alt azı diőtisi için hazırlanmış bir porselen kaplama kullanılmıştır. Gerilme analizi Ansys paket programında yapılmıştır. Azı diőtisinin dönele simetrik geometrisi nedeniyle 2-boyutlu model ile analiz gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, porselen kaplamanın firinlanması sonrasında oluşan ısı gerilmelerin soğuma hızına bağlı değişimleri tespit edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde daha yavaş soğuma ortamlarında gerilmelerin düőtüėü, maksimum gerilmelerin ise soğumanın tamamlanmasından biraz önce ortaya ıktığı görülmüştür.

**Anahtar sözcükler : Porselen kaplama, Isı gerilme analizi, Firinlama**

# **DETERMINATION OF THERMAL STRESSES IN TOOTH CROWN AFTER FIRING**

## **ABSTRACT**

In this study , thermal stress in porcelain crown after firing was examined. Porcelain crown's cooling curve after firing was brought out with experiment of temperature measure. Cooling curves in four difference environments were defined to examine effect of slow cooling. Thermal stresses in this five environments were examined and compared.

Porcelain crown that prepared for molar tooth in mandible was used. Structural analyses were performed for two dimensinal model because of axisymmetric geometry of molar tooth , by using Ansys software programme.

The Aim of this study is determination of the thermal stresses in porcelain crown , according to the velocity of the cooling. The results show that the stresses decrease at slow cooling and the maximum values of the stresses appear on a little before finishing of the cooling process.

**Keywords : Porcelain crown , Thermal stress analysis , Firing**

## İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ SINAV SONUÇ FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ.....	iv
ABSTRACT.....	v
<b>BÖLÜM BİR – GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>BÖLÜM İKİ – MALZEME VE YÖNTEM.....</b>	<b>3</b>
<b>BÖLÜM ÜÇ – SOĞUMA EĞRİLERİ.....</b>	<b>6</b>
3.1 Sıcaklık Ölçümü Deneyi İle Soğuma Eğrisinin Elde Edilmesi.....	6
3.1.1 Porselen Kaplamanın Fırınlanması.....	6
3.1.2 Sıcaklık Ölçümünün Yapılışı.....	7
3.2 Yavaş Soğuma Eğrilerinin Elde Edilmesi.....	13
<b>BÖLÜM DÖRT – MODELLEME VE ANALİZ.....</b>	<b>21</b>
4.1 Modelin Oluşturulması.....	22
4.1.1 Geometrik Modelin Oluşturulması.....	22
4.1.2 Malzeme Özelliklerinin Girilmesi.....	23
4.1.3 Soğuma Eğrilerinin Girilmesi.....	25
4.2 Isıl Analiz.....	27
4.3 Structural Analiz.....	32
<b>BÖLÜM BEŞ – ANALİZ SONUÇLARI.....</b>	<b>35</b>
5.1 Üç Boyutlu Grafiklerle Sonuçların İncelenmesi.....	36
5.2 Gerilme Dağılımı Şekilleriyle Sonuçların İncelenmesi.....	38
5.3 Gerilme-Zaman Eğrileriyle Sonuçların İncelenmesi.....	39
<b>BÖLÜM ALTI – DEĞERLENDİRME.....</b>	<b>62</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>63</b>

## BÖLÜM BİR

### GİRİŞ

Dişin insan sağlığı için önemi çok büyüktür. Dişlerden bir yada bir kaçının eksikliği, aşırı derecede madde kaybı, herhangi bir nedenle renk değişikliği, dişlerin kırılması hastayı en kısa sürede diş hekimine götürür. Bu gelişin nedeni çiğneme gücünün yanı sıra hastanın estetiğinin bozulmasıdır.

Diş hekimi hastasına uyguladığı restorasyonla, dişin fonksiyonlarını yerine getirmesini ve estetik bir görünüme kavuşmasını amaçlamaktadır. Dolguyla restore edilemeyecek kadar hasara uğramış dişler kesilerek uygun bir malzemeyle kaplanır. Bu kaplamaya kuron denir. Kuron malzemesi restorasyonun ömrü, biyolojik uyumluluğu ve estetik görünümü için çok önemlidir. Estetiğin sağlanması için geçen yüzyılda tüm seramik restorasyonlar kullanılmaya başlanmıştır. Ancak dayanıklılıklarının az olması en önemli dezavantajı olmuştur. Bu kuronlar, 1960'larda metal destekli seramikler bulunana dek oldukça yaygın olarak kullanılmışlardır. (Küçük ,1999)

Metal destekli seramik kuronların ise pek çok sakıncaları vardır. Alaşımların fırınlanması sonucu oluşan oksidasyon ve korozyon ürünleri, biyoyumluluğun azalmasına yol açar. Kron, metal bandın estetiği bozması, metalin ışık geçirgenliğini engellemesi nedeniyle mat ve cansız görünür. Bu nedenlerle, daha iyi bir estetik ve yüksek biyoyumluluk arayışı, yüksek dayanıklılıktaki tüm seramik restorasyon sistemlerinin geliştirilmesini sağlamıştır. Yeni teknoloji ile üretilen malzemeler 1980'lerin ilk dönemlerinde güçlendirilmiş ve tüm seramik kronlarda önemli gelişmeler yaratmıştır. (Akin , 1990)

Tüm seramik restorasyonlar yapım tekniklerine göre ise aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir :

- Isıya dayanıklı model üzerinde hazırlanan tüm seramik restorasyonlar (Cerestore, Hi-Ceram, In-Ceram)

- Dökülebilir cam seramiklerle hazırlanan restorasyonlar  
(Dicor, Cerapearl)
- Isı ve basınçla şekillendirilen seramiklerle yapılan restorasyonlar  
(IPS Empress, IPS Empress2,)
- Bilgisayar yardımıyla freze tekniğine dayalı seramik sistemleri  
(CAD-CAM restorasyonlar (Cerec, Procera ) )
- Kopyalama-freze tekniğine dayalı sistemler  
(Celay kopyalama-freze tekniği, Celay-In-Ceram kombine  
kopyalama-freze tekniği)

Isı ve basınçla şekillendirilen sistemler en estetik ve en yeni teknoloji ürünüdür. Kaybolan mum tekniğiyle pres döküm tekniğinin kullanıldığı bir tekniktir. Yapısında lōsit kristalleri bulunan özel bir seramik kullanılmaktadır. Hazırlanmasında öncelikle toz formundaki ürün silindir şeklinde kalıpların içinde preslenir ve pişirilir. Bu şekilde “ingot” denilen tabletler oluşur. Bu tabletler iki ayrı boyda ve farklı renklerde hazırlanmıştır. Dişin rengine ve kavitenin boyutlarına uygun tabletler eritilerek mumdan kalan döküm boşluğuna preslenerek gönderilir. IPS Empress sistemlerinde maksimum estetik sağlanabilmesi için ön bölge restorasyonlarda tabakalama ve arka bölge restorasyonlarda boyama teknikleriyle renklendirilirler. (Darcan , 2003)



## BÖLÜM İKİ

### MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmada tüm seramik bir dişin üretiminde fırınlanması sonrasında soğumanın etkisiyle oluşan ısıl gerilmeler incelenmiştir. Kullanılan malzemeler IPS Empress 2 ve Ceramco'dur.

IPS Empress 2 920 °C'de fırında preslenir. Daha sonra üzerine bir fırça yardımıyla Ceramco sürülür. İki malzeme 750 °C'de fırınlanarak son halini alır. Yaptığımız çalışma bu işlemde kaplamanın 750 °C'de fırından çıktıktan sonra oda koşullarına kadar soğuması esnasındaki gerilmelerin belirlenmesidir.

Dişçilikte tüm seramik kron malzemesi olarak yeni geliştirilen porselenlerle birlikte çok sayıda seçenek vardır. Bu çalışmada kullandığımız IPS Empress 2 ve Ceramco'nun oda koşullarındaki malzeme özellikleri Ege Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi aracılığıyla üretici firmalardan temin edilmiştir. Ancak yapacağımız analizlerde bazı malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağlı girilmesinin sonuçlar açısından çok önemli olduğu şüphesizdir. Literatürden bazı yüksek sıcaklıklardaki malzeme özellikleri değerleri ve benzer dental porselenler için malzeme özelliği - sıcaklık değişim tabloları elde edilmiştir. IPS Empress 2 ve Ceramco'nun oda koşullarındaki malzeme özellikleriyle literatürden elde edilen veriler kullanılarak, eksik noktalarda benzer dental porselen malzeme özelliği tablolarına uygun eğriler uyumlayarak, IPS Empress 2 ve Ceramco için malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağlı değişimleri elde edilmiştir.

(Dai K. & Shaw L.,2003) , (Güngör M.A. & Küçük M.ve diğerleri ,2004)  
([www.lib.umich.edu](http://www.lib.umich.edu)),([www.ceramics.nist.gov](http://www.ceramics.nist.gov)),([www.degudent.com](http://www.degudent.com)),  
([www.wade.co.uk](http://www.wade.co.uk))

Empress 2 ve Ceramco için poisson oranı ve yoğunluk Tablo 2.1'de verilmiş olup sıcaklığa bağlı değişmediği kabul edilmiştir. Isıl genleşme katsayısı Tablo 2.2'de

Elastisite modülü Tablo 2.3'de, Isı iletim katsayısı Tablo 2.4'de, Isıl kapasite Tablo 2.5'de verilmiştir.

Tablo 2.1 : Poisson oranı ve Yoğunluk

Malzeme	Poisson Oranı	Yoğunluk (Kg/m <sup>3</sup> )
IPS Empress 2	0,25	2400
Ceramco	0,19	2410

Tablo 2.2 : Sıcaklığa bağlı Isıl genleşme katsayısı

Sıcaklık	IPSEmpress 2	Ceramco
[K]	$\alpha$ (10 <sup>-6</sup> /K)	$\alpha$ (10 <sup>-6</sup> /K)
300	10,6	12,93
520	11,16	13,49
631	11,67	14,00
700	12,07	14,40
830	13,05	15,38
960	14,34	16,67
1173	17,23	19,56

Tablo 2.3 : Sıcaklığa bağlı Elastisite Modülü

Sıcaklık	IPS Empress 2	Ceramco
[K]	E (GPa)	E (GPa)
300	95	70
520	80,6	55,6
631	73,4	48,4
700	68,9	43,9
830	60,4	35,4
960	51,9	26,9

Tablo 2.4: Sıcaklığa bağlı Isı İletim Katsayısı kat sayısı

Sıcaklık	IPS Empress 2	Ceramco
[K]	k (W/mK)	k(W/mK)
300	1,467	1,055
520	1,727	1,315
631	1,907	1,495
700	2,027	1,615
830	2,287	1,875
960	2,587	2,175
1173	3,177	2,765

Tablo 2.5: Sıcaklığa bağlı Isıl kapasite

Sıcaklık	IPS Empress 2	Ceramco
[K]	C (J/kgK)	C(J/kgK)
300	976	817
520	1259	1100
631	1359	1200
700	1412	1253
830	1500	1341
960	1575	1416
1173	1678	1519

Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemiyle gerilme analizi yapılacaktır. Sonlu elemanlar yöntemi mühendislik problemlerinin geniş bir kısmında sayısal çözümleme için güçlü bir araç haline gelmiştir. Otomotiv, uçak sanayi, inşaat, köprü yapıları, ısı transferi, akışkanlar mekaniği, manyetik akış ve bir çok akışkan problemlerinin gerilme analizi ve deformasyonunda uygulamaları vardır. Bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle ve CAD sistemleriyle karmaşık problemler basit bir şekilde modellenilebilir. Bir prototip yapmadan bilgisayar üzerinde bir çok alternatif oluşturularak test edilebilir. Bu analiz metodunda kompleks bir geometriye sahip bir problem sonlu elemanlar diye adlandırılan basit geometrik şekillere bölünerek ağ şeklinde tanımlanabilir. Bu elemanlar düğüm noktalarıyla birbirine bağlanmakta ve denge halinde bulunmaktadır. Elemanların birbirine bağlı olduğu her nokta için denklemlerin çözümüyle dengedeki değişimler bulunabilir. Sonlu elemanlar teorisini kullanan farklı yazılımlar ve paket programlar kullanılmaktadır. Bu çalışmada Ansys 6.1 paket programı kullanılmıştır. (Chandrupatla T.R. & Belegundu A.D. ,2002)

Analiz için sıcaklık ölçümüyle porselenin soğuma eğrisi elde edilmiştir. Yavaş soğumanın etkisini incelemek için Excel programıyla soğuma eğrileri çıkartılmıştır. Bölüm 3 'de sıcaklık ölçümü ve soğuma eğrilerinin nasıl elde edildiği anlatılmıştır. Bölüm 4 'de Ansys programında problemin modellenmesi ve analizinin yapılması anlatılmıştır. Bölüm 5 'de analiz sonuçlarına yer verilmiştir. Bölüm 6 'da değerlendirme yapılmıştır.

## BÖLÜM ÜÇ

### SOĞUMA EĞRİLERİ

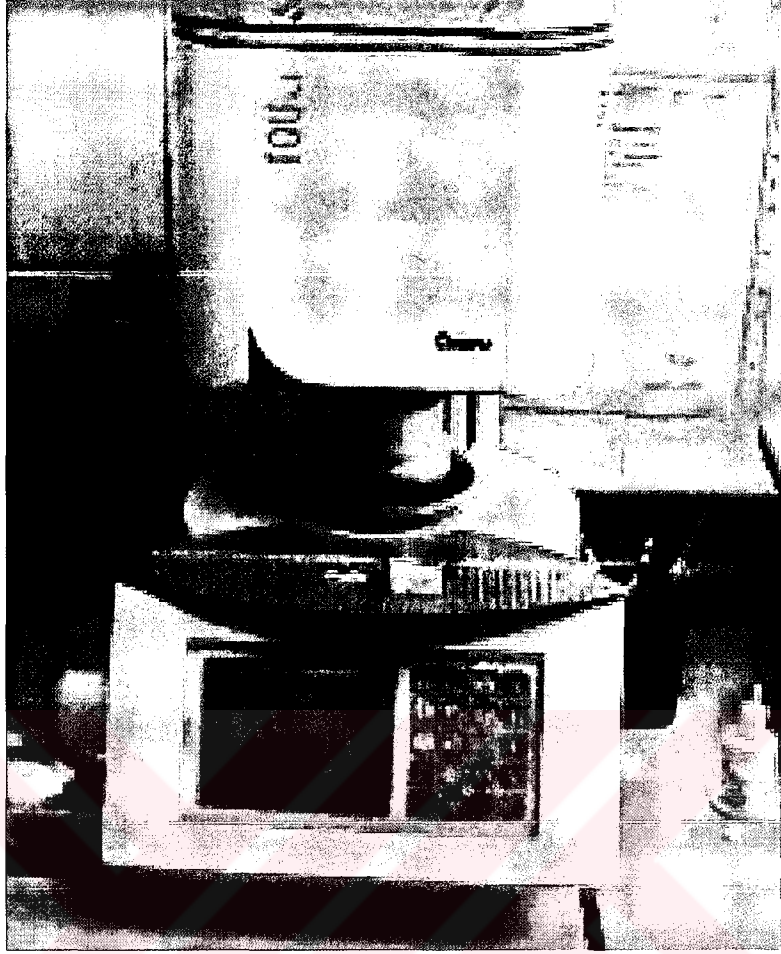
#### 3.1 Sıcaklık Ölçümü Deneyi İle Soğuma Eğrisinin Elde Edilmesi

IPS Empress 2 ve Ceramco üretici firmaların belirlediği şekilde fırınlanır. Fırından 750 °C’de çıkar ve kısa bir sürede oda sıcaklığına kadar düşer. Bu çalışmada IPS Empress 2’nin ve Ceramco’nun birlikte fırınlama işleminden sonra, oda koşullarına soğuma esnasında oluşan ısıl gerilmeleri inceleyeceğimizi söylemiştik.

Sonlu elemanlar yöntemiyle yapacağımız analizde sınır koşulu olarak yüzey sıcaklıkları girilerek çözüm yaptırılacaktır. Çözümleme de porselen kaplamanın iç kısmının ve dış kısmının yüzey sıcaklıklarının ayrı, ayrı girilerek çözüm yapılması daha uygun görülmüştür. Bunun nedeni çok küçük ve ince bir malzeme olmasına karşın geometrisi nedeniyle iç yüzeyin dış yüzeyden daha geç soğuyacağını düşünülmesidir. Çözümleme için iç ve dış yüzey sıcaklıklarının ölçme yoluyla belirlenmesi gerekmektedir.

##### 3.1.1 Porselen Kaplamanın Fırınlanması

Porselenin pişirilmesi için kullanılan fırın Şekil 3.1’de görülmektedir. Porselen kaplama hazırlandıktan sonra fırının dairesel tablasına yerleştirilir. Tabla hareket ederek fırın kapanır. Pişmiş ve sertleşmiş porselen fırından 750 °C’de çıkar. Önce fırının alt tablası açılır. Fırından 25 cm kadar aşağı iner. Bu işlemi 10 sn’de yapar. Porselen bu konumda yaklaşık olarak 3-5 dakika bekletilir. Bu bekletme süresinin amacı daha yavaş soğuma sağlanması ve ani soğumayla oluşacak çatlakların önlenmesidir. 3-5 dakika geçtikten sonra porselen tabladan alınarak fırının ön tarafındaki plaka üzerine konur ve burada oda sıcaklığına kadar soğuması beklenir.



Şekil 3.1 : Porselen pişirme fırını

Bizim yapacağımız sıcaklık ölçümü, porselen kaplamanın 750 °C'de fırının kapağının açılmasından itibaren, oda sıcaklığına soğumasına kadar geçen süre içerisinde porselen kaplamanın soğuma eğrisinin çıkartılmasına yöneliktir.

### *3.1.2 Sıcaklık Ölçümünün Yapılışı*

Sıcaklık ölçümü termokupl teli yardımıyla yapılmıştır. Bunun için bir çift 0,5 mm<sup>2</sup> kesitli Ni – Cr termokupl teli kullanılmıştır. Bu Ni – Cr teller datağa bağlanarak sıcaklık ölçülebilecektir.

İlk önce teller iki delikli seramik bir borunun içinden geçirilerek tellerin yalıtımı sağlanmıştır. Daha sonra tellerin açıkta kalan uçları nokta kaynağıyla birleştirilmiştir.

Tellerin kalibrasyonu 100 °C'de kaynayan suyun içinde ve 0 °C'de su-buz karışımında yapılmıştır.

Porselen kaplamanın iç yüzeyinin ve dış yüzeyinin soğuma eğrilerinin belirlenmesi için iki defa ölçüm yapılmıştır. Birinci ölçümde iç yüzeyinin ikinci ölçümde dış yüzeyinin sıcaklıkları ölçülmüştür.

Dişçilikte porseleni pişirmek için kullanılan fırınlar vakum altında çalıştıklarından dolayı fırınlarda hiçbir delik bulunmamaktadır. Teller porselene fırına konmadan önce yerleştirilememektedir. Bundan dolayı porselen fırından çıktıktan sonra teller yerleştirilir. Ancak tellerin ısınmasına kadar geçen sürede ölçüm yapılamamaktadır. Ayrıca fırının kapağı açıldıktan sonra alt tablanın sabit konuma gelmesi de yaklaşık 10 sn. sürmektedir. Bu zaman diliminde de ölçüm yapılamamaktadır. Yani belirli bir kayıp zaman oluşmaktadır.

İç yüzeyinin ölçümünde 56. saniyede sıcaklık değeri okunabildi. Bunun nedeni yukarıda bahsettiğimiz nedenlerle oluşan kayıp zamandır. 56. sn'de iç yüzey sıcaklığı 440 °C olarak okundu. Dış yüzeyin ölçümünde de ilk okunabilen sıcaklık 53. saniyede 340 °C dir.

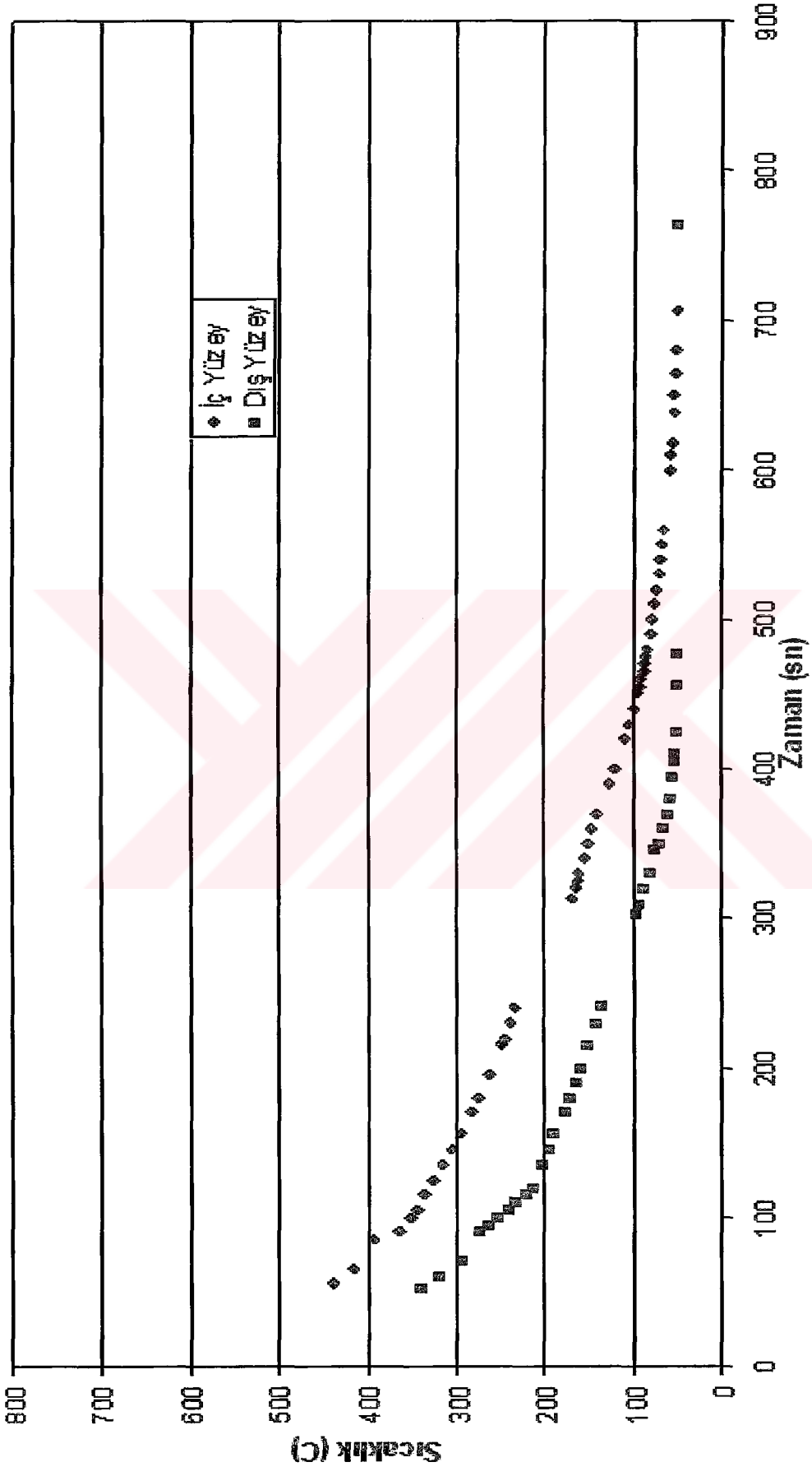
Porselen kaplama fırının tablasında 4 dakika bekletilmiştir. Daha sonra fırının önündeki plaka üzerine alınmıştır. Bu yer değiştirme esnasında da kayıp zaman oluşmuştur. İç yüzey için 73 sn dış yüzey için 62 sn ölçüm yapılamamıştır.

Porselen kaplamanın iç ve dış yüzey sıcaklık ölçümleri aşağıda Tablo 3.1'de verilmiştir. Ayrıca bu değerler sıcaklık-zaman grafiği olarak Şekil 3.1'de verilmiştir. Ölçüm yapılamayan zamanlar için, çıkartılan soğuma eğrisine uygun, fonksiyon uyumlanmıştır.

Tablo 3.1 : Porselen kaplamanın sıcaklık ölçüm değerleri

İÇ YÜZEY			
T (+sn)	Sıcaklık (°C)	T (+sn)	Sıcaklık (°C)
0	750	475	87
56	440	480	85
65	416	490	82
85	392	500	79
90	365	510	77
100	352	520	74
105	345	530	71
115	336	540	70
125	326	550	68
135	315	560	66
145	305	600	59
155	296	610	58
170	284	618	57
180	275	628	55
195	263	638	53
215	249	648	51
220	245	660	50
230	239		
240	234		
313	171		
320	167		
325	165		
330	163		
340	156		
350	152		
360	148		
370	142		
390	127		
400	121		
420	110		
430	105		
440	100		
450	96		
455	94		
460	93		
465	90		
470	89		

DIŞ YÜZEY	
T (+sn)	Sıcaklık (°C)
0	750
53	340
60	321
70	296
90	274
95	265
100	254
105	242
110	233
115	221
120	214
135	204
145	197
155	191
170	179
180	172
190	167
200	160
215	151
230	143
240	137
302	97
310	95
320	89
330	84
345	77
350	73
360	66
370	61
380	59
395	56
405	55
410	54
424	53
456	52
477	50
660	50



Şekil 3.2 : Porselen kaplamanın ölçülen sıcaklık değerleri



Oda sıcaklığının 36 °C olmasına karşın Porselen kaplamanın sıcaklığı 50 °C de sabit kalmıştır. Bunun nedeni malzemenin fırının yakınında bekletilmesi ve o bölgenin sıcaklığının daha yüksek olması olarak açıklanabilir. Porselen kaplama fırının önündeki plaka üzerinde bekletildikten sonra keyfi bir zaman da alınmaktadır. Bu nedenle bizim incelememiz 750 °C ile 50 °C arasında olacaktır.

Şekil 3.2'de ölçülen sıcaklık değerleri noktasal olarak görülmektedir. Bu sıcaklık noktalarına uygun üstel fonksiyon bulunamamıştır. Bunun nedeni porselenin fırından çıktıktan hemen sonra çok hızlı soğumasıdır. İlk sıcaklık okuma zamanına kadar geçen sürede ve plaka üzerine alma esnasında ölçülemeyen noktalar için ölçüm noktalarına teğet bir eğri uyumlanmıştır. Fonksiyonlar Excel programından yararlanılarak elde edilmiştir.

İç yüzey için ;

Porselen kaplamanın fırından 750 ° C 'de çıktığını bildiğimize göre , bu noktadan 56. saniyede ki 440 ° C değerine kadar kullanılacak ölçüm verilerine teğet eğrinin denklemi ;

$$T = 4E-07 t^4 - 0.0003 t^3 + 0.0699 t^2 - 8.5456 t + 750$$

t : zaman [sn]

T: sıcaklık [° C]

Tabladan plaka üzerine alınırken oluşan kayıp için kullanılacak eğrinin denklemi;

$$T = -2E-09 t^4 + 3E-06 t^3 - 0.0007 t^2 - 0.9549t + 465.95 \quad \text{dir.}$$

Dış yüzey için ;

Fırından çıktıktan sonra 53. saniyedeki 340 ° C değerine kadar kullanılacak teğet eğrisinin denklemi ;

$$T = -7E-09 t^5 + 5E-06 t^4 - 0.0013 t^3 + 0.1889 t^2 - 14.558 t + 750$$

Tabladan plaka üzerine alınırken oluşan kayıp için kullanılacak eğrinin denklemi;

$$T = 0.0018 t^2 - 1.685 t + 439.12 \quad \text{dir.}$$

Ölçülen sıcaklık değerleri ve fonksiyonlardan , çözümlenmede Ansys'de parameter olarak girilecek sıcaklık-zaman değerleri elde edilmiştir. Ansys'e girilecek bu değerler Tablo 3.2 'de verilmiştir.

Tablo 3.2 : Ölçüm yoluyla elde edilen sıcaklık-zaman değerleri

ZAMAN [SN]	DIŞ YÜZEY Sıcaklığı [K]	İÇ YÜZEY Sıcaklığı [K]
0	1023	1023
10	894	944
30	725	821
60	594	701
90	547	638
120	487	603
150	467	573
180	445	548
210	427	519
240	411	504
270	388	479
300	370	454
330	357	436
360	339	421
390	331	400
420	326	383
450	325	369
480	323	358
510	323	350
540	323	343
570	323	337
600	323	332
630	323	328
660	323	323

### 3.2 Yavaş Soğuma Eğrilerinin Elde Edilmesi

Sıcaklık ölçümü yoluyla uygulamada ki soğuma eğrisi elde edildi. Ancak farklı ortamlarda soğumaya bırakılarak porselen kaplamanın yavaş soğuması sağlanabilecektir. Bu ortamlarda porselen kaplamanın daha yavaş soğumasıyla daha homojen bir ısı dağılımı oluşabileceği ve bunun da ısıl gerilmelere olumlu yönde yansiyebileceği düşünüldü.

Ölçüm yoluyla elde ettiğimiz soğuma eğrisinin yanı sıra, oluşturacağımız yavaş soğuma eğrileriyle birlikte ısıl gerilmeleri inceler ve bu farklı ortamların ısıl gerilmelere etkilerini mukayese edersek daha verimli bir çalışma yapmış oluruz.

Porselen kaplamanın yavaş soğuması pratikte de , fırına girilecek parametrelerle veya farklı soğuma ortamlarına bırakılarak sağlanabilir. Bu çalışmada uygulamadaki soğuma ortamından farklı dört soğuma ortamında soğumaya bırakıldığı düşünüldü ve bu ortamlar için dört soğuma eğrisi elde edildi.

Yaptığımız ölçümle uygulamada porselen kaplamanın 750 °C 'den 50 °C 'ye 11 dk.(660sn) da soğuduğu görülmüştür. Bu soğuma süresini 20 dk. , 40 dk. , 60 dk. ve 90 dk. olduğunu düşünerek yavaş soğuma eğrilerini çıkartabiliriz. Bu soğuma sürelerinde, ölçüm yoluyla belirlenen soğuma eğrisinin karakteristiğine uygun, eğriler elde edilmiştir. Bunun için Excel programı kullanılmıştır.

Porselen kaplamanın soğumasını inceleyeceğiz ortamlar şu şekildedir :

**1.Ortam :** Sıcaklık ölçümüyle belirlediğimiz uygulamada ki soğuma ortamı. 11 dk. içinde 50 °C'ye soğumaktadır. Çözümlemede kullanacağımız bilgisayar programına (Ansys) gireceğimiz zaman-sıcaklık değerleri Tablo 3.2 'de verilmiştir.

**2.Ortam :** 20 dk.(1200sn) 'da 50 °C'ye soğuduğu düşünülerek soğuma eğrileri hazırlanmıştır. İç ve dış yüzey için ayrı , ayrı soğuma eğrileri çıkartılmıştır. Soğuma eğrileri için üstel fonksiyon belirlenmiştir. Ancak, başlangıç zamanında üstel

fonksiyon ölçüm sonuçlarının karakteristiğine uygun değildir. Bundan dolayı, parçalı fonksiyon kullanılmıştır. Ölçümle elde edilen soğuma eğrisinin karakteristiğine uygun, 3.der. polinom ve üstel fonksiyon ile 2.ortam soğuma eğrileri elde edilmiştir.

Dış yüzey için;

$$0-60 \text{ sn} \quad T = -0,0004 t^3 + 0,0902 t^2 - 7,5335 t + 750$$

$$60-1200 \text{ sn} \quad T = 625 \cdot e^{-0,0028 t}$$

İç yüzey için ;

$$0-60 \text{ sn} \quad T = -0,0002 t^3 + 0,0474 t^2 - 4,6908 t + 750$$

$$60-1200 \text{ sn} \quad T = 675 \cdot e^{-0,00215 t}$$

T : sıcaklık [°C]

t : zaman [sn]

fonksiyonları kullanılmıştır.

Ansyz'e girilecek değerler Tablo 3.3 'de verilmiştir.

**3.Ortam** : 40 dk. (2400sn) 'da soğuduğu düşünülerek soğuma eğrileri iç ve dış yüzey için ayrı ayrı çıkartılmıştır. Bu eğriler üstel fonksiyon kullanılarak elde edilmiştir.

Dış yüzey için;

$$T = 750 \cdot e^{-0,001349 t}$$

İç yüzey için;

$$T = 750 \cdot e^{-0,001124 t} \quad \text{fonksiyonları kullanılmıştır.}$$

Ansyz'e girilecek değerler Tablo 3.4 'de verilmiştir.

**4.Ortam** : 60 dk. (3600sn) 'da soğuduğu düşünülerek soğuma eğrileri iç ve dış yüzey için yine üstel fonksiyon kullanılarak elde edilmiştir.

Dış yüzey için;

$$T = 750 \cdot e^{-0,0008175 t}$$

İç yüzey için;

$$T = 750 \cdot e^{-0,0007494 t} \quad \text{fonksiyonları kullanılmıştır.}$$

Tablo 3.5 'de Ansys'e girilecek değerler görülmektedir.

**5.Ortam** : 90 dk. (5400sn) 'da soğuduğu düşünülerek soğuma eğrisi üstel fonksiyon kullanılarak elde edilmiştir. Bu ortamda iç ve dış yüzey için tek bir soğuma eğrisi girilecektir. Soğuma zamanı uzadıkça iç ve dış yüzey sıcaklıkları birbirine yaklaşmaktadır. İç ve dış yüzeyin aynı sıcaklıklarla soğuması beklenemez. Ancak bunun sınır koşulu olarak düşünülüp böyle incelenmesinde yarar görülmüştür.

Dış ve iç yüzey için ;

$$T = 750 \cdot e^{-0,0004996 t} \quad \text{fonksiyonu kullanılmıştır.}$$

Tablo 3.6 'da Ansys'e girilecek değerler görülmektedir.

Tablo 3.3 : 2.Ortam için sıcaklık-zaman verileri

2.ORTAM		
ZAMAN [SN]	DIŞ YÜZEY Sıcaklığı [K]	İÇ YÜZEY Sıcaklığı [K]
0	1023	1023
10	956	981
30	868	920
60	805	869
90	770	840
120	719	794
150	683	761
180	650	731
210	619	702
240	591	675
270	566	650
300	542	626
330	520	604
360	500	583
390	482	564
420	465	546
450	449	529
480	435	513
510	422	498
540	410	483
570	399	470
600	389	458
630	379	446
660	371	435
690	363	425
720	356	416
750	349	407
780	343	398
810	337	391
840	332	383
870	327	376
900	323	370
930	323	364
960	323	358
990	323	353
1020	323	348
1050	323	343
1080	323	339
1110	323	335
1140	323	331
1170	323	327
1200	323	323

Tablo 3.4 : 3.Ortam için sıcaklık-zaman verileri

3.ORTAM					
ZAMAN [SN]	DIŞ YÜZEY Sıcaklığı [K]	İÇ YÜZEY Sıcaklığı [K]	ZAMAN [SN]	DIŞ YÜZEY Sıcaklığı [K]	İÇ YÜZEY Sıcaklığı [K]
0	1023	1023	1200	421	467
10	1013	1015	1230	415	460
30	993	998	1260	409	454
60	964	974	1290	404	448
90	937	951	1320	399	442
120	911	928	1350	394	437
150	885	906	1380	389	431
180	861	885	1410	384	426
210	837	865	1440	380	421
240	815	845	1470	375	416
270	793	826	1500	371	411
300	773	808	1530	367	406
330	753	790	1560	364	402
360	734	773	1590	360	398
390	715	756	1620	357	394
420	698	740	1650	353	390
450	681	724	1680	350	386
480	665	709	1710	347	382
510	649	695	1740	344	378
540	634	681	1770	341	375
570	620	667	1800	339	371
600	606	654	1830	336	368
630	593	641	1860	333	365
660	580	629	1890	331	362
690	568	617	1920	329	359
720	556	606	1950	327	356
750	545	595	1980	324	353
780	534	584	2010	323	351
810	523	574	2040	323	348
840	514	564	2070	323	346
870	504	554	2100	323	343
900	495	545	2130	323	341
930	486	536	2160	323	339
960	477	527	2190	323	336
990	469	518	2220	323	334
1020	461	510	2250	323	332
1050	454	502	2280	323	330
1080	447	495	2310	323	328
1110	440	487	2340	323	327
1140	433	480	2370	323	325
1170	427	473	2400	323	323

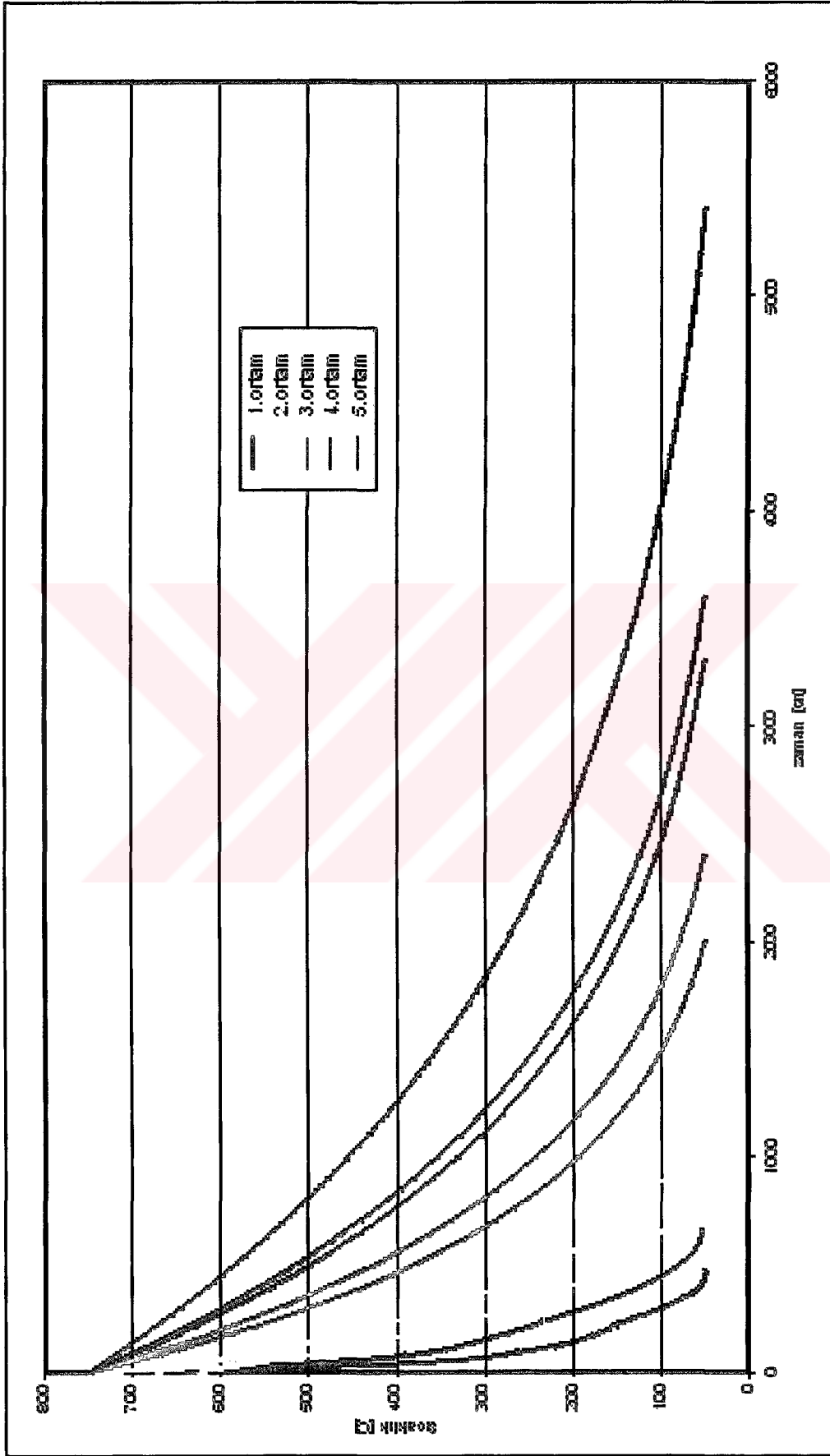
Tablo 3.5 : 4.Ortam için sıcaklık-zaman verileri

4.ORTAM								
ZAMAN [SN]	DIŞ YÜZEY [K]	İÇ YÜZEY [K]	ZAMAN [SN]	DIŞ YÜZEY [K]	İÇ YÜZEY [K]	ZAMAN [SN]	DIŞ YÜZEY [K]	İÇ YÜZEY [K]
0	1023	1023	1290	533	557	2610	361	378
10	1017	1017	1320	527	551	2640	359	376
30	1005	1006	1350	521	545	2670	357	374
60	987	990	1380	515	539	2700	355	371
90	970	974	1410	509	533	2730	353	369
120	953	958	1440	503	527	2760	351	367
150	936	943	1470	498	521	2790	349	365
180	920	928	1500	492	516	2820	347	363
210	904	913	1530	487	510	2850	345	361
240	889	899	1560	482	505	2880	344	359
270	874	885	1590	476	500	2910	342	357
300	859	872	1620	472	495	2940	340	355
330	845	858	1650	467	490	2970	339	353
360	831	845	1680	462	485	3000	337	352
390	818	832	1710	457	480	3030	335	350
420	804	820	1740	453	476	3060	334	348
450	791	808	1770	449	471	3090	332	346
480	779	796	1800	444	467	3120	331	345
510	767	784	1830	440	462	3150	330	343
540	755	773	1860	436	458	3180	328	342
570	743	762	1890	432	454	3210	327	340
600	731	751	1920	428	450	3240	326	339
630	720	740	1950	424	446	3270	324	337
660	709	730	1980	421	442	3300	323	336
690	699	719	2010	417	438	3330	323	334
720	688	709	2040	414	435	3360	323	333
750	678	700	2070	410	431	3390	323	332
780	668	690	2100	407	428	3420	323	330
810	659	681	2130	404	424	3450	323	329
840	649	672	2160	400	421	3480	323	328
870	640	663	2190	397	417	3510	323	327
900	631	654	2220	394	414	3540	323	325
930	623	646	2250	391	411	3570	323	324
960	614	637	2280	389	408	3600	323	323
990	606	629	2310	386	405			
1020	598	621	2340	383	402			
1050	590	613	2370	380	399			
1080	582	606	2400	378	396			
1110	575	598	2430	375	394			
1140	567	591	2460	373	391			
1170	560	584	2490	370	388			
1200	553	577	2520	368	386			
1230	546	570	2550	366	383			
1260	540	564	2580	363	381			



Tablo 3.6 : 5.Ortam için sıcaklık-zaman verileri

5.ORTAM							
ZAMAN [SN]	YÜZEY SIC. [K]	ZAMAN [SN]	YÜZEY SIC. [K]	ZAMAN [SN]	YÜZEY SIC. [K]	ZAMAN [SN]	YÜZEY SIC. [K]
0	1023	1350	654	2730	464	4110	369
10	1019	1380	648	2760	461	4140	367
30	1012	1410	643	2790	458	4170	366
60	1001	1440	637	2820	455	4200	364
90	990	1470	632	2850	453	4230	363
120	979	1500	627	2880	450	4260	362
150	969	1530	621	2910	447	4290	360
180	958	1560	616	2940	445	4320	359
210	948	1590	611	2970	442	4350	358
240	938	1620	606	3000	440	4380	356
270	928	1650	601	3030	437	4410	355
300	918	1680	596	3060	435	4440	354
330	909	1710	591	3090	432	4470	353
360	899	1740	586	3120	430	4500	352
390	890	1770	582	3150	428	4530	350
420	881	1800	577	3180	425	4560	349
450	872	1830	573	3210	423	4590	348
480	863	1860	568	3240	421	4620	347
510	854	1890	564	3270	419	4650	346
540	845	1920	559	3300	416	4680	345
570	837	1950	555	3330	414	4710	344
600	828	1980	551	3360	412	4740	343
630	820	2010	547	3390	410	4770	342
660	812	2040	543	3420	408	4800	341
690	804	2070	539	3450	406	4830	340
720	796	2100	535	3480	404	4860	339
750	788	2130	531	3510	402	4890	338
780	780	2160	527	3540	400	4920	337
810	773	2190	523	3570	398	4950	336
840	765	2220	519	3600	396	4980	335
870	758	2250	516	3630	394	5010	334
900	751	2280	512	3660	393	5040	333
930	743	2310	509	3690	391	5070	332
960	736	2340	505	3720	389	5100	331
990	730	2370	502	3750	387	5130	330
1020	723	2400	498	3780	386	5160	329
1050	716	2430	495	3810	384	5190	329
1080	709	2460	491	3840	382	5220	328
1110	703	2490	488	3870	381	5250	327
1140	696	2520	485	3900	379	5280	326
1170	690	2550	482	3930	378	5310	325
1200	684	2580	479	3960	376	5340	325
1230	678	2610	476	3990	374	5370	324
1260	672	2640	473	4020	373	5400	323
1290	666	2670	470	4050	371		
1320	660	2700	467	4080	370		



Şekil 3.3 : Soğuma eğrileri

## **BÖLÜM DÖRT**

### **MODELLEME VE ANALİZ**

Porselen kaplamanın 3 boyutlu sonlu elemanlar modelini oluşturup analizi yapmak için Ansys 6.1 programı kullanılmıştır. ANSYS/Multiphysics/LS-DYNA opsiyonu seçilerek analiz yapılmıştır. Analiz temel olarak aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır:

- Modelin oluşturulması
  - Geometrik modelin oluşturulması
  - Malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağlı girilmesi
  - Soğuma eğrilerinin parametre olarak Ansys'e girilmesi
- Isıl Analiz
- Structural Analiz
- Analiz sonuçları

Beş farklı ortam tanımlanmış olup bu ortamların her biri için yukarıdaki işlemler tekrar yapılarak sonuçlar elde edilir.

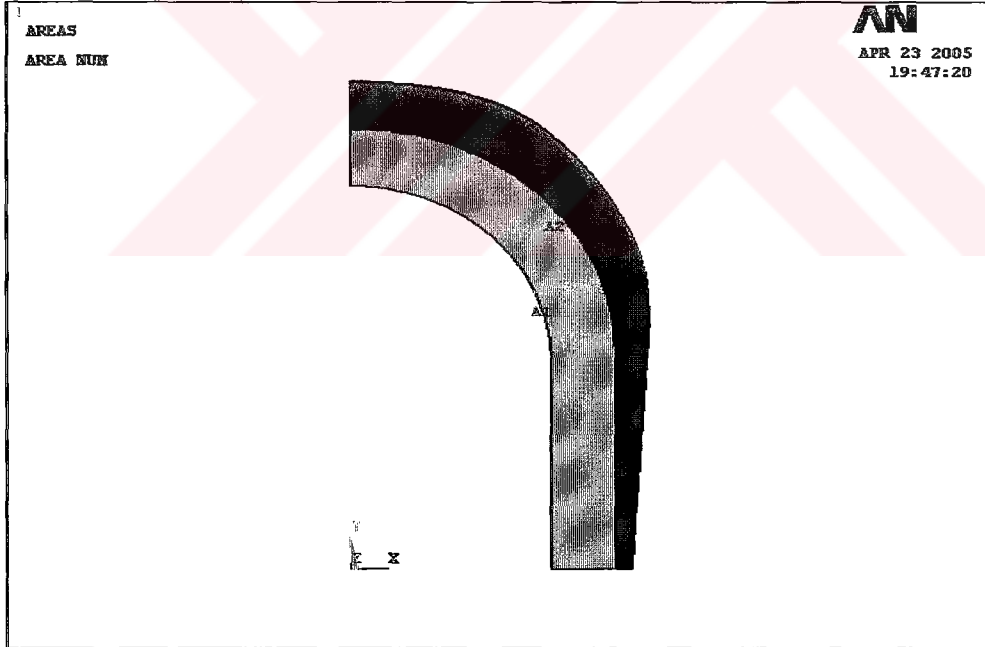
Isıl analizde zamana bağlı çözümlenme yapılarak sıcaklıkların zamana bağlı dağılımı elde edilmiştir. Bu analizin sonuçları kaplamanın istenilen zamanlardaki sıcaklık dağılımını vermektedir. Structural çözümlenmede, çözümlenme yapılacak anlardaki değerler ısı analizden çağırılarak çözümlenme yapılır. Çözümlenme yöntemi statik olarak seçilmiştir. Malzemeler her sıcaklıkta elastik bölgede kaldıkları için, her bir zaman diliminde bulunan gerilmeler birbirinden bağımsız olacaktır. Bu nedenle herhangi bir saniyedeki sıcaklık dağılımını bilmemiz o andaki gerilmeleri bulmamız için yeterlidir. Bu durumda önce ısı analiz sonra structural analiz yapılması uygundur. Eğer malzemeler plastik bölge davranışı gösterseydi., couple elemanlarla structural ve ısı analizler aynı anda yaptırılmalıdır.

## 4.1 Modelin Oluşturulması

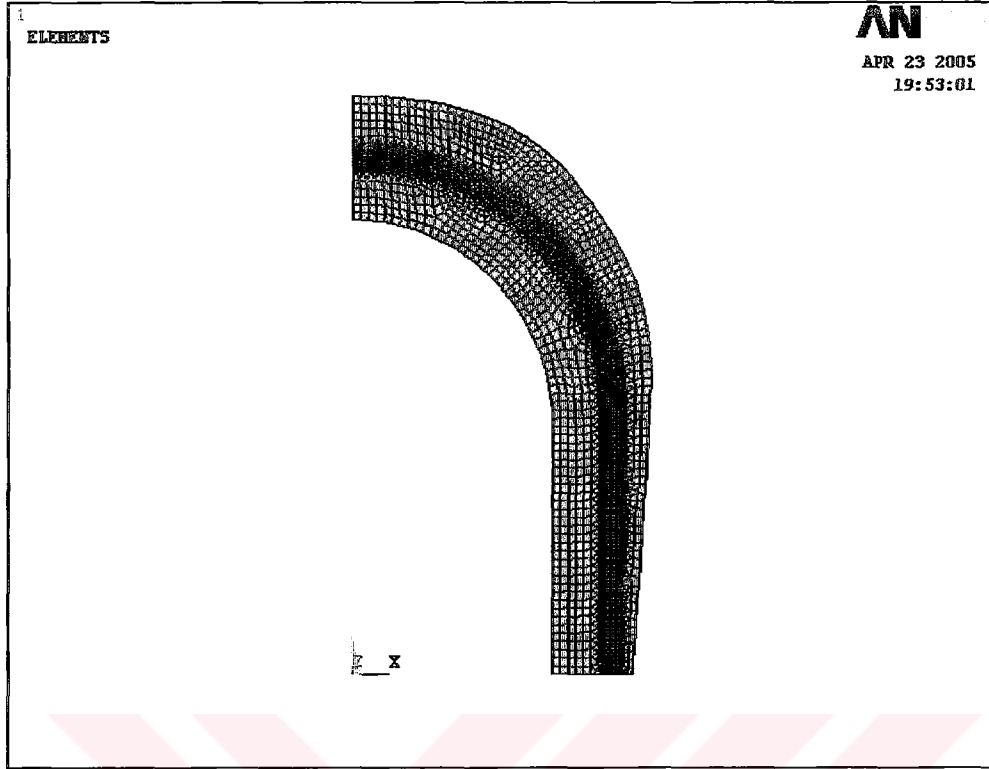
### 4.1.1 Geometrik Modelin Oluşturulması

Porselen kaplama küçük azı dişi için hazırlanmıştır. Bu dişin yapısı itibarıyla hazırlanan kaplama dönel simetrik bir yapıdadır. Bundan dolayı iki boyutlu bir model oluşturulmuştur.

Porselen kaplamanın geometrisi Ege Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesinden alınmış olup, sıcaklık ölümü yapılan numune de dişcilik laboratuvarlarında buna göre hazırlanmıştır. Ansys'de Keypoint, line, spline ve areas komutları yardımıyla porselen kaplamanın 2 boyutta modeli oluşturulmuştur. Daha sonra elemanlara ayrılmıştır.



şekil 4.1 : Parçanın axisimetrik modeli



Şekil 4.2 : Parçanın sonlu elemanlar modeli

#### 4.1.2 Malzeme Özelliklerinin Girilmesi

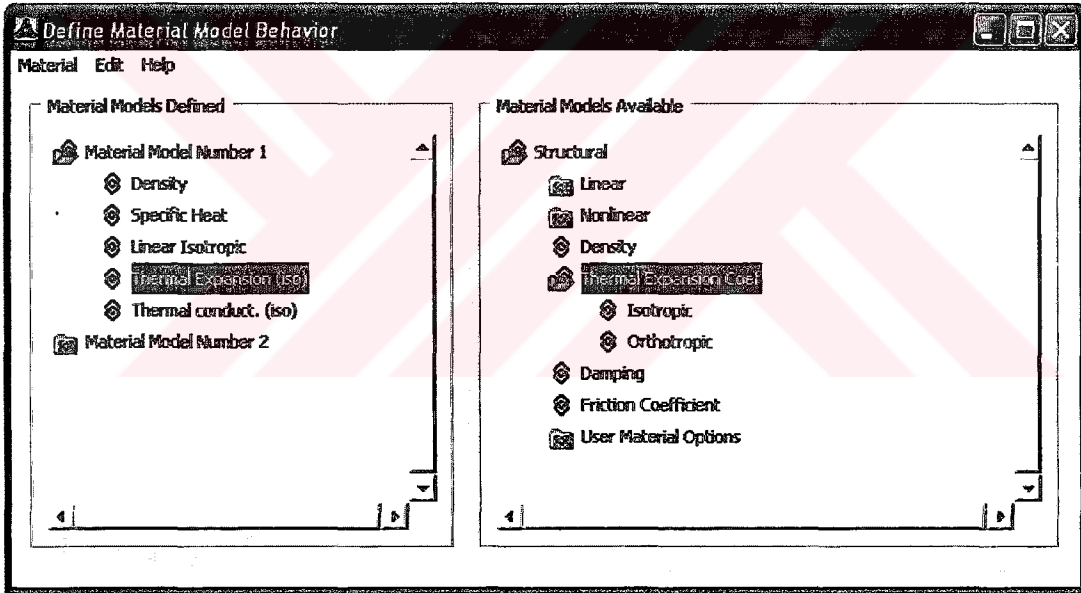
Analiz için IPS Empress 2 ve Ceramco'nun malzeme özelliklerinin Ansys'de tanıtılması gerekmektedir. Malzemelerin homojen izotrop ve elastik bir yapıda oluşu kabul edilmiştir. (Dai K. & Shaw L.,2003). Ansys'e girmemiz gereken malzeme özellikleri :

- Yoğunluk
- Isıl kapasite
- Elastisite modülü
- Poisson oranı
- Isıl genişleme katsayısı
- Isı iletim katsayısı

IPS Empress 2 ve Ceramco'nun bu özellikleri Tablo 2.1, Tablo 2.2, Tablo 2.3, Tablo 2.4 ve Tablo 2.5'de görülmektedir.

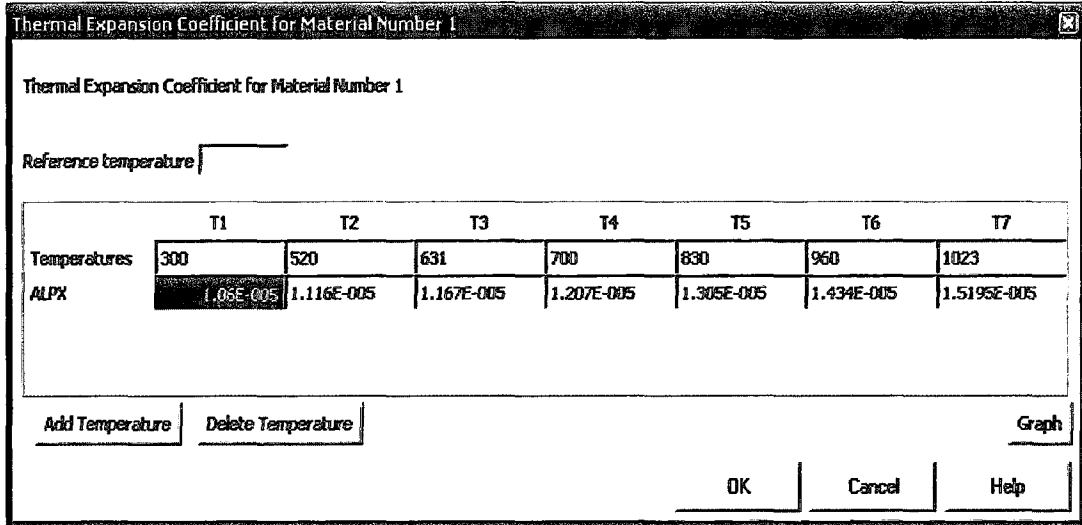
Ansys'de Material Models kısmında iki malzeme tanımlanır ve numaralandırılır. Bu oluşturduğumuz malzeme modellerine IPS Empress 2 ve Ceramco'nun tablolarda verilen özellikleri girilir. Sıcaklığa bağlı değişen malzeme özelliklerini girebilmek için ; Add Temperature komutuyla istediğimiz kadar tabloyu genişletip, buraya sıcaklık-malzeme özelliği değerlerini yazarız.

Burada örnek olarak IPS Empress 2 için Isıl genişleme katsayısının nasıl girildiğini anlatalım. Ansys menülerinde *Preprocessor / Material Properties / Material Models* 'e girilerek *Define Material Model Behavior* penceresi açılır. ( Şekil 4.3 )



Şekil 4.3 : Ansys'de malzeme modellerinin girilmesi

Burada 1. malzeme modeli için structural malzeme özelliklerinden thermal expansion coefficient, isotropic olarak tıklanır. Açılan pencerede (Şekil 4.4) Add temperature komutuyla tablo genişletilir. Temperatures ve ALPX değerlerine sıcaklık-ısı genleşme katsayısı değerleri girilerek IPS Empress 2 için sıcaklığa bağlı ısı iletim katsayısı değerleri girilmiş olur.



Şekil 4.4 : Ansys’de Isıl genleşme katsayısının girilmesi

IPS Empress 2 ve Ceramco’nun diğer malzeme özellikleri de benzer şekilde malzeme modellerine girilir. Oluşturduğumuz iki malzeme modeli (IPS Empress 2 ve Ceramco), katı model mesh (sonlu elemanlarına ayırma) edilmeden malzeme model numarasıyla alanlara tanımlanır. Böylece Ansys’de katı model üzerine IPS Empress 2 ve Ceramco malzeme özellikleriyle girilmiş olur.

#### 4.1.3 Soğuma Eğrilerinin Girilmesi

Isıl analizde transient analiz yani zamana bağlı analiz yapılacaktır. Bunun için soğuma eğrilerinden zaman sıcaklık değerlerinin Ansys’e girilmesi gerekir. Ansys’e girilecek yüzey sıcaklığı-zaman değerleri Tablo 3.2, Tablo 3.3, Tablo 3.4, Tablo 3.5 ve Tablo 3.6 ’da verilmiştir. Bu değerler Ansys’e tablo olarak girilir. Bunun için Ansys menülerinden :

*Parameter > Array Parameters > Define* : komutuyla çıkan tablodan *Add* butonuna basarak *Add New Array parameter* penceresini açarız (Şekil 4.5). Bu pencereden *table* opsiyonu seçilir ve gireceğimiz tablonun kolon, satır sayıları ve tablo adları girilir.

**Add New Array Parameter**

[\*DIM]

Par Parameter name

Type Parameter type

Array

Table

Character Array

I,J,K No. of rows,cols,planes

For Type="TABLE" only:

Var1 Row Variable

Var2 Column Variable

Var3 Plane Variable

Şekil 4.5 : Ansys’de sıcaklık tablolarının oluşturulması

Daha sonra oluşturduğumuz tablolara *edit* komutuyla girilir ve sıcaklık zaman değerleri yazılarak tablolar doldurulur.

Örnek olarak Şekil 4.6’da 1.ortam için girilen iç yüzey sıcaklığını tablo olarak görmekteyiz. Tabloda TEMP sıcaklığı ifade eder ve birimi Kelvin dir. TIME’da zamanı ifade eder birimi sn dir. Tablodaki oklarla yukarı aşağı hareket ederek tablo doldurulur. Aynı şekilde dış yüzey sıcaklığı da girilir. Buna benzer olarak 2.ortam, 3.ortam, 4.ortam ve 5.ortam içinde dış yüzey ve iç yüzey sıcaklıkları tablo olarak girilir.



Table Array: ICYUZEY = f(TIME, TEMP)

File Help

Page Increment Full Page

	TEMP
	1023
10	944
30	821
60	701
90	638
120	603
150	573
180	548
210	519
240	504

TIME

Şekil 4.6 : Ansys'de oluşturulan Sıcaklık-Zaman tablosu

Böylece bu tablolar aracılığıyla farklı ortam koşullarını Ansys'de tanımlamış oluruz. Çözüm aşamasında, hangi ortam için analiz yapmak istiyorsak o ortamın yüzey sıcaklığı-zaman tablosunu modelin yüzeylerine seçeriz.

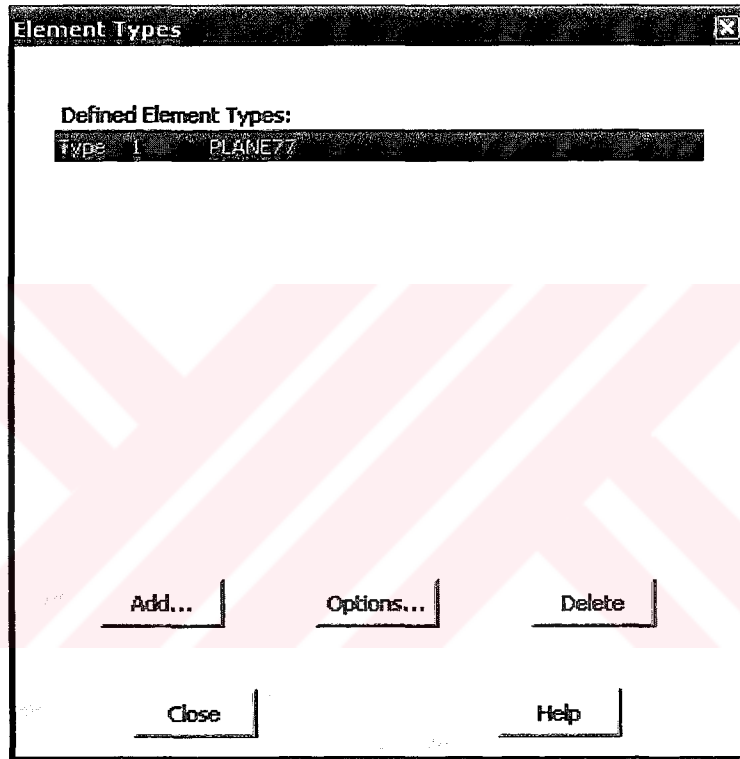
#### 4.2 Isıl Analiz

Isıl analizde amaç girilen yüzey sıcaklığıyla, çeşitli zamanlarda kaplamadaki sıcaklık dağılımının belirlenmesidir. Analiz için, model geometrisi, malzeme özellikleri, soğuma eğrileri girilerek bir model dosyası oluşturulur. Daha sonra yapılacak her analizde aynı model kullanılır. Farklı ortamlar için yapılacak ısıl analiz genel olarak aşağıdaki adımlarla gerçekleştirilir.

Model dosyası çağrılır ve analiz yöntemi *Thermal* olarak seçilir.

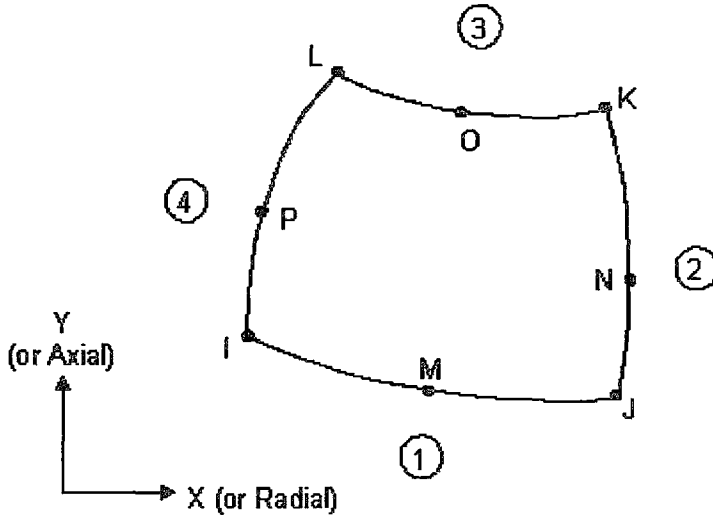
**Eleman tipinin belirlenmesi :** Yapacağımız analize ve model geometrisine bağlı eleman tipini seçeriz. Bunun için Ansys menülerinden ;

Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete 'e girerek *Element Types* penceresi açılır (Şekil 4.7). Bu pencereden *Add* butonuna basarak eleman tipini Plane 77 olarak seçeriz. *Options* butonundan *Element Behavior K3*, axisymmetric seçilir.



Şekil 4.7: Ansys'de eleman tipleri penceresi

Plane 77'yi seçmemizin nedeni; iki boyutlu 8 düğüm noktalı oluşu, dönele simetrik eleman seçilebilmesi ve ısı analiz için uygun olmasıdır.



Şekil 4.8 : Plane 77 Thermal Solid sonlu eleman modeli

**Sonlu elemanlara ayırma :** İlk önce elemanlara ayrılacak alanlar malzeme özellikleriyle tanımlanır. Bunun için ;

*Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Picked Areas* ile alanlar seçilir ve bu alanlara malzeme özellikleri malzeme model numaralarıyla girilir.

*Preprocessor > Meshing > Mesh Tool* ile açılan pencereden *Areas Set* ile elemanın boyutu girilir. *Mesh* komutuyla elemanlara ayırma işlemi yapılır. Daha sonra ara yüzeyi daha küçük elemanlara ayırmak için ;

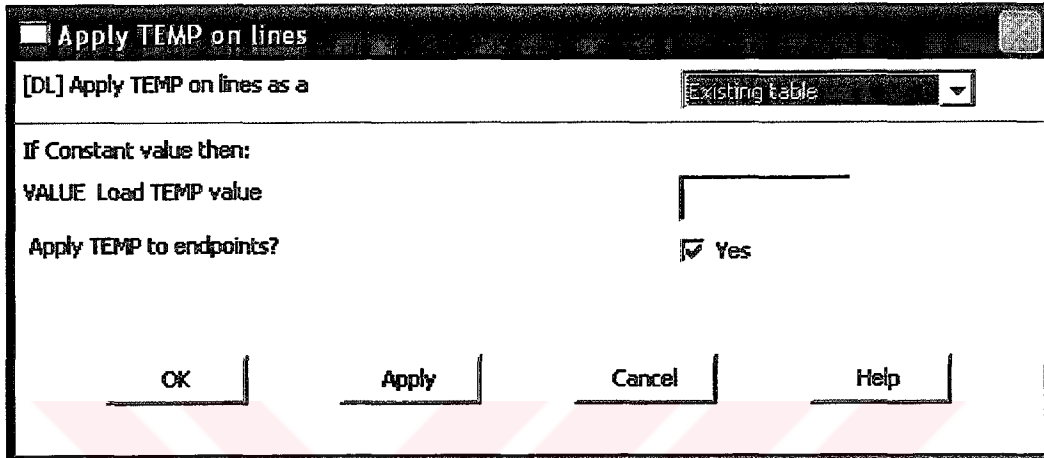
*Preprocessor > Meshing > Mesh Tool > Refine* ile ara yüzeydeki elemanlar seçilir ve açılan *Refine mesh at Elements* penceresinden bölme derecesi seçilir. Bu işlemlerle modeli sonlu elemanlara ayırmış oluruz.

**İlk sıcaklığın girilmesi :** Malzeme fırından çıktıktan sonra 1023 K (750 °C) dir. Bunun için Ansys'de Main menüden ;

*Preprocessor > Loads > Define Loads > Settings > Reference temperature:1023* girilir.

**Yüzey sıcaklıklarının girilmesi :** Ansys menülerinden ;

*Preprocessor > Loads > Define Loads > Thermal > Temperature > On lines* 'dan Model üzerinde sıcaklık tablosunu gireceğimiz yüzey çizgisi seçilir. Çizgiyi seçtikten sonra ok butonuna basınca bir pencere açılır. ( Şekil 4.9 )



Şekil 4.9 : Ansys'de yüzey sıcaklığının girilmesi

Bu pencereden *Existing Table* komutuyla Ansys'de önceden kaydedilmiş yüzey sıcaklığı-zaman tablolarından analizini yapacağımız ortam için olanlar modelin iç ve dış yüzeyine çizgisel olarak seçilir. Ayrıca iç ve dış yüzey sıcaklıklarının ortalamaları alınarak yeni bir tablo elde edilir. Elde edilen bu tablo da modelin alt kısmındaki düğüm noktalarına yine tablo olarak seçilir. Böylece ortam koşullarının etkisini göz önüne alarak hazırladığımız yüzey sıcaklığı soğuma eğrileri model üzerinde parametrik olarak tanımlanmış olur.

**Çözüm yöntemi :** Analiz tipi olarak *Transient Thermal Analysis* seçilir. Yani zamana bağlı termal analiz yapılacaktır. Bunun için çözüm yönteminde zaman parametrelerinin girilmesi gerekmektedir. Bunlar:

*Solution > Analysis Type > New Analysis : Transient*

*Solution > Load Step Opts > Output Ctrls > Solution printout* : ( çözümün görüntülenmesi ), bu menüde çözümün görüntülenmesine yönelik seçenekler vardır.

*All items* opsiyonuyla bütün sonuçlar görüntülenir. *Every substep* opsiyonuyla da bütün zaman adımlarında sonuçlar görüntülenir.

*Solution >Load Step Opts > Output Ctrl's > DB/Results file* ( kayıt dosyaları ), bu menüde çözümlerin kaydedilmesine yönelik seçenekler bulunmaktadır. *All items* ve *every substep* opsiyonları seçilerek bütün çözümler her adım için kaydedilir.

*Solution >Load Step Opts > Time Frequenc >Time-Time Step* : Açılan pencereden ;

*Time at end of load step* (adımlama bitiş zamanı), buraya girilen değer analizin biteceği zamanı yani süresini gösterir. Bu süre 1.ortamda 660 sn. dir. Diğer ortamlar içinde bitiş süreleri (1200, 2400, 3600, 5400) yazılır.

*Time step size* ( adım zaman aralığı), çözümün ayrıldığı her adımın zaman boyutudur. Bu değer çözümün kaç adımda yapılacağını da belirtir. 30 sn olarak girilmiştir.

*Stepped* (adımlama), bu opsiyon seçilerek çözümün istenilen zaman aralıklarıyla adım adım yapılması sağlanır.

*Solution > Solve > Current LS* komutuyla çözüm yaptırılır.

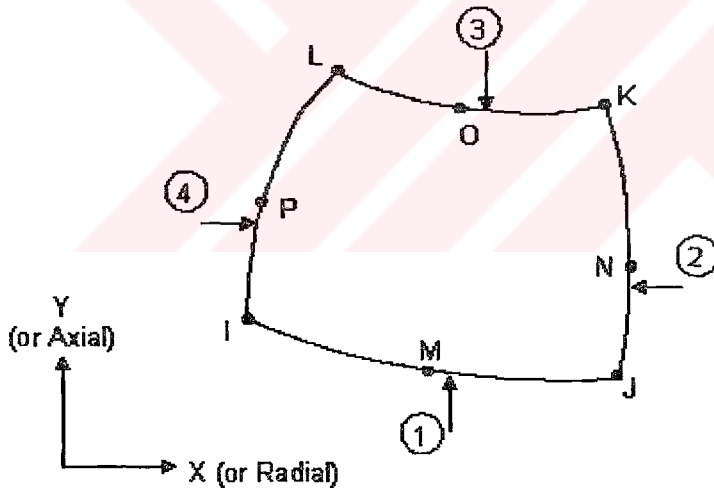
Isıl analizde her adımda (30 sn aralıklarla) çözüm yaptırılmış ve kaydedilmiştir. Kaydettiğimiz dosyadan istediğimiz zamanlardaki sonuçları görüntüleyebilir veri olarak kullanabiliriz.

### 4.3 Structural Analiz

Structural analizde amaç , Isıl analizle elde edilen ısı dağılımı kullanılarak ısıl gerilmelerin bulunmasıdır. Bunun için Isıl analiz yapıldıktan sonra analiz yöntemi *Thermal*'den *Structural* olarak değiştirilir ve aşağıdaki adımlarla analiz gerçekleştirilir.

**Eleman tipinin belirlenmesi :** Isıl analizde eleman tipi Plane 77 olarak seçilmişti. Thermal – Structural analiz için Plane 77 – Plane 82 kombinasyonu belirlenmişti. Bunun için ;

*Preprocessor > Element Type > Switch Elem Type : Thermal to Struc* seçilerek bu kombinasyon analizde tanımlanmıştır. Böylece otomatik olarak eleman tipi Plane 82 seçilmiş olur. Plane 82 , 8 düğüm noktalı bir yapıdadır. Opsiyonlarından *axisimetrik* seçilir.

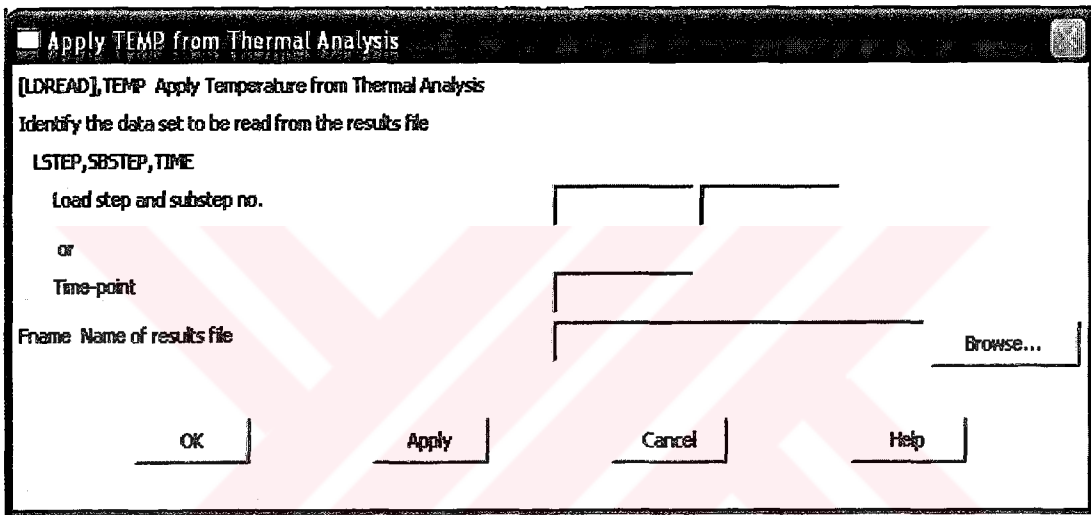


Şekil 4.10 : Plane 82 Structural Solid sonlu eleman modeli

**Serbestlik derecesi :** *Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Lines* (mesnetler) komutuyla dönel simetri ekseninde (y-ekseni) Ux seçilerek x yönündeki serbestliği sınırlandırılır.

**Isıl analizden ısı dağılımının girilmesi :** Isıl analizde bütün ortamlar için 30 sn aralıklarla sonuçlar kaydedilmiştir. Structural analizde çözüm yapacağımız adımın sıcaklık dağılımını ısı analizden çağırmak için ;

*Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > From Thermal Analysis* ile *Apply Temperature from thermal analysis* penceresi açılır. (Şekil 4.11) Bu pencereden *Time Point* 'e zaman değeri girilerek sıcaklık dağılımı ısı analiz sonuçlarından girilmiş olur.



Şekil 4.11 : Structural analizde sıcaklık dağılımının girilmesi

**Çözüm yöntemi :** Analiz tipi olarak *Static* analiz seçilir. İstenilen zaman için birbirinden bağımsız structural analiz gerçekleştirilecektir.

*Solution > Analysis Type > New Analysis : Static*

*Solution > Solve > Current LS* komutuyla çözüm yaptırılır.

Structural analiz bütün ortamlar için belirli zamanlarda yapılarak sonuçlar kaydedilir. Ortamlar için Structural analiz yapıldığı zamanlar Tablo 4.1'de görülmektedir.

Tablo 4.1 : Ortamlar için Structural analiz yapılan zamanlar

	1.Ortam	2.Ortam	3.Ortam	4.Ortam	5.Ortam
Soğuma Süresi	660 sn	1200 sn	2400 sn	3600 sn	5400 sn
Structural analiz yapılan zamanlar	30.sn	30.sn	30.sn	30.sn	30.sn
	150.sn	150.sn	150.sn	150.sn	150.sn
	330.sn	330.sn	330.sn	330.sn	330.sn
	450.sn	450.sn	450.sn	450.sn	450.sn
	660.sn	660.sn	660.sn	660.sn	660.sn
		900.sn	900.sn	900.sn	900.sn
		1200.sn	1200.sn	1200.sn	1200.sn
			1500.sn	1500.sn	1500.sn
			1800.sn	1800.sn	1800.sn
			2100.sn	2100.sn	2100.sn
			2400.sn	2400.sn	2400.sn
				2700.sn	2700.sn
				3000.sn	3000.sn
				3300.sn	3300.sn
				3600.sn	3600.sn
					3900.sn
					4200.sn
				4500.sn	
				4800.sn	
				5100.sn	
				5400.sn	



## BÖLÜM BEŞ

### ANALİZ SONUÇLARI

Analiz için kullandığımız bilgisayar yazılımı Ansys'de girilen yüzey sıcaklığıyla sırasıyla malzemedeki ısı dağılımı, sıcaklık dağılımı, deplasman değerleri, gerilmeler bulunur. Yaptığımız birinci aşamada ki Isıl analizin sonuçları olarak malzemenin ısı dağılımını görüntülemek mümkündür. Ama gerilmeleri inceleyeceğimiz için buna yer vermeyeceğiz. Tablo 4.1'de Structural analizin yapıldığı zamanlar görülmektedir. Bu zamanlarda ki sıcaklık dağılımını, deplasman değerlerini, gerilmeleri görüntülemek mümkündür.

Ansys'de beş ayrı ortam ve çok sayıda zaman noktası için analiz yapılmıştır. Bu analiz sonuçlarının hepsine burada ayrı, ayrı verilmesi mümkün değildir. Analiz sonuçlarının birlikte görüntülenmesi ve değerlendirilebilmesi için şu şekilde çalışılır. Yapılan tüm analiz sonuçlarından elde edilen, değerlendirmesi yapılacak olan veriler bir Excel dosyasında toplanır. Excel programıyla elde edilen 3 boyutlu ve 2 boyutlu grafiklerle, incelenen beş ortamda oluşan gerilmeler görüntülenebilir ve karşılaştırılabilir.

Analizde ki amacımız, beş ayrı ortamda soğumaya bırakılan kaplamada oluşan gerilmelerin mukayesesidir. Malzemeler gevrek bir yapıda olduğu için Coloumb kriteri dikkate alınması gerekir. Bu kriter göre bir noktada kırılma olmasının şartı:

$$\frac{S_1}{\sigma_{\text{çekti}}} - \frac{S_3}{\sigma_{\text{bası}}} \geq 1$$

$S_1, S_3$  : Maksimum ve minimum asal gerilmeler

$\sigma_{\text{çekti}}$  : Malzemenin çeki yükü altındaki maksimum gerilme dayanımı

$\sigma_{\text{bası}}$  : Malzemenin bası yükü altındaki maksimum gerilmesi dayanımı

Bu çalışmada kullandığımız IPS Empress ve Ceramco'nun farklı sıcaklıklardaki maksimum gerilme dayanımı değerleri elimizde mevcut değildir. Ancak bu formülde

etkin olan maksimum ve minimum asal gerilme değerleriyle, fırınlama sonrasında oluşan ısıl gerilmeleri farklı ortamların etkisiyle birlikte incelemiş oluruz.

Porselen malzemelerin bası yükü altındaki kırılma gerilmesi değerlerinin çekideki değerlere oranla yüksek olduğu bilinmektedir. Yapılan tüm analizlerde malzemedeki gerilme dağılımı incelendiğinde Ceramco'nun dış yüzeyinde ve iki malzemenin ara yüzeyinde  $S_1$  değerlerinin yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle öncelikle  $S_1$  değerinin incelenerek kritik düğüm noktalarının tespit edilmesi uygun görülmüştür. Daha sonra bu kritik düğüm noktaları için  $S_1$  ve  $S_3$  değerleri verilecektir.

Sonuçları görüntülediğimiz üç boyutlu grafiklerde ve Ansys çıktılarında gerilme değerleri belli aralıklara ayrılarak bu aralıklar farklı renklerle gösterilmiştir.

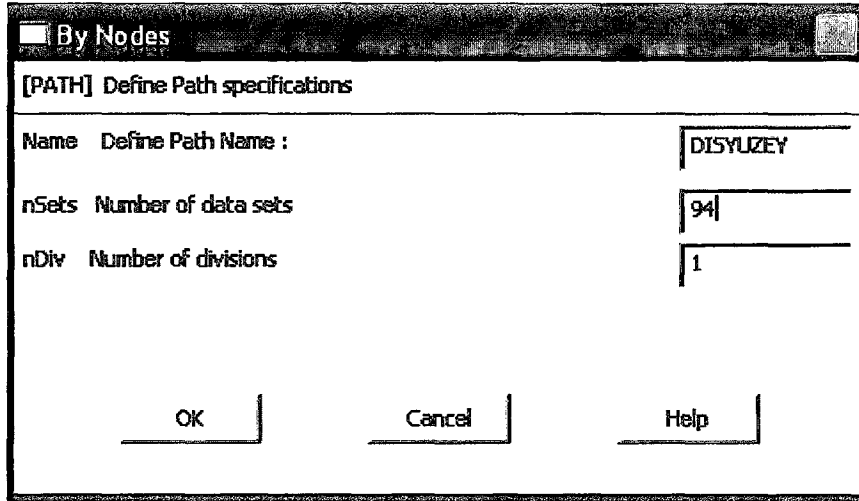
### 5.1 Üç Boyutlu Grafiklerle Sonuçların İncelenmesi

Bu grafiklerin verilmesindeki amaç farklı zamanlarda , bir yüzeydeki düğüm noktalarında oluşan gerilmelerin birlikte, tek bir grafik üzerinde görüntülenmesidir.

Grafikleri oluşturmak için Ansys'de 2 boyutlu dönele simetrik model üzerine Path (çizgi)'ler tanımlanır. Path, model üzerinde tanımlanmış bir çizgidir. Bu çizgi üzerindeki sonuçlar ayrıca görüntülenip kaydedilebilir. Model üzerinde 3 yüzey için path tanımlanmıştır.

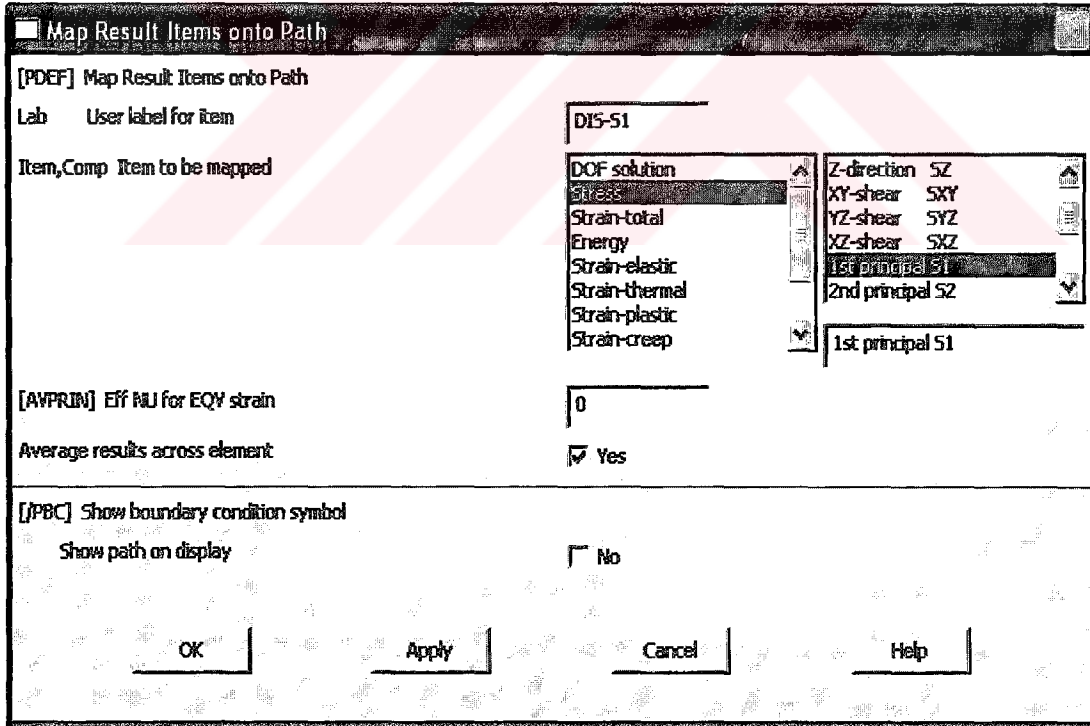
Ansys'de Path şu şekilde tanımlanmıştır.

*General Postproc > Path Operations > Define Path > By Nodes* komutuyla Path'in tanımlanacağı çizgideki tüm nodelar seçilir. *Ok* dediğimiz de bir pencere açılır. (Şekil 5.1) Bu pencereden Path adını, node sayısını ve iki node arasındaki bölünme sayısını gireriz.



Şekil 5.1 : Ansys'de Path tanımlanması

*General Postproc > Path Operations > Map Onto Path* komutuyla tanımlanmış path üzerinde hangi sonucun görüntüleneceği girilerek ad verilir. Şekil 5.2'de görülmektedir.



Şekil 5.2 : Ansys'de path üzerinde görüntülenecek sonucun seçilmesi

Aynı path üzerinde değişik sonuçların görüntülenmesi mümkündür. Bunun için *Map onto Path* penceresinde görüntülemek istediğimiz sonuçlar farklı adlarla girilir.

Path üzerindeki sonucun ekranda grafik olarak görüntülenmesi için ;

*General Postproc > Path Operations > Plot Path Item > On Graph* komutu kullanılır.

Path üzerindeki sonucun liste olarak görüntülenmesi için ;

*General Postproc > Path Operations > Plot Path Item > List Path Items* komutu kullanılır. Bu sonuçlar dosya olarak kaydedilir. Daha sonra Exel dosyasına kopyalanarak 3 boyutlu grafikler için veri tabanı oluşturulur. Bu çalışmada Ansys'de aşağıdaki Pathler tanımlanmıştır.

Path 1 ; Ceramco'nun dış yüzeyindeki düğüm noktaları

Path 2 ; Ceramco'nun iç yüzeyindeki düğüm noktaları

Path 3 ; IPS Empress 2'nin dış yüzeyindeki düğüm noktaları

Şekil 5.3'de Path 1 'deki analiz sonuçlarına yer verilmiştir. Şekil 5.3 a 'da 1.ortam, b'de 2.ortam, c'de 3.ortam, d'de 4.ortam ve e'de 5.ortam sonuçlarına yer verilmiştir. Aynı şekilde Şekil 5.4'de Path 2'deki, Şekil 5.5'de de Path 3'deki analiz sonuçlarına beş ortam için de yer verilmiştir.

Şekil 5.3, Şekil 5.4 ve Şekil 5.5 'deki üç boyutlu grafikler incelendiği zaman maksimum gerilmelerin soğumanın tamamlanmasından biraz önce ortaya çıktığı görülmüş ve bu saniyeler için gerilme dağılımı şekillerle verilmiştir. Ayrıca beş ortamda aynı düğüm noktalarında yüksek gerilmelerin olduğu görülmüş ve bu kritik düğüm noktaları için gerilme zaman eğrileri verilmiştir.

## 5.2 Gerilme Dağılımı Şekilleriyle Sonuçların incelenmesi

5 ortamda da yüksek gerilmelerin olduğu zamanlar için S1 ve S3 gerilme dağılımı şekillerle verilmiştir. Bu sonuçları görüntülemek için ; istenen ortamdaki ve zamandaki structural analiz dosyası açılarak , *General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu* tıklanarak açılan pencereden S1 ve S3 seçilir ve sonuçlar görüntülenebilir.

Şekil 5.6 'da ; 1.ortam 330. sn. ,  
 Şekil 5.7 'de ; 2.ortam 900. sn. ,  
 Şekil 5.8 'de ; 3.ortam 2100. sn. ,  
 Şekil 5.9 'da ; 4.ortam 3300. sn. ,  
 Şekil 5.10 'da ; 5.ortam 5400. sn.'deki S1 ve S3 gerilme dağılımları gösterilmiştir.

### 5.3 Gerilme-Zaman Eğrileriyle Sonuçların İncelenmesi

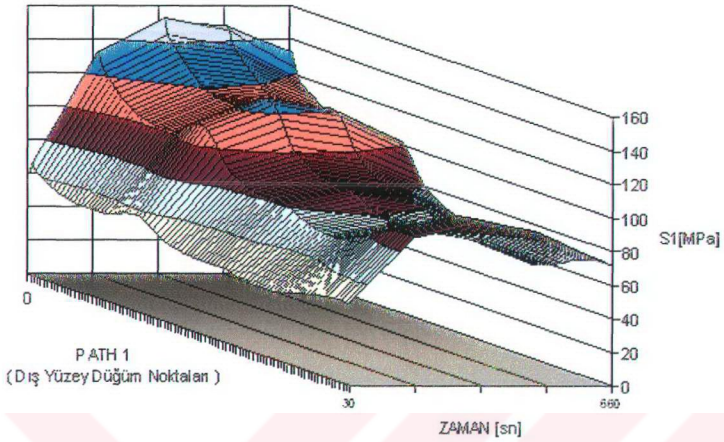
Gerilmelerin yüksek olduğu kritik düğüm noktalarında beş ortam için de gerilme-zaman eğrileri grafik olarak verilmiştir.

Şekil 5.11'de 2107. düğüm noktası için S1 gerilmelerine ,  
 Şekil 5.12'de 2111. düğüm noktası için S1 gerilmelerine ,  
 Şekil 5.13'de 2231. düğüm noktası için S1 gerilmelerine ,  
 Şekil 5.14'de 122. düğüm noktası için S1 gerilmelerine ,  
 Şekil 5.15'de 122. düğüm noktası için S3 gerilmelerine ,  
 Şekil 5.16'da 11366. düğüm noktası için S1 gerilmelerine ,  
 Şekil 5.17'de 11366. düğüm noktası için S3 gerilmelerine ,  
 Şekil 5.18'de 1. düğüm noktası için S3 gerilmelerine ,  
 Şekil 5.19'da 2. düğüm noktası için S1 gerilmelerine , yer verilmiştir.

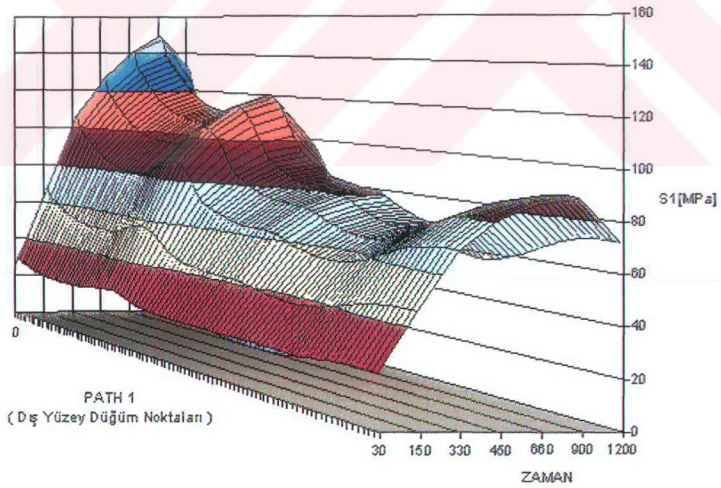
Şekil 5.11 , Şekil 5.12 ve Şekil 5.13 incelendiği zaman, kaplamanın dış yüzeyinde yüksek S1 gerilmeleri görülmüştür. Buna karşın bu bölgede S3 değerleri çok düşüktür. 1.Ortamda dış yüzeydeki maksimum.asal gerilme 153 MPa iken, 5.Ortamda bu değer 132 MPa dır.

Şekil 5.14'de S1 gerilmesinin maksimum olduğu düğüm noktası görülmektedir. Bu düğüm noktası kaplamanın inceldiği malzemelerin ara yüzeyinin en alt noktasındadır. S1 1.ortamda 159 MPa , 5.ortamda 157 MPa dır.

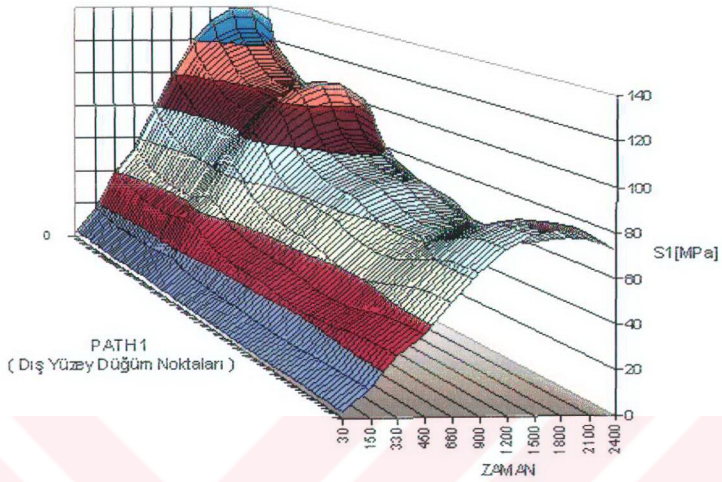
Şekil 5.18'de kaplamanın iç yüzeyinin tepe noktasında yüksek S3 gerilmesi görülmektedir. 1.ortam için 141 MPa , 5.ortam için 106 MPa değerindedir.



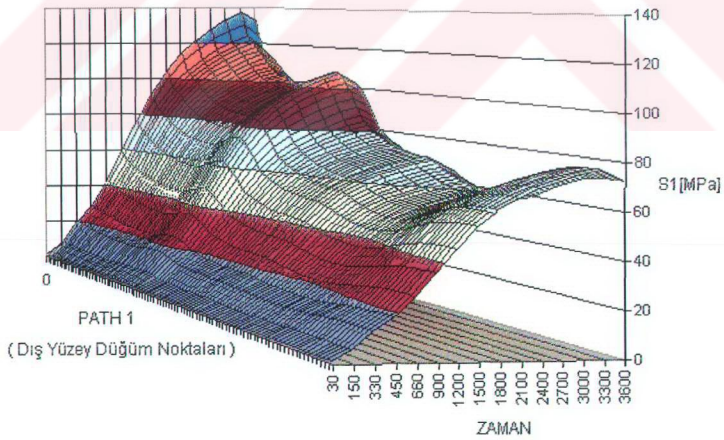
Şekil 5.3.a : 1.ORTAM için Path 1 – Zaman – S1 Gerilmesi grafiği



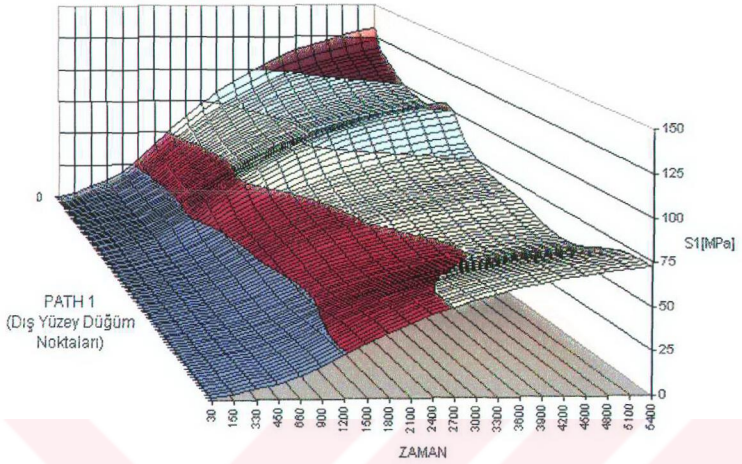
Şekil 5.3.b : 2.ORTAM için Path 1 – Zaman – S1 Gerilmesi grafiği



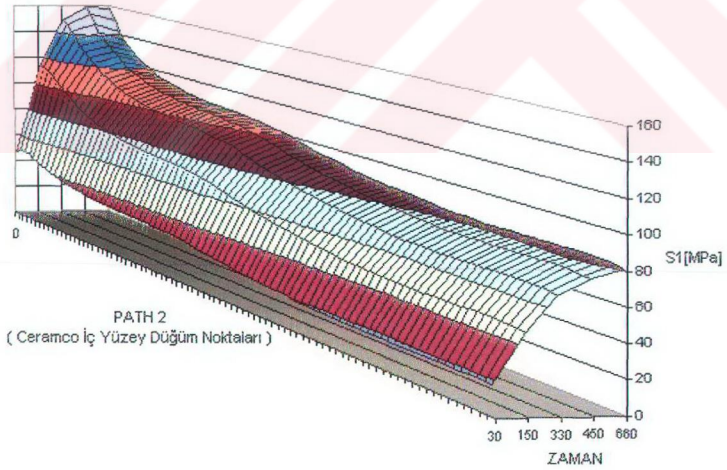
Şekil 5.3.c : 3.ORTAM için Path 1 – Zaman – S1 Gerilmesi grafiği



Şekil 5.3.d : 4.ORTAM için Path 1 – Zaman – S1 Gerilmesi grafiği

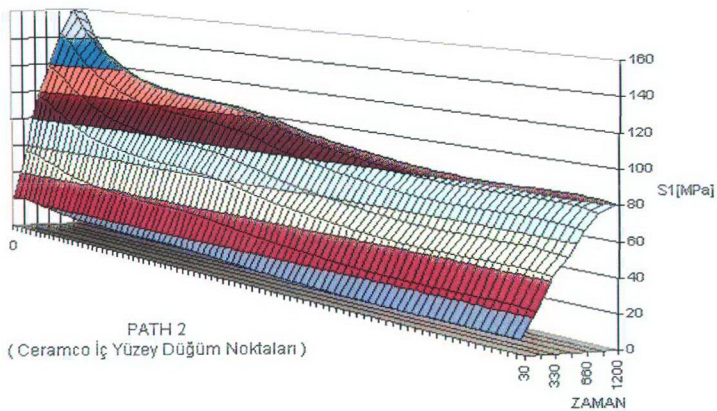


Şekil 5.3.e : 5.ORTAM için Path 1 – Zaman – S1 Gerilmesi grafiği

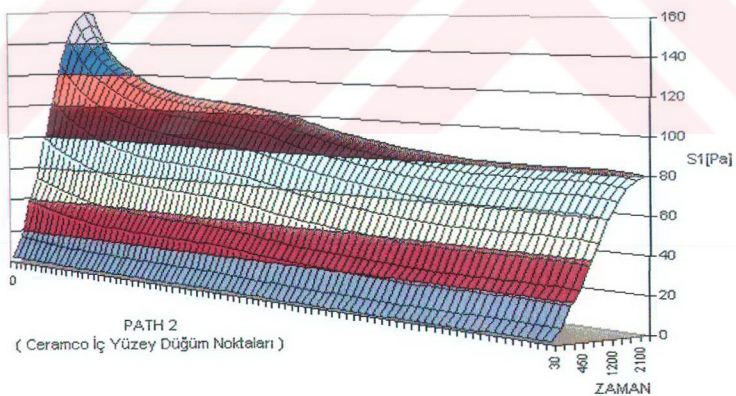


Şekil 5.4.a : 1.ORTAM için Path 2 – Zaman – S1 Gerilmesi grafiği

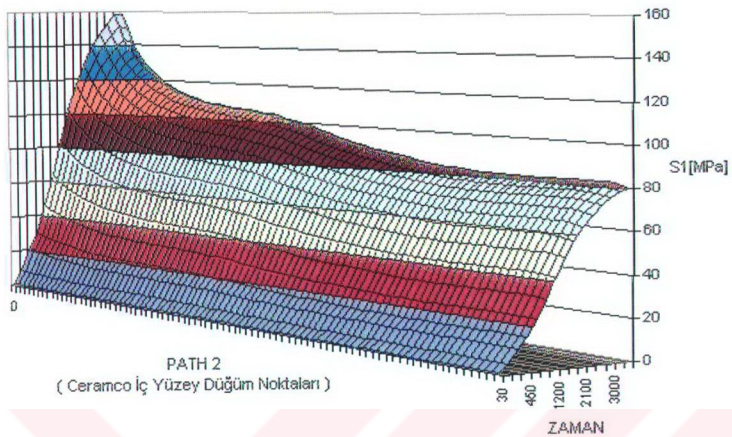




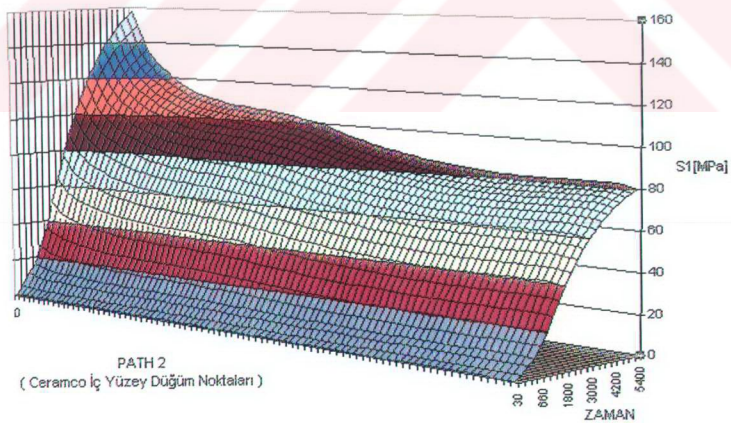
Şekil 5.4.b : 2.ORTAM için Path 2 – Zaman – S1 Gerilmesi grafiği



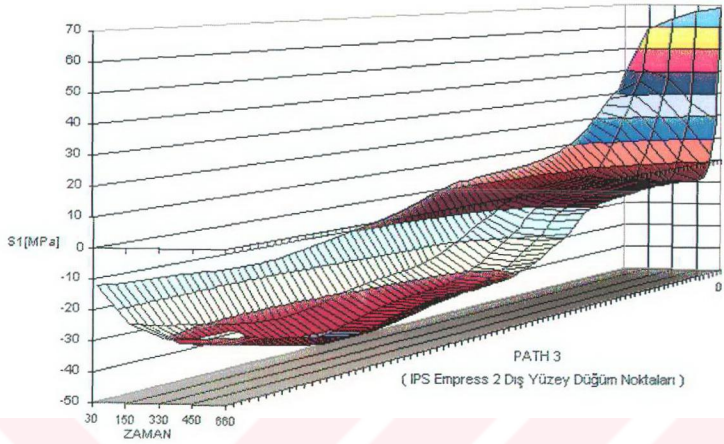
Şekil 5.4.c : 3.ORTAM için Path 2 – Zaman – S1 Gerilmesi grafiği



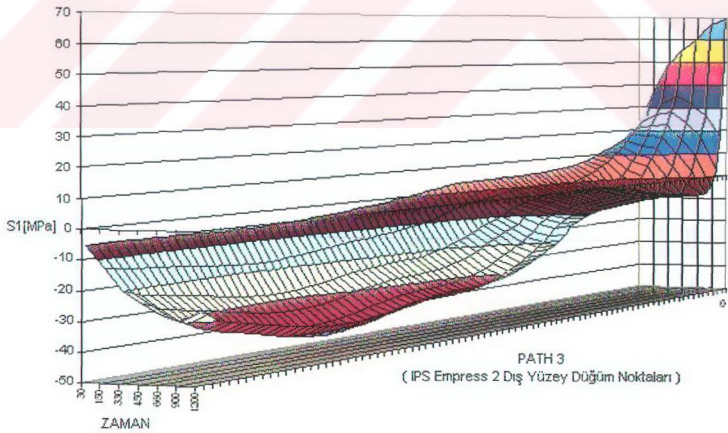
Şekil 5.4.d : 4.ORTAM için Path 2 – Zaman – S1 Gerilmesi grafiği



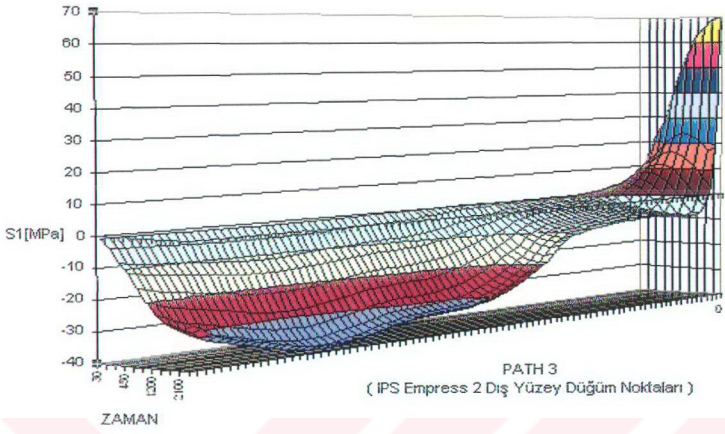
Şekil 5.4.e : 5.ORTAM için Path 2 – Zaman – S1 Gerilmesi grafiği



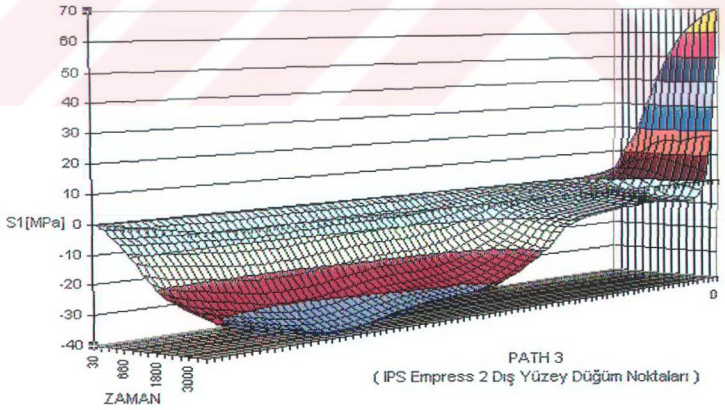
Şekil 5.5.a : 1.ORTAM için Path 3 – Zaman – S1 Gerilmesi grafiği



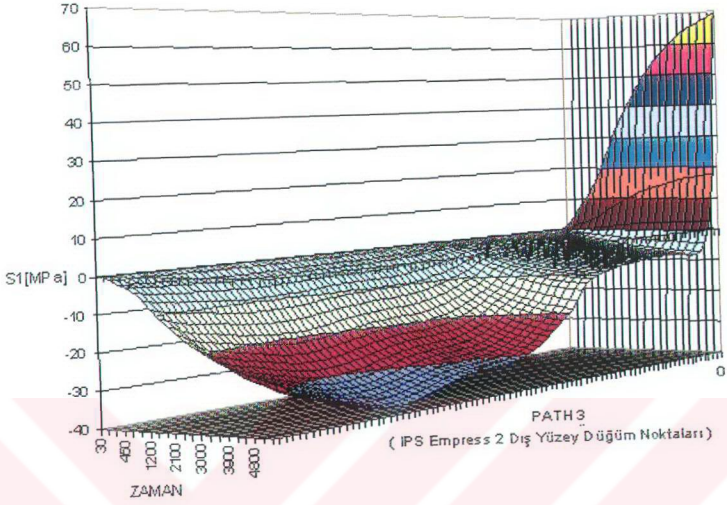
Şekil 5.5.b : 2.ORTAM için Path 3 – Zaman – S1 Gerilmesi grafiği



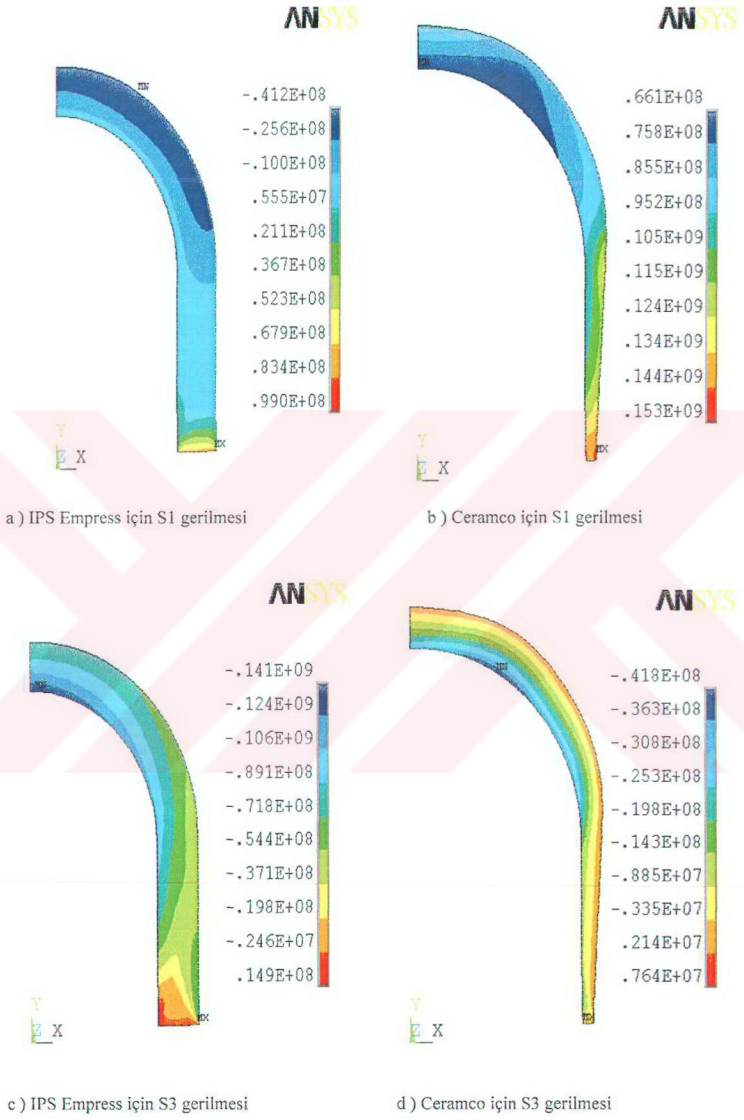
Şekil 5.5.c : 3.ORTAM için Path 3 – Zaman – S1 Gerilmesi grafiği



Şekil 5.5.d : 4.ORTAM için Path 3 – Zaman – S1 Gerilmesi grafiği

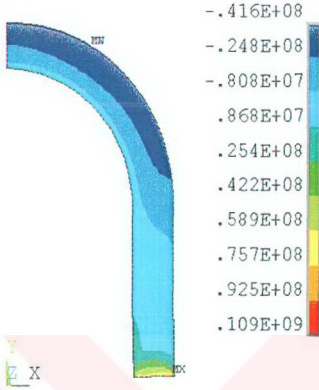


Şekil 5.5.e : 5.ORTAM için Path 3 – Zaman – S1 Gerilmesi grafiği



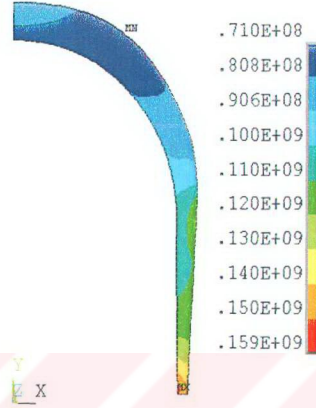
Şekil 5.6 : 1.ortam – 330.sn 'de malzemedeki S1 ve S3 gerilme dağılımları

ANSYS



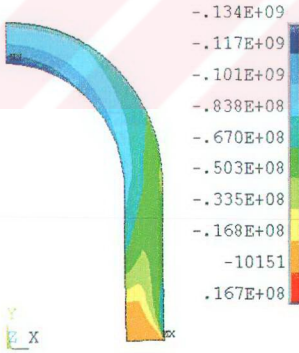
a) IPS Empress için S1 gerilmesi

ANSYS



b) Ceramco için S1 gerilmesi

ANSYS



c) IPS Empress için S3 gerilmesi

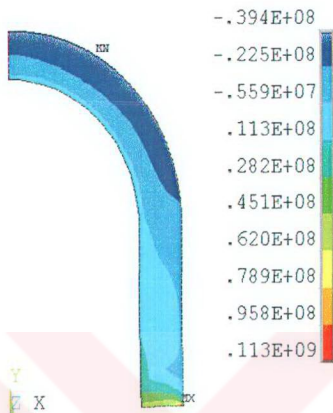
ANSYS



d) Ceramco için S3 gerilmesi

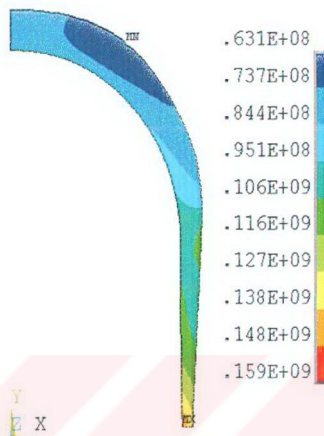
Şekil 5.7 : 2.ortam - 900.sn 'de malzemede ki S1 ve S3 gerilme dağılımları

ANSYS



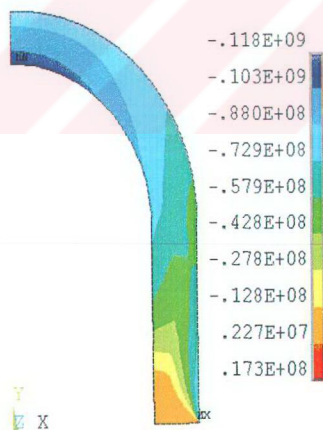
a) IPS Empress için S1 gerilmesi

ANSYS



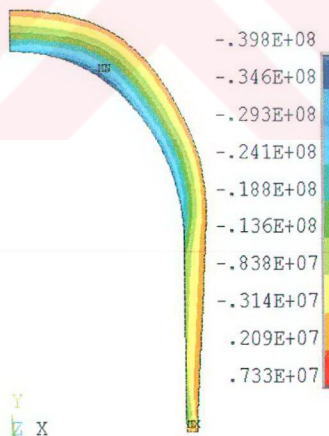
b) Ceramco için S1 gerilmesi

ANSYS



c) IPS Empress için S3 gerilmesi

ANSYS

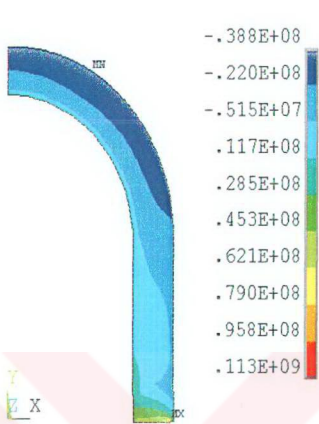


d) Ceramco için S3 gerilmesi

Şekil 5.8 : 3.ortam – 2100.sn 'de malzemedeki S1 ve S3 gerilme dağılımları



ANSYS



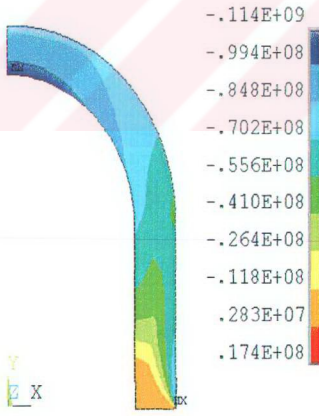
a) IPS Empress için S1 gerilmesi

ANSYS



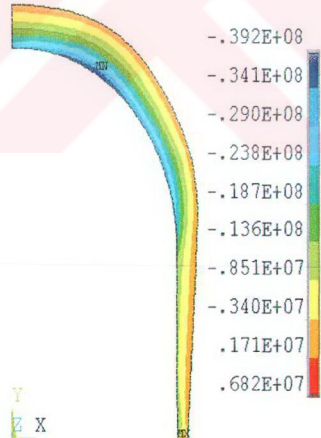
b) Ceramco için S1 gerilmesi

ANSYS



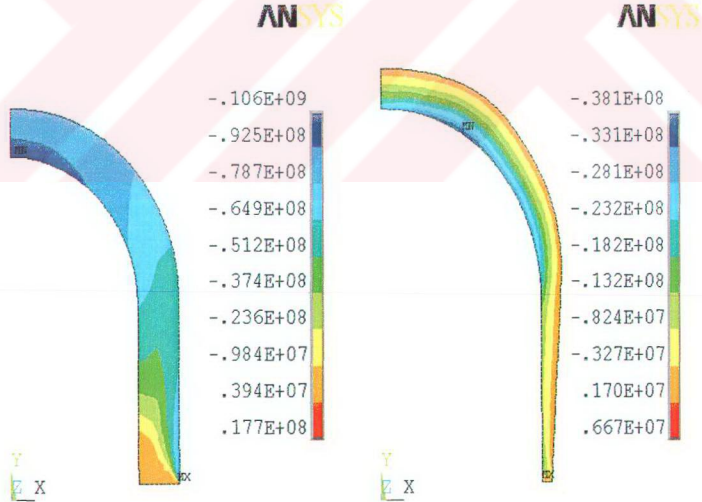
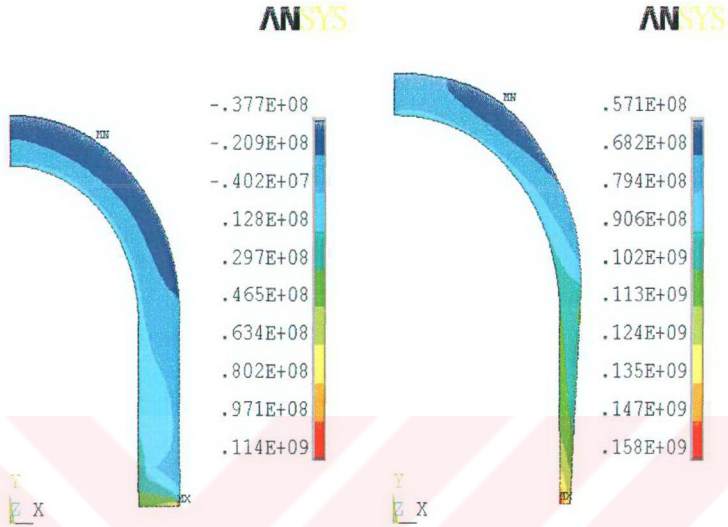
c) IPS Empress için S3 gerilmesi

ANSYS



d) Ceramco için S3 gerilmesi

Şekil 5.9 : 4.ortam – 3300.sn 'de malzemede ki S1 ve S3 gerilme dağılımları



Şekil 5.10 : 5.ortam – 5400.sn 'de malzemedeki S1 ve S3 gerilme dağılımları



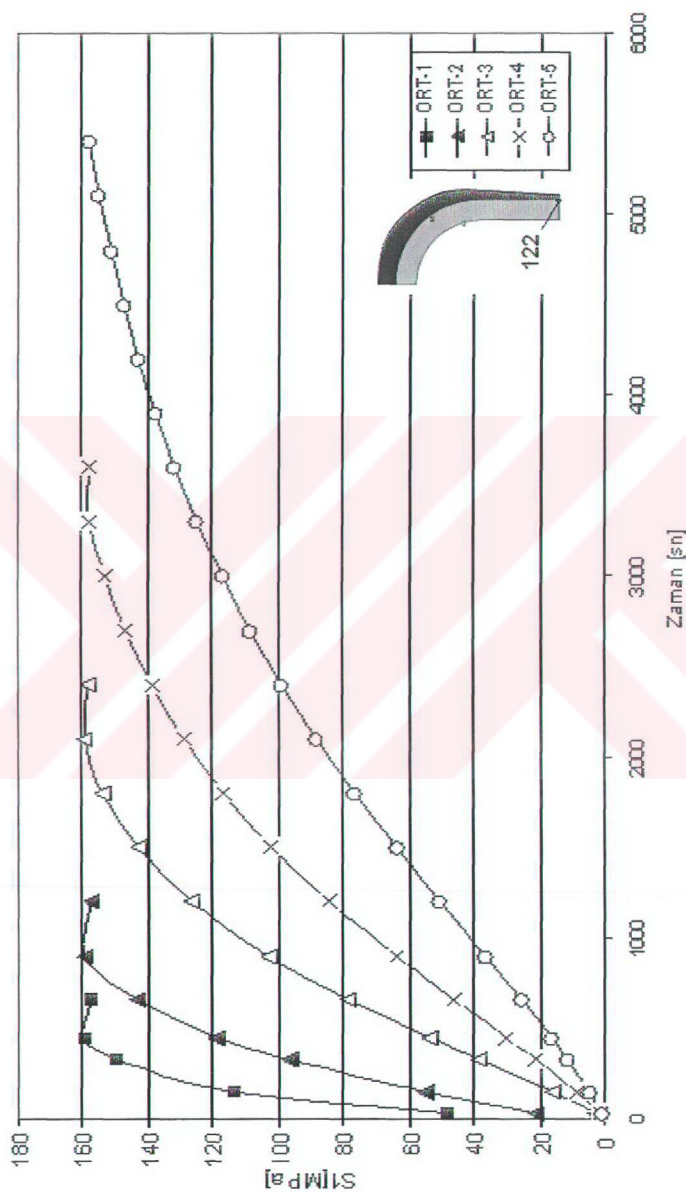
Şekil 5.11 : 2107. Düğüm noktası için S1 gerilmesi -- zaman grafiği



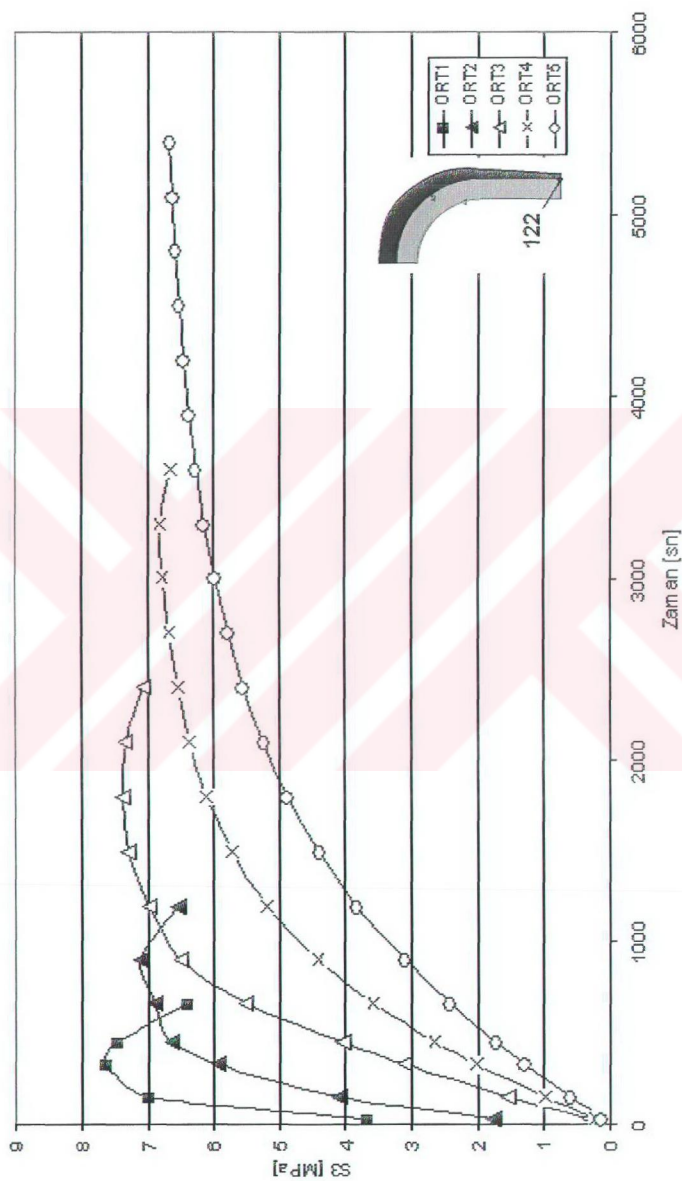
Şekil 5.12 : 2111. Dügüm noktası için S1 gerilmesi - zaman grafiği



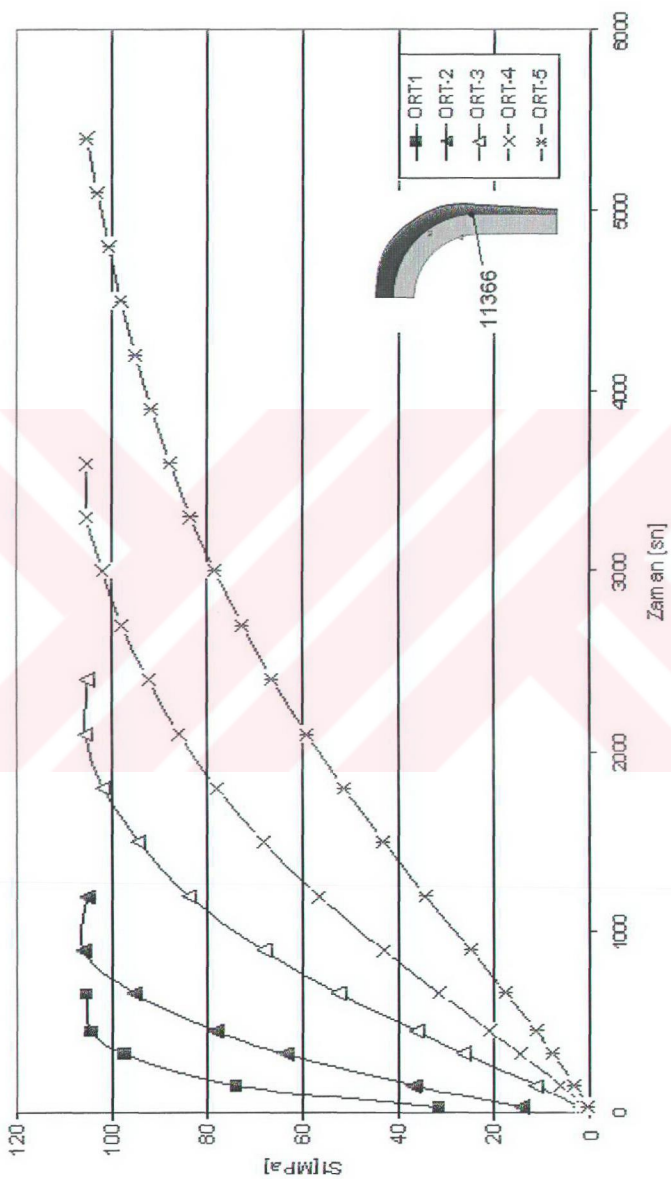
Şekil 5.13 : 2231. Düşüm noktası için  $S_1$  gerilmesi – zaman grafiği



Şekil 5.14 : 122. Düşüm noktası için  $S_1$  gerilmesi - zaman grafiği

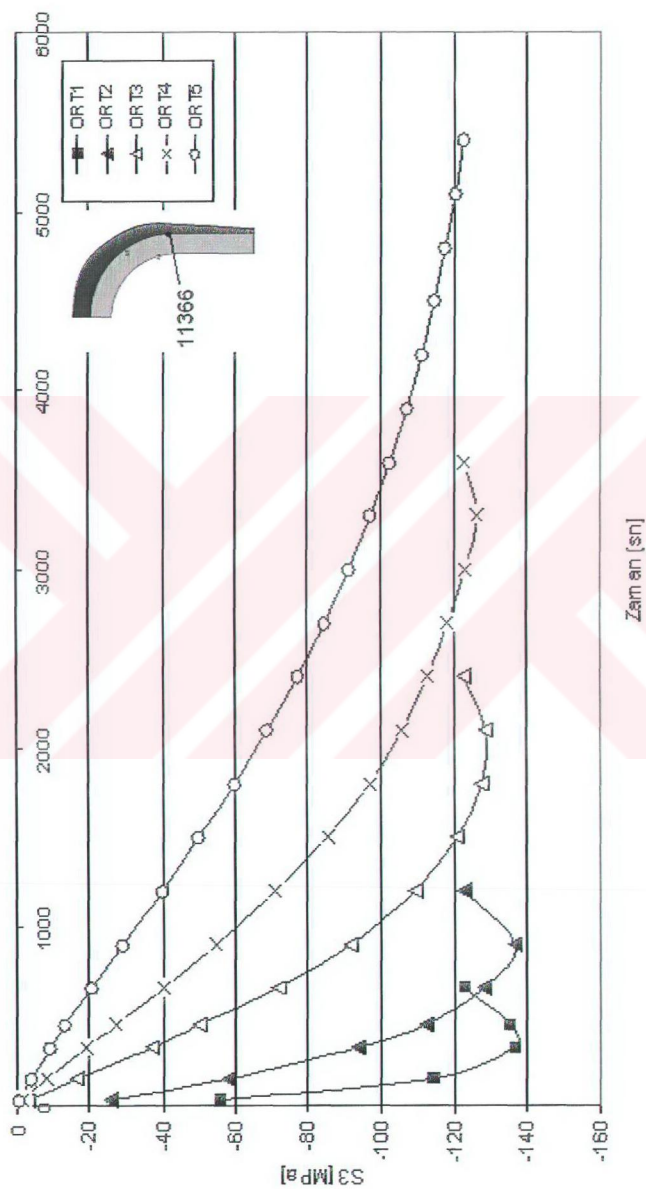


Şekil 5.15 : 122. Düğüm noktası için  $S_3$  gerilmesi – zaman grafiği

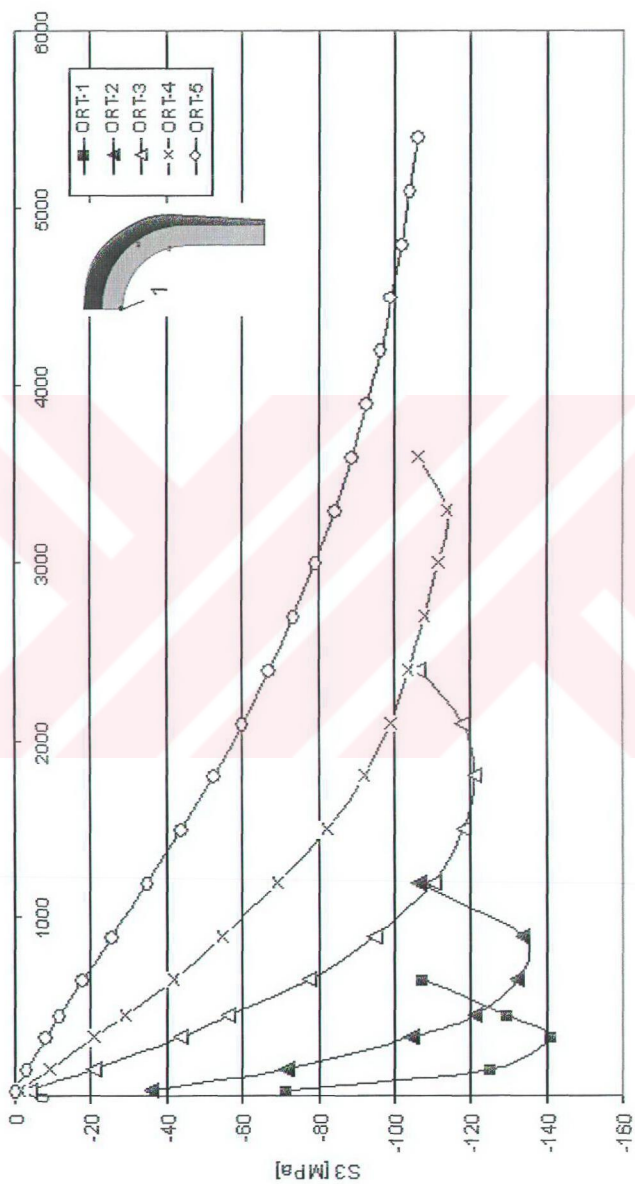


Şekil 5.16: 11366: Düğüm noktası için SI gerilmesi – zaman grafiği



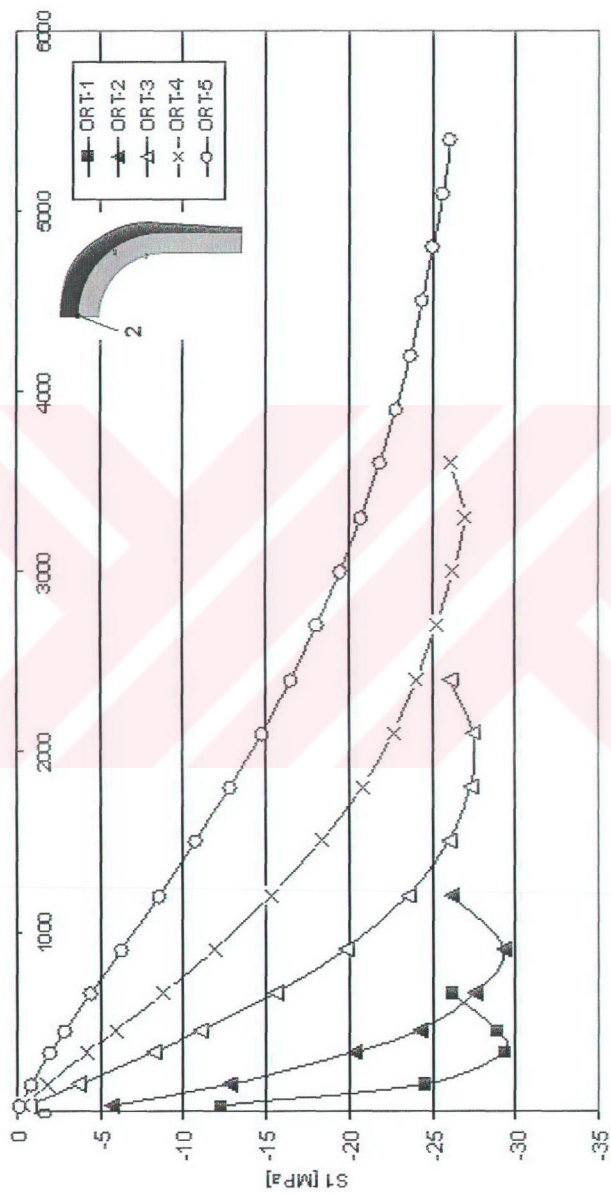


Şekil 5.17 : 11366. Düşüm noktası için S3 gerilmesi – zaman grafiği



Zaman [sn]

Şekil 5.18 : 1. Düğüm noktası için S3 gerilmesi – zaman grafiği



Zaman [sn]

Şekil 5.19 : 2. Düşüm noktası için S1 gerilmesi – zaman grafiği

## BÖLÜM ALTI DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada tüm seramik kuron kaplamada fırınlama sonrasında oluşan ısıl gerilmeler Ansys 6.1 paket programı kullanılarak hesaplanmıştır.

Elde edilen sonuçlar, kaplamanın soğuması sırasında yüksek ısıl gerilmelere maruz kaldığı ve bu gerilmelerin soğuma sırasında çatlaklara yol açabileceğini gösterir. Bu çatlaklar ise ağız içinde özellikle çigneme kuvvetlerinin etkisiyle ilerleyerek, tedavi sonrasında da kaplamanın kırılmasına yol açabilecektir. Nitekim günümüzdeki uygulamalar bu gerçeği göstermekte ve birçok uygulamada istenmeyen bu olumsuz durum ortaya çıkmaktadır.

O halde bu çatlakların başlangıçta oluşumunun engellenmesi ile sorun büyük ölçüde giderilebilir. Bu çalışmanın sonuçları soğuma hızının yavaşlatılmasıyla gerilmelerin düşeceğini ispatlar. Bu ise çatlak oluşum riskini azaltır. O halde soğuma işlemlerinin en uygun şekilde ve standart bir hale getirilmesiyle genel bir çözüm yoluna gidilebileceği söylenebilir.

Bunun yanı sıra, birbirleriyle uyumlu malzeme çiftlerinin geliştirilmesi de ikinci bir çözüm yolu olarak görülebilir. Malzeme çiftlerinin her sıcaklıkta mekanik davranışlarının birbirine yakın karakterler göstermesiyle ısıl gerilmeler ve dolayısıyla çatlak oluşma riski yine azaltılabilir. Ancak malzemenin yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerinin tespiti oldukça zor olduğundan, bu tip optimizasyon çalışmalarına literatürde rastlanmamıştır. Bu çalışmamızın ise bu alanda yapılan ilk çalışmalar arasında olduğunu söylememiz mümkündür.

**KAYNAKLAR**

Akın E. (1990). Diş hekimliğinde porselen (3.Baskı). İstanbul : İ.Ü. Basımevi

Darcan A. (2003). Tüm seramik inlaylarda kavite preparasyonu ve yapım sistemleri (Lisans Tezi).İzmir , Ege Üniversitesi.,Dişhekimliği Fakültesi

Dai K. & Shaw L. ( 19 August 2003 ). Thermal and mechanical finite element modeling of laser forming from metal and ceramic powders. Acta Materialia 52 (2004) 69–80. www.actamat-journals.com

Güngör M.A. , Küçük M. , Dündar M. , Karaoğlu Ç. , Artunç C. (2004). Effect of temperature and stress distribution on all-ceramic restorations by using a three-dimensional finite element analysis. Journal Of Oral Rehabilitation , 31 , 172-178

Küçük M. (1999). Thermal stress analysis in the coated upper canine. Ph.D. Thesis, İzmir, Dokuz Eylül University, Graduate School of Natural and Applied Sciences.

Chandrupatla T.R. & Belegundu A.D. (2002). Introduction to finite elements in engineering. (3rd.ed.). New Jersey : Prentice-Hall

O'Brien W. J. Biomaterials Properties Database, University of Michigan  
[http://www.lib.umich.edu/dentlib/Dental\\_tables](http://www.lib.umich.edu/dentlib/Dental_tables)

<http://www.ceramics.nist.gov/srd/summary/scdaos.htm>

<http://www.degudent.com/products>

<http://www.wade.co.uk>