

BORU HATLARINDA ISIL GENLEŞME ve ANALİZ YÖNTEMLERİ

Cihan ÇANAKÇI
Arif HEPBAŞLI

ÖZET

Boru hatlarının malzeme ve montaj giderleri, ısı tekniği ile ilgili tesislerin önemli kısmını oluşturur. Boru hatlarının payı, toplam tesis giderlerinin %30'u üzerindedir. Bu yüzden, boyutların seçiminin özenle yapılması ve ısı genleşmelerinin en ekonomik şekilde alınması gerekmektedir.

Uygulamada, boru hatlarının ısı genleşmelerinin alınmasında, kompansatör, omega gibi elemanlar kullanılmaktadır. Hatta, bazen hattın kendisi ısı genleşmeleri kompanze edecek yeterli esnekliğe sahip olmasına karşın, bu elemanlar gereksiz olarak kullanılmaktadır. Bu durum, hem yatırım hem de işletme maliyetinin artmasına yol açmaktadır.

Bu çalışmada, boru hatlarının ısı genleşmelerinin alınmasında kullanılan değişik yöntemler genel hatlarıyla ele alınacaktır. Burada; özellikle, boru hatlarının yeterli esnekliğini belirlemede kullanılan yaklaşık yöntemler ile daha hassas hesap gerektiren bilgisayar destekli tasarımı üzerinde durulacaktır. Çeşitli hesaplama örnekleri verilerek, boru hattı tasarımcısına yardımcı olmaya çalışılacaktır.

1. GİRİŞ

Boru hatları çok geniş bir alanda ve çok değişik basınç ve sıcaklıklardaki gaz ve sıvı akışkanların taşınmasında kullanılır. Bilindiği gibi mühendislik bir bakıma, estetiğin göz önüne alınmasıyla, ekonomik açıdan optimum çözümler bulma sanatıdır. Bu çerçevede, mühendisler, boru hatlarıyla uğraşırken, üç önemli soruna çözüm bulmaya çalışır. Bunlar; optimum boru çapının belirlenmesi, optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesi ve gerilmelerin en ekonomik biçimde alınmasıdır.

Borularda gerilmelere yol açan 4 faktör vardır:

- İç ve dış basınç.
- Dış yükler, borunun, valflerin, desteklerin, boru içindeki sıvının, yalıtım malzemelerinin kütleleri, deprem gibi dinamik yüklerden oluşan gerilmeler.
- Dış kısıtlamalardan ötürü boru parçasını yapmak zorunda olduğu hareket örneğinin, dinamik bir sisteme bağlı olan boru, sistemle birlikte titreşmek zorundadır.
- Isıl genleşmeler [1].

Dış yükler, ağırlık yüklerinin kontrolü basittir. Standartlaştırılmış destek ve askılarla kolayca önlemleri alınabilir. Bu çalışmada, destek ve askılardan sadece yüzeysel olarak bahsedilecektir. Literatürde, bu konuyla ilgili geniş araştırmalar, örnek modeller ve uygulamalar mevcuttur. Daha fazla bilgi ilgili literatürden elde edilebilir [2,3].

Boru hatları, tesisin amacına uygun, en uzun ömre, en düşük işletme ve yatırım maliyetine sahip, emniyetli çalışacak şekilde tasarlanmalıdır. Söz konusu en iyi çözüm, tesisin ısı gerilme analizinin yapılmasını gerektirmektedir. Bu nedenle, ısı gerilmeler, en basit ev ısıtma tesisatından, yüksek basınç ve sıcaklıktaki buhar tesisatlarına kadar her tesisatta göz önüne alınmalıdır. Nükleer

tesislerdeki boru hatları, kullanılan sıvıların, özellikle sıvı metallerin yüksek çalışma sıcaklıkları ve daha fazla emniyet gerektirdiklerinden ısı gerilme analizinin ön plana çıktığı tesisatlardır [4].

Isıl genleşmelerin hesapları karışık ve zordur. Dış atmosferdeki veya boru sistemi içindeki akışkanda oluşan sıcaklık farkları, sistemin boyca uzamasına veya kısalmasına sebep olur. Eğer boru hattı sadece bir noktadan sabitlenmiş ise uzamalar sistemin serbest ucuna doğru olur ve hiçbir genleşme gerilmesi oluşmaz. Fakat gerçekte boru hattı iki veya daha fazla noktadan çeşitli şekillerde sabitlenir. Bu sabit noktalar genleşmeleri engeller ve sistem içinde gerilmeler oluşur [5].

Boru hatlarında montaj her zaman ortam sıcaklığında gerçekleştirilir. Daha sonra tesisat çeşitli sıcaklıklardaki akışkanları ve dolayısıyla da ısıyı belli bir yere taşımaya başlar. Boru hattının son sıcaklığı ve montaj sıcaklığı arasındaki fark, tesisat ve işletmede büyük gerilmeler meydana gelir. Bu gerilmeler, tesislerin planlanması, inşaatı ve işletilmesi esnasında kesinlikle ihmal edilemezler. Aksi takdirde işletmenin emniyeti tehlike altına girebilir [6].

Boru hatlarındaki ısı genleşmelerin alınmasında değişik yöntemler kullanılmaktadır. Kompansatörler, dengeleyiciler, metal hortumlar gibi elemanların yanı sıra, bazen hattın kendisi, şekli dolayısıyla bu genleşmeleri kompanze edebilecek yapıdadır. Bu yüzden kompansatör, dengeleyici vs.. elemanları kullanmadan önce sistemin genleşme hesapları yapılmalıdır. Bu sayede gereksiz yere genleşme elemanlarının kullanılması önlenir.

Bu çalışmada, temel olarak boru hatlarındaki ısı genleşmelerin doğal kompanzasyon ile alınması incelenmiştir. Doğal kompanzasyon ile; sistemin kendi içerisinde, ısı genleşmelerden oluşan gerilmelerin izin verilen maksimum gerilme değerlerinin altında tutulması amaçlanır. Isıl genleşmelerden oluşan termal gerilmeler çok değişik yöntemlerle hesaplanır. Tek bir doğru çözüm varken neden bir çok yöneme ihtiyaç duyulmuş, diye sorulabilir. Fakat en basit boru hattında bile matematiksel işlemler çok karışık bir hal almaktadır. Bu nedenle hata yapmadan bunları hesaplamak çok zor ve zaman alıcıdır. Gerçekte boru hatlarının üç boyutlu ve karmaşık şekillerde olduğu düşünülürse, bu hesaplamaları tek bir yöntemle yapmak çok fazla emek gerektirir. Bu yüzden çoğu yaklaşık çözüm veren birçok yöntem geliştirilmiştir. Bunların bir kısmı, basit formüllerle boru hattının ilk incelenmesinde karar vermeyi kolaylaştırıcı görev üstlenirler. Bazıları yaklaşık olarak sistemdeki gerilmelerin hesaplanmasını sağlar. Tam olarak sonuç verebilen uzun ve karışık yöntemler de mevcuttur. Aşağıda birkaç yaklaşık yöntemin yanı sıra Hao Hsiao'nun tam çözüm yöntemi ve bu yöntemin bilgisayar destekli uygulaması incelenmiştir [2,3].

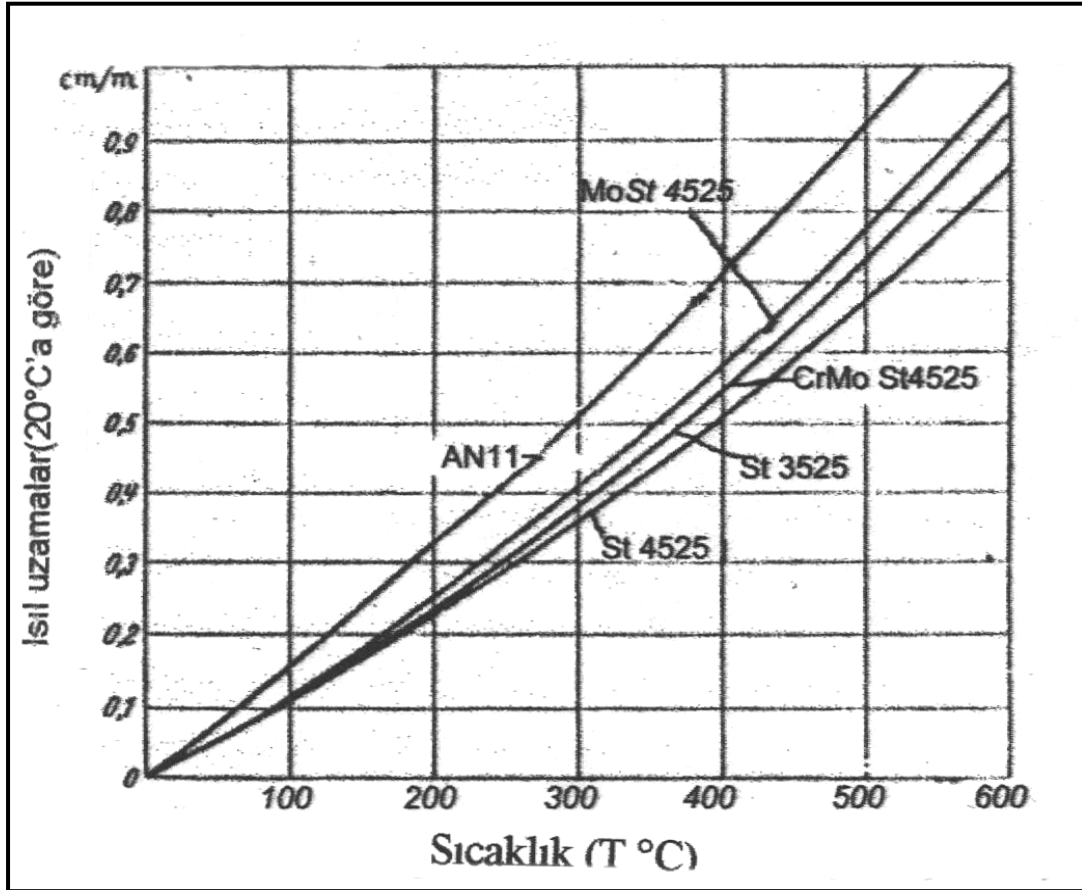
2. GENEL BİLGİLER

2.1 ISIL GENLEŞMELER

Fiziğin temel kurallarından biride maddelerin sıcaklık değişimleri sonucu genleşmesi ve büzüşmesidir. Bu genleşme ve büzüşmeler maddenin cinsine, iç yapısına ve sıcaklık farkına bağlıdır. Büyük sıcaklık farklarının söz konusu olduğu uygulamalarda sistemi tehlikeye sokacak boyutlara ulaşabilirler. Bu yüzden daha planlama aşamasında hesaplanmaları ve önlemlerinin alınması gereklidir.

Boruların uzunluk genişlemeleri, yaklaşık olarak sıcaklıkla orantılıdır. Örneğin; akma çeliği için 100 °C'lik sıcaklık farkında her m'lik boru için takriben 1.2 mm 'dir. Bakırda ise, bu değer yaklaşık olarak 1.8 mm'dir. Isıl genişleme miktarı sıcaklıkla değişir ve malzemenin bileşimine bağlıdır. En çok kullanılan boru ve flanş çelikleri için cm/m cinsinden uygun genişleme değerleri çeşitli sıcaklıklarda Şekil 1' de grafik olarak verilmiştir [6].

Literatürde bunun gibi diyagramların yanı sıra doğru okunması daha kolay olan ve değişik malzemeleri içeren grafikler de mevcuttur. Şekil 2 'de çeşitli malzemedeki boruların, 10°C'a göre mm/m cinsinden uzamaları verilmiştir.



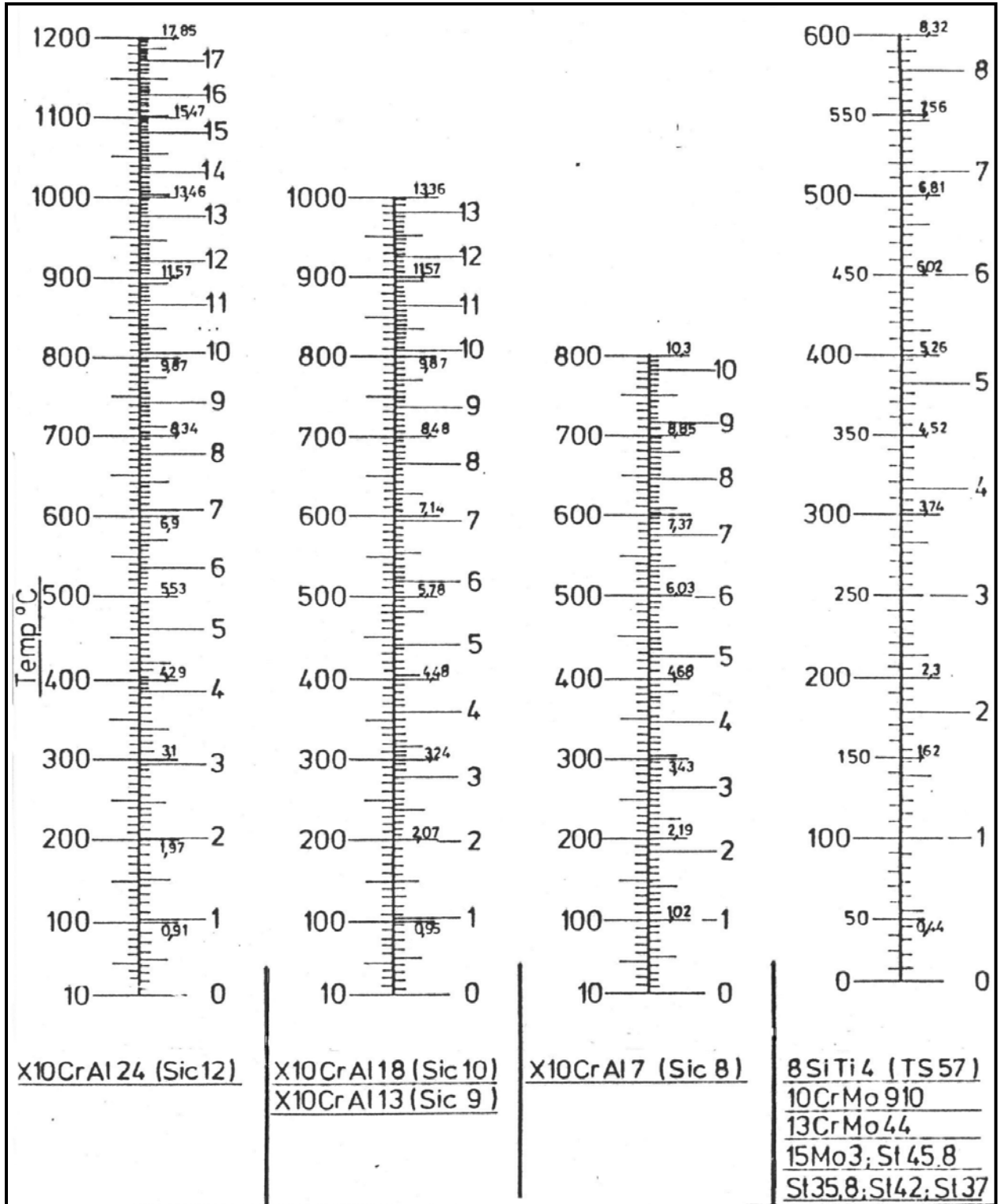
Şekil 1. Çeşitli boru malzemelerinin ısıl genleşmeleri

Literatürde[7], bu amaçla kullanılan çeşitli tablolar mevcuttur. Aşağıda bu tablolardan biri gösterilmiştir.

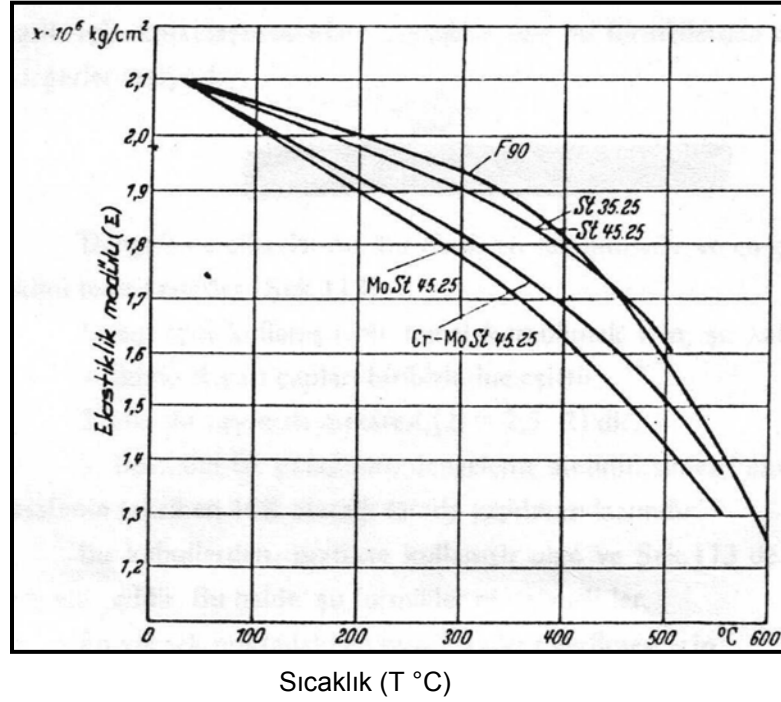
Tablo 1. Çeşitli malzemelerin değişik sıcaklıklardaki genleşmeleri

Malzeme	20 °C'ye Göre Uzama Miktarları (mm/m)				
	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C
Ferritik çelik	0.0111	0.0121	0.0129	0.0135	0.0139
Ostenitik çelik	0.0155	0.0165	0.0170	0.0175	0.0180
Bakır	0.0155	0.0160	0.0165	0.0170	0.0175
Alüminyum alaş.	0.0237	0.0245	0.0253	0.0263	0.0272

Elastikiyet modülü de sıcaklıkla değişir. İşletme esnasındaki boru özellikleri bizim için asıl kriterler olduğundan işletme sıcaklığındaki elastiklik modülünün de hesaplanması gerekir. Bazı malzemelerinin değişik sıcaklıklardaki elastiklik modülleri Şekil 3' de grafik olarak gösterilmiştir [6].



Şekil 2. Çeşitli malzemelerin ısıl uzamaları (mm/m)



Şekil 3. Çeşitli malzemelerin değişik sıcaklıklardaki elastiklik modülleri.

Isıl genleşmelerden doğan gerilmelerin gerçekte nasıl oluştuğunu anlamak için, aşağıdaki iki basit tipteki boru parçalarını inceleyelim;

A	:	Kesit alanı	(mm ²)
E	:	Elastikiyet modülü	(N/mm ²)
F	:	Kuvvet	(N)
I	:	Eylemsizlik momenti	(mm ⁴)
M	:	Moment	(Nmm)
ΔT	:	Sıcaklık farkı	(°C)
σ	:	Normal gerilme	(N/m ²)
α	:	Lineer ısıl genleşme katsayısı	(1/°C)

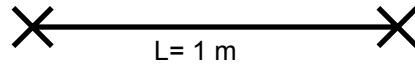
Örnek 1:

Her iki ucundan tespit edilmiş boru:

$$\text{Birim uzama:} \quad \alpha \cdot \Delta T = \frac{\sigma}{E} \quad (1)$$

Malzeme özellikleri: St35, DN 150 (A = 3206.3 mm²), E=2.1*10⁵ N/mm², α=12.5*10⁻⁶ 1/°C,

ΔT=220°C ise;



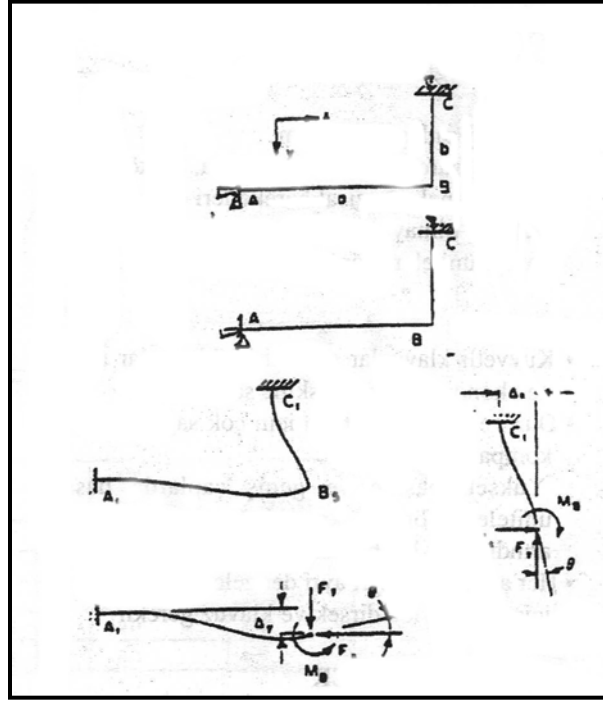
$$12.5 \cdot 10^{-6} \cdot 220 = \frac{\sigma}{2.1 \cdot 10^5} \quad \sigma = 577.5 \text{ N/mm}^2$$

$$F = \sigma A = 1.851 \text{ 638 N}$$

Görüldüğü gibi, boru sabit noktalarında bir F gerilme kuvveti oluşmuştur.

Örnek 2:

L şeklinde, her iki ucu tespit edilmiş boru parçası:



Şekil 4. L şeklinde, her iki ucu tespit edilmiş boru parçası

Teoriden 5 eşitlik elde edilir.

B noktasındaki Şekil değiştirmeler.

$$\Delta y = \frac{1}{EI} [F_y a^3 \times \frac{1}{3} - M_b a^2 \times \frac{1}{2}] = \frac{F_y b}{EA} + \alpha \times a \times \Delta T \quad (2)$$

$$\Delta x = \frac{1}{EI} [F_x b^3 \times \frac{1}{3} - M_b b^2 \times \frac{1}{2}] = \frac{F_x a}{EA} + \alpha \times a \times \Delta T \quad (3)$$

$$F_x = \frac{3EI}{ab(a+b)} \times \frac{(4ab + a^2)\Delta x + 3b^2\Delta y}{b^2} \quad (4)$$

$$F_y = \frac{3EI}{ab(a+b)} \times \frac{(4ab + b^2)\Delta y + 3a^2\Delta x}{a^2} \quad (5)$$

$$M_b = \frac{6EI}{ab(a+b)} (a\Delta x + b\Delta y) \quad (6)$$

Beş bilinmeyen Δx , Δy , F_x , F_y , M_b bu beş denklemle çözülmüşür;

$$I = \frac{\pi}{64} (D_d^4 - D_i^4) \quad (7)$$

$$A \text{ noktasındaki moment} \quad M_a = a \cdot F_y - M_b \quad (8)$$

$$C \text{ noktasındaki moment} \quad M_c = b \cdot F_x - M_b \quad (9)$$

$$A \text{ noktasındaki gerilme} \quad \sigma_a = \frac{M_c \times D_d}{12} \quad (10)$$

$$B \text{ noktasındaki gerilme} \quad \sigma_b = \frac{M_c \times D_d}{12} \quad (11)$$

Görüldüğü gibi basit şekildeki sistemlerde bile, ısıl genleşme analizini yapmak zor ve zahmetlidir [4].

2.2 BORU DESTEKLERİ (ASKILAR ve YATAKLAR)

Boru hatlarındaki askıların, desteklerin ve yataklarının hesaplanması ve yerleştirilmeleri aslında çok zor bir işlem değildir. Birçok tasarım firması boru hatlarının tasarımı için özel yetiştirilmiş mühendisler çalıştırır. Fakat her firma, maliyetleri düşürmek için kendi bünyesindeki mühendislerden bu sorumluluğu almasını bekler. Mühendisin yapması gereken biraz vakit ayırarak bu konuyu incelemesidir. Daha sonra işlem sırasını takip ederek, uygun destekleri uygun noktalara yerleştirebilir [2,3].

Bu bölümde çok fazla detaylı hesaba girilmeyecektir. Son yıllarda bu konuda birçok araştırma yapılmıştır. Gerekli bilgiler literatürden elde edilebilir. Bu bölümde sadece işlem sırasından ve askı ve yatak çeşitlerinden bahsedilecektir [2,3].

Yapılması gereken ilk işlem boru hattının çizimini hazırlamaktır. Bu çizimde boru hattı üzerindeki her türlü malzeme, havalandırma kanalı, pompa, alet kablo tablaları, her türlü damarlar, vb yapılar ve yerleri belirtilmelidir. Bu şekillerin üç boyutlu hazırlanması kolaylık sağlar. Ayrıca, boru ölçüleri, boru malzemesi, duvar kalınlığı, ağırlıklar, yalıtım özellikleri, kritik araç bağlantıları (reaktörler gibi), gerilme sonuçları, esneklik, hareketler, titreşimler, vb bilgileri içeren bir veri dosyası oluşturulması da fayda sağlayacaktır [2].

Desteklerin seçilmesinde izlenecek işlem sırası şöyledir:

- Desteklerin yerlerinin belirlenmesi:** Desteklerin yerleri belirlenirken iki destek arasındaki açıklık özenle seçilmelidir. Bunun için literatürde değişik tablo (Tablo 2 ve 3) ve diyagramlar mevcuttur [3,6,8].
- Her bir destekteki termal hareketlerin hesaplanması:** Tam bir kesinlikle boru hatlarındaki ısıl genleşmelerin hesaplanması çok karmaşık bir çalışma gerektirir. Fakat basit metotlarla da bu inceleme yapılabilir.

Tablo 2. İki destek arasındaki maksimum açıklık

Nominal Boru Çapı (inches)	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20
Açıklık (ft)	7	9	10	11	12	13	14	16	17	19	22	23	25	27	28	30
Açıklık (m)	2.1	2.75	3.1	3.4	3.7	4	4.3	4.9	5.2	5.8	6.7	7.0	7.6	8.2	8.5	9.1

Tablo 3. İki destek arasındaki maksimum açıklık

DN	Dış Çap (mm)	Et Kalınlığı (mm)	Ağırlık (kg/m)			Maksimum açıklık (m)
			Boru	Su	Toplam	
15	21.3	2.0	0.962	0.1	1.062	2.5
20	26.9	2.3	1.41	0.31	1.71	2.5
25	33.7	2.6	2.01	0.58	2.51	3.0
32	42.4	2.6	2.57	1.0	3.57	3.0
40	48.3	2.6	2.95	1.3	4.25	3.5
50	60.3	2.9	4.14	2.2	6.34	4.0
65	76.1	2.9	5.28	3.6	8.88	4.5
80	88.9	3.2	6.81	4.8	11.61	5.5
100	114.3	3.6	9.9	8.5	18.4	6.0
125	139.7	4.0	13.5	12.6	26.1	6.5
150	168.3	4.5	18.1	19.0	37.1	7.0
200	219.1	5.9	31.0	33.4	64.4	8.5
250	273	6.3	41.6	52.6	94.2	9.5
300	323.9	7.1	55.6	74.4	130.0	10.0

Genellikle akışkan taşıyan yatay borularda akışı kolaylaştırmak için akış yönünde çok küçük eğimler verilir.

Bunun yanı sıra, boru hatlarında iki destek arasında maksimum açıklığı, yaklaşık olarak veren değişik bağıntılar da geliştirilmiştir. Bu bağıntılar D boru dış çapı olmak üzere [9];

$$L = (0.4 \sim 0.5) \times \sqrt{D} \quad (m) \quad (12)$$

veya Weber'e göre;

$$L = 0.032 \times D \quad (m) \quad (13)$$

- Destek yüklerinin hesaplanması:** Yüksek sıcaklık, yüksek basınç ve ısı genleşmelerin miktarı esnek desteklerin kullanılmasını gerektirir. Burada unutulmaması gereken şudur: Her bir parçanın, boruların, dirseklerin, valflerin, flanşların ağırlığının hesaba katılmasıdır. Bunun için bir tablo oluşturup sonra her destek noktası için kuvvet dengelerinden destek kuvvetleri bulunur. Her destek noktasının ayrı ayrı serbest cisim diyagramlarının çizilip, hesaplamaların bu şekilde yapılması büyük kolaylık sağlayacaktır.
- Uygun desteklerin seçimi:** Hesaplanan destek kuvvetlerine uygun biçimde, ısı genleşmeler sonucu oluşacak uzamaların yeni gerilmeler oluşturmalarına izin vermeyecek şekilde, ekonomik destek sistemi seçilir.
- Boru hattı üzerindeki diğer parçaların uzaklıklar hesaplanır:** (Örneğin elektrik kabloları, havalandırma kanalları arasındaki uzaklıklar hesaplanır.) Bu basamak sadece boru hattının modeli de yapılıyorsa hesaplanır. Eğer bir model kullanılıyorsa kontrol birinci basamaktan başlayarak otomatik olarak yapılır [2].

3 ISIL GENLEŞME ANALİZİ

3.1 KOMPANSATÖRLER

Fiziğin temel kurallarından biri maddelerin sıcaklık değişimlerinden dolayı genleşmesi ve büzülmesidir. Kompansatörler boru sistemlerinde oluşan genleşme, büzülme ve titreşimleri emerek en basitinden en karmaşığına dek her türlü endüstriyel sistemin kesintisiz ve verimli çalışmasını sağlayan elemanlardır [1,5,7,10].

Kompansatör esnek bir elemandır. Sıcaklık ve titreşime bağlı hareketler olduğunda, kompansatörün boğumlu (körüklü) kısmı bu hareketleri emmek için tasarlanmıştır. Boğum adedi emilecek uzunluk miktarına bağlı olarak değişir. Endüstriyel problemler çok değişik ve çeşitli olduğunda kompansatör tasarımının da belirli faktörleri olmalıdır. Boğumlu kısım bir yandan çevresel basınca dayanıklı, diğer yandan esneyebilir nitelikte olmalıdır. Bu arada basınç yükünün yaratacağı sorunlar kullanılan kompansatörün tipine göre değişik şekillerde çözülür [1,10].

İki noktayı bağlayan bir borunun bünyesinde birçok etkenden ötürü gerilmeler oluşur. Bu etkenler;

- Çalışma sıcaklığında iç ve dış basınç,
- Borunun kendi ağırlığı ve taşıdığı maddeler,
- Dış kısıtlamalardan ötürü boru parçasının yapmak zorunda olduğu hareket (Örneğin; dinamik bir sisteme bağlı olan boru, sistemle birlikte titreşmek zorundadır.),
- Isıl genleşme: Isıl genleşme faktöründeki gerilme öneminden ötürü ayrıca ele alınmalıdır. Bir borunun sabit olan iki ucu arasında oluşan ısıl genleşmeden doğan gerilme ile iki uçtan birinin hareketi ile oluşan gerilme eş önemde olabilir. Bu örnek iki etkenin paralellliğini vurgulamaktadır.

Son iki etkeni (c ve d) yeniden ele alırsak, hareketten ve ısıdan kaynaklanan genleşmeyi incelememiz gereklidir. Boru sistemlerinde meydana gelen gerilme;

- dış kısıtlamalar tarafından kendisine uygulanan kuvvete
- dış kısıtlamalar tarafından kendisine uygulanan harekete
- borunun kendi esnekliğine

bağlıdır.

Şayet gerilme değerleri ya da uygulanan kuvvet ve / veya moment mümkün olabilen en büyük değerleri aşıyorsa, borunun esnekliği suni olarak artırılmalıdır.

İstenen bu sonuç

- Ya boru tasarımının tamamen değiştirilmesi (Bu ısı, yer, basınç, yalıtım vs. gibi kayıplara yol açacaktır),
- Ya da büyük esnekliği olan parçaların sisteme yerleştirilmesi ile mümkündür (Bu esneklik sayesinde sistemdeki her türlü hareket emilecek ve gerilmeler önlenecektir).

İkinci çözüm yolu kompansatör işlevinin açık bir tanımdır [1].

3.1.1 Eksenel Tip Kompansatör:

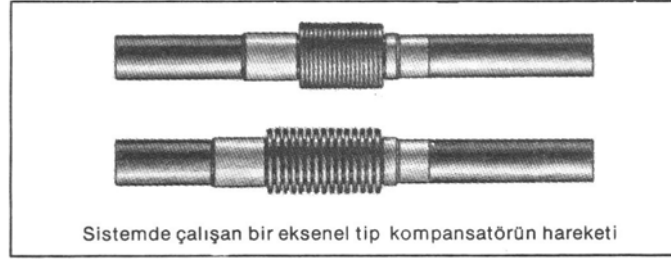
Hareketin eksenel olarak emilmesi ilk seçenektir. Akış yönünü değiştirmeyen eksenel tip kompansatör uygulaması ek montaj alanı gerektirmez (Şekil 5). Eksenel kompansatörlerle boru sisteminin ara bölümlere ayrılması, oluşan yatay kuvvet gerilmelerinden kurtarır. Sonuç olarak, serbestçe uzayıp giden bir boru sistemidir [1,10].

Bu çeşit bir emme hareketinin ön şartı, bir boru bölümünün her iki ucuna basınç zorlamasına dayanabilecek sertlikte kılavuzların yerleştirilmesidir. Bu tip kılavuzlama uygulaması

- Yüksek basınçlı borularda,
- Orta basınçlı ancak geniş kesitli borularda,
- Kendinden destekli boru hattı köprülerinde,

çok güçtür. Yukarıda söz edilen basınç yükleri, işletme basıncı ile etkili alanın çarpımı ile hesaplanır. Sistemdeki pompa kompresör vb. gibi hassas üniteler önüne de kompansatör yerleştirilmelidir.

Eksenel kompansatörlerin tanıtımını, onun yarar ve sakıncalarını anımsatarak sürdürmek gerekirse, ana hatları ile şöyle bir tablo oluşur.



Şekil 5. Eksenel tip kompensatör

Yararları:

- Hareketin emilme sorununun kolaylıkla anlaşılır çözümü,
- Akış yönünde herhangi bir değişikliğe neden olmaması,
- En küçük tesis sahası gerektirmesi,
- Gereken ölçüde eksenel emme gerçekleşirken en körük kıvrımları kullanıldığı takdirde küçük yanal ve açısız hareketlerin mümkün olması,
- Basınçların yüksek olmaması halinde hassas ünitelerin önünde gerilmelerden arınmış bir bağlantı elde etmek için ideal bir eleman olması.(Pompa, kompresör titreşimleri vs.),
- Bağlantı başına ucuz maliyeti.

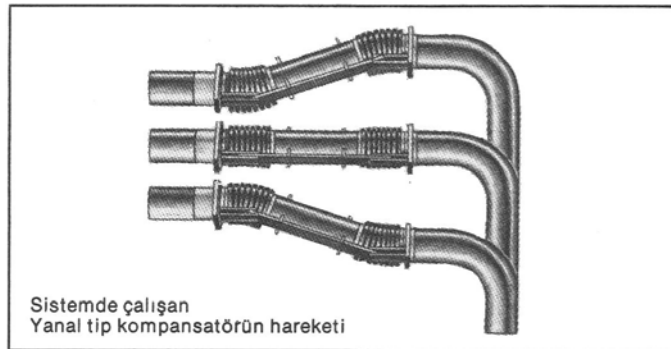
Sakıncaları:

- Teknik ve ekonomik bir sorun olabileceği taşıyan kuvvetli kılavuzların zorunluluğu.
- Düz ve uzun boru hatlarında ve büyük hareketlerde birçok kompensatörün kullanılması gerekliliği.
- Her ara bölümün ayrı ayrı dengelenmesi gerektiğinden, birçok dirseği kapsayan kısa bölümlerin çok sayıda kılavuz gerektirmesi, buna bağlı olarak toplam boyunun kısa olması nedeniyle kompensatörün yanal hareketi emerek üç boyutlu hareketin sınırlılığı.
- Hassas üniteler önüne yerleştirildiğinde yüksek basınçlarda veya geniş çaplarda gerilmelerden arınmış bir bağlantının garanti edilememesi [1].

3.1.2 Yanal Tip Kompensatör:

İki boyutlu boru sistemlerinde hareketin yanal olarak emilmesi ikinci seçenektir. Bir düzlemdeki iki boyutta meydana gelebilecek uzama, ikinci boyuta yerleştirilecek bir yanal kompensatör ile giderilebilir (Şekil 6). Yanal kompensatörün önemli bir özelliği de yanal hareketin yanı sıra eksenel hareketi de emebilmesidir [1,10].

Zorunlu yön değişimleri (dirsek dönüşleri) olan sistemlerde yanal tip kompensatör kullanımı bazen daha ekonomik dizaynlar getirebilir. Uzun boru bölümlerinde hareketin tek bir yanal kompensatörle emilmesi çok enderdir. Bu durumlarda bir sonraki bölümde açıklanan açısız kompensatörler kullanılır. Yanal ya da açısız tip kompensatör seçimi daha çok eldeki uygulama alanına bağlıdır. Bu seçim daha çok bir maliyet sorunu olduğundan kesin bir ayırmadan söz edilemez [1].



Şekil 6. Yanal tip kompensatör.

Yanal tip kompensatör kullanımındaki yarar ve sakıncalar aşağıda belirtilmiştir:

Yararları:

- Eksenel kompensatöre karşın daha az kılavuz gerektirir.
- Tek bir yanal kompensatör hareketin iki boyutta emilmesini sağlar, iki adet bu tip kompensatör kullanıldığında üç boyutlu hareketlerin de emilmesi mümkündür.
- Açısal kompensatörlere göre daha kolay anlaşılabilir çözümdür.
- Basınç zorlamasının yüksek olduğu hassas üniteler (Türbin, Pompa, kompensatör vs.) önünde titreşim giderici olarak kullanıldığında stresten arınmış bir bağlantı sağlar.

Sakıncaları:

- Boru tesisatında sadece dönüşlerin olduğu yerlerde kullanılabilir.
- Eksenel kompensatöre karşın daha çok tesis alanı gerektirir.
- Yanal olarak genişleyen, bu nedenle dikey olarak kısalan kompensatör boruyu küçük bir bükülmeye zorlayabilir. Bu nedenle uzun hatlarda bir sonraki bölümde sözü edilen açısal kompensatörler kullanılmalıdır [1].

3.1.3 Açısal Tip Kompensatör:

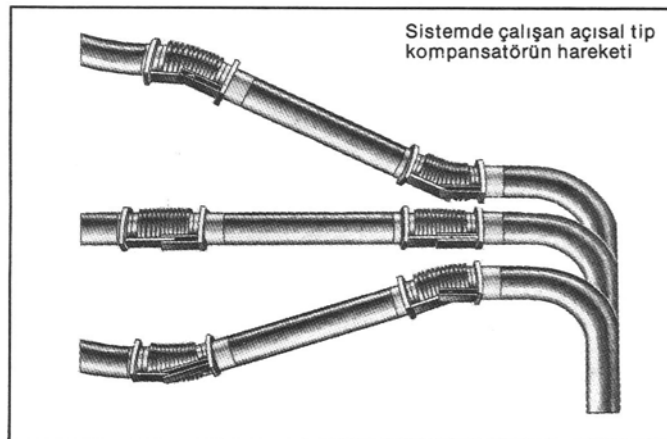
Açısal kompensatörler, yanal kompensatörler gibi genişlemenin emilmesi için yön değişimini gerektiren elemanlardır (Şekil 7). Açısal kompensatörler iki veya üç düzlemde oluşabilecek iki veya üç boyutlu hareketlerin emilebilmesi için en uygun seçenektir. Açısal kompensatörler de yanal kompensatörler gibi kılavuz ihtiyacını asgariye indirip, konumun elverdiği nispette, hangi boyutta olursa olsun, her türlü yanal genişlemeyi emebilme özelliğine sahiptirler. Yukarıda da söylendiği gibi aslen iki açısal kompensatörler bir yanal kompensatöre benzetilebilir,

Açısal kompensatörler

- İki yöne ve
- her yöne hareketli olmak üzere iki grupta toplanabilir [1].

Yararları:

- Hareketi emebilecek boru bölümü anormal ölçüde uzun olmadığı takdirde kılavuzlar önemli değildir.
- Hangi boyda olursa olsun her hareketin ve genişlemenin emilmesi mümkündür.
- Sistemin doğru düzenlenmesi hem hareketlerin hem de genişlemenin üç boyutta ve üç düzlemde emilmesi şekli garantidir. Bu nedenle karışık boru tesisatı projelerinde özellikle önemlidir.



Şekil 7. Açısal tip kompensatör.

Sakıncaları:

- Eksenel kompensatörlere göre daha fazla tesis alanı gerektirir.
- Boru hattında dönüşler gereklidir

3.1.4 Kompensatör Uygulamaları:

Kompensatörlerin kullanım alanları çok geniştir. Bu nedenle hemen hemen her tür endüstride uygulamaları yapılır. Bugünün teknolojisinde, özellikle geniş nominal çaplı boru sistemlerinde çeşitli şekilleri ve özel tasarımları ile her türlü gereksinimlere cevap verebilecek olan kompensatörler tek yeterli esnek elemandırlar. Mevcut kompensatör tiplerinin her biri, ilgili kullanım alanına göre, kendi yararına sahiptir [1].

Üretici, her çapta, her basınç ve sıcaklık için gerekli bütün kompensatörleri üretmektedir [1,7,10]. Söz konusu hareketler şu şekilde kısaca özetlenebilir:

- Eksenel Hareketler
- Yanal Hareketler
- Açısal Hareketler
- Bununla bağlı bileşik hareketler
- Sistem dinamiğinin oluşturduğu titreşimler

Doğru seçimi yapılmış ve uzmanı tarafından monte edilmiş olmak koşuluyla kompensatörler aşağıdaki özellikleri taşıyan bağlantılardır [1].

- Basınca ve vakuma dayanıklı,
- Sıcaklığa dirençli,
- Pas tutmaz,
- Bakım gerektirmeyen ,
- Uzun süre hizmet veren,
- Hizmette güvenilir,
- Ekonomik.

3.2 DENGELİYİCİLER

Isıl genleşmelerin yol açtığı gerilmelerin alınmasında kullanılan bir başka yöntemde gerilmeleri belli değerlere kadar taşıyabilen dengeleyiciler kullanılmaktadır. Bunlar en çok kullanılanları U, omega ve Lyra dengeleyicileridir. Şayet ısı gerilmeler uygun dengeleyicilerle alınabiliyorsa; mümkün mertebe 4 ila 5 DN 'lik yarıçaplı 90° lik dirseklerin kullanılması gereklidir. Burada kısa olan kolların büyük yük altında kaldığı unutulmamalıdır. Aşağıda basit tipteki iki dengeleyici için kuvvetlerin ve gerilmelerin hesabı verilmiştir [6].

3.2.1 Normal U-Yaylı Dengeleyicisi

Dengeleme cihazlarının bu cinsi, en fazla bilinenidir (Şekil 8). Hesap için şu kabuller yapılır:

- a) Bütün R yarı çapları birbirine eşittir.
- b) Her iki yayın alt mesafesi $b=2.5.R$ 'dir
- c) Borunun ilk yatağının, dengeleme aletinin simetri ekseninden olan mesafenin yaklaşık 10R lacak tarzda montajı yapılmalıdır.



Sekil 8. Normal U dengeleyicisi

En yüksek noktadaki en büyük eğilme gerilmesi;

$$\sigma = \frac{E \times D \times \Delta H (100 - V)}{10^6 \times A^2 \times C_0 \times 100} \quad (\text{kg/mm}^2) \quad (14)$$

Reaksiyon kuvveti için;

$$H = \frac{E \times J}{10^6} \times \frac{\Delta H}{A^2 \times C_2} \times \frac{100 - V}{100} \quad (\text{kg}) \quad (15)$$

$$J = -\frac{\pi}{64} (D^4 - d^4) \quad (\text{cm}^4) \quad (16)$$

E	:	Boru malzemesi elastisite modülü	(kg/mm ²)
J	:	Boru taşıma momenti	(cm ⁴)
ΔH	:	Toplam ısı uzama	(cm)
A	:	U – yayının boşalttığı uzunluk	(m)
D	:	Boru dış çapı	(cm)
R	:	Eğilme yarıçapı	(cm)
V	:	Ön gerilme	(%)
C ₀ ve C ₂	:	Karışık formüllerle hesaplanan katsayılar.	

Bu konuyla ilgili daha geniş bilgi literatürde mevcuttur [6].

3.2.2 Lyra Dengeleyicisi

Dengeleyicilerin U- dirseğine benzeyen bir cinside lyra dengeleyicisidir. Şekil 9 'da Lyra dirseği bükülü kısımlarının daha büyük olan uzunluğu sebebiyle U-dirseğine göre biraz daha elastiktir. Bundan dolayı çok uzun borular için kullanılırlar. Lyra dengleyicisinin alış kabiliyeti aynı ölçülerdeki U-dirseğine göre daha iyidir. Fark küçük boşaltmalarda % 5, büyüklerde % 10, kullanışlı ölçülerde yaklaşık olarak % 7 kadardır. Lyra dengeleyicisinin büyük olan alış kabiliyeti dolayısıyla daha büyük kuvvetler verir. Köşe dirsekleri katlı borulardan yapılan cinsleri mevcuttur. Bunlarda reaksiyon kuvvetlerinin azaltılması için kullanılır. Literatürde ölçüleri en uygun, ön gerilme ve ait olan reaksiyon kuvvetleri ile beraber toplam genişleme miktarları mevcuttur [6].

Tablo 4. Çeşitli uzunluktaki boruların 21°C - 232°C arasındaki uzama miktarları

Uzunluk L (m)	30	46	61	76	91
Uzama miktarı Δx (mm)	84	126	169	211	253

Tablo 5. Genişliği derinliğine eşit omega değeri

Boru Çapı DN	L (m)									
	30		46		61		76		91	
	W (mm)	a (mm)	W (mm)	a (mm)	W (mm)	a (mm)	W (mm)	a (mm)	W (mm)	A (mm)
20	1016	966	1296	1244	1474	1423	1626	1575	2084	1779
25	1169	1092	1447	1372	1626	1550	1096	1830	2058	1981
32	1296	1194	1600	1497	1830	1728	2084	1984	2236	2135
40	1525	1397	1881	1548	2185	2058	2544	2413	2021	2693
50	1728	1575	2135	1981	2490	2210	2846	2693	3126	2973
65	1906	1702	2210	2135	2745	2541	3126	2922	3507	3304
80	2185	1956	2745	2516	3202	2973	366	3430	4041	3812
100	2516	2210	3125	2845	3736	3430	4524	4219	4727	4421
125	2795	2413	3557	3150	4193	3812	7803	4421	5337	4956
150	2973	2541	3836	3380	4515	4117	5235	4778	5845	5388
200	3304	2693	4320	3710	5185	4575	5997	5388	6633	6022
250	3507	2745	4651	3888	5642	4880	6505	5743	7269	6506
300	3609	2693	4880	3965	5947	5032	8082	5947	7701	6706

3.3 DOĞAL KOMPANZASYON

3.3.1 Pratik Analiz Yöntemi

Boru hatlarında ısıl genleşme hesaplarının daha kolay ve hızlı yapılabilmesi için değişik kriterler aranmıştır. Bu kriterler sistemlerin ilk incelenmesinde karar vermeyi kolaylaştırıcı görev üstlenirler. Bu kriterlerin göz önüne alınmasıyla, sistemin yeterli esnekliğe sahip olup olmadığı basit formüllerle kısa zamanda hesaplanabilir. Sistemin yeterli esnekliğe sahip olması durumunda tesis güvenli çalışabilir. Sistemin kritik olması durumunda daha değişik hesaplama yöntemlerine başvurularak kesin çözüm elde edilir. Bu kriterler her zaman güvenilir değildir. Farklı durumlarda yanlış sonuçlar verebileceği göz ardı edilmemelidir [3].

Bu bölümde incelenen kriter 1955 yılında M.W. Kellogg Company tarafından sunulmuştur. Bu kriter gereği aşağıdaki formülün 0.3'ten küçük veya eşit olması durumunda boru hattı oluşabilecek hasarları kendi içinde doğal bir şekilde önleyecek tarzda esnek sayılabilir.

$$D * Y / (L-U)^2 \leq 0.3 \quad \text{İngiliz Birim Sisteminde} \quad (\text{inch})(\text{inch})/(\text{ft}) \quad (17)$$

$$D * Y / (L-U)^2 \leq 208.3 \quad \text{SI Birim Sisteminde} \quad (\text{mm})(\text{mm})/(\text{m}) \quad (18)$$

Burada kullanılan sembollerin anlamları şöyledir:

L	:	Boru merkez çizgisinin toplam uzunluğu
U	:	İki sabit nokta arasındaki dik uzaklık
D	:	Nominal boru çapı
Y	:	Genleşme ve termal hareketlerin bileşkesi
e	:	Isıl uzama

$$U = \sqrt{(L_x^2 + L_y^2 + L_z^2)} \quad (19)$$

$$Y = U * e \quad (20)$$

Bu kriter sadece sistemin esnek olup olmadığı hakkında bize bilgi sağlar. Reaksiyon kuvvetlerinin hesabının gerektiği durumlarda değişik metotlar kullanılır.

Örnek 4:

Şekil 11' deki sistemi inceleyecek olursak;

Verilen özellikler; $D = 150$ $T=200^\circ$, Malzeme St35.8 , $e=2.5\text{mm/m}$

$$L_x = 18 \text{ m}, \quad L_y = 12 \text{ m}, \quad L_z = 10 \text{ m}$$

$$L = L_x + L_y + L_z = 40 \text{ m}$$

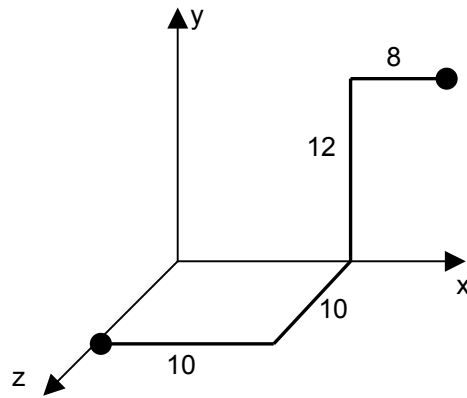
$$U = \sqrt{(L_x^2 + L_y^2 + L_z^2)} = 23.83 \text{ m}$$

$$Y = U * e = 59.58 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$D * Y / (L-U)^2 \leq 208.3$$

$$150 * 59.58 / (40 - 23.83)^2 = 34.17 \leq 208.3$$

...Sistem yeterli esnekliğe sahiptir!...



Şekil 11. Örnek 4'teki hattın izometrik görünüşü

Bu kriterin yanı sıra U/D ve Y/U oranları bir diyagram haline getirilmiştir. Burada şu işlem sırası izlenir:

- U/D Hesaplanır.
- Şekil 12'den U/D ve sıcaklık değerlerinin bilinmesi ile R değeri elde edilir.
- $R < L / U$ ise sistem yeterli esnekliğe sahiptir [12].

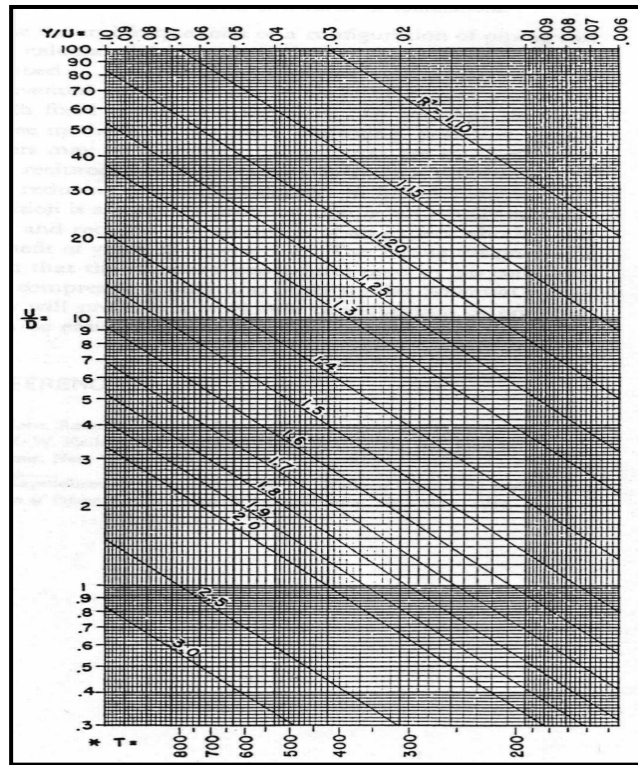
Örnek 5:

Tablo 6. Değişik ölçülerdeki borular için pratik analiz

	1	2	3	4
Malzeme	ASTM A106,Gr A	ASTM A106,Gr A	ASTM A106,Gr A	ASTM A106,Gr A
İşletme. Sıc	320°C	400°C	480°C	100°C
Montaj Sıc.	20°C	20°C	20°C	20°C
Sevis Tipi	Yağ Pompalama	Yağ Pompalama	Yağ Pompalama	Yağ Pompalama
Nominal Çap	DN 50	DN 100	DN 20	DN 50

HESAPLAR

L (m)	100	115	115	115
U (m)	56.6	58.5	58.5	58.5
U/D	1.132	0.585	2.92	1.17
L/U	1.77	1.97	1.97	1.97
R	1.95	3.0	1.85	1.55
Sonuç	Güvenli	Kritik	Güvenli	Güvenli



Sıcaklık °F

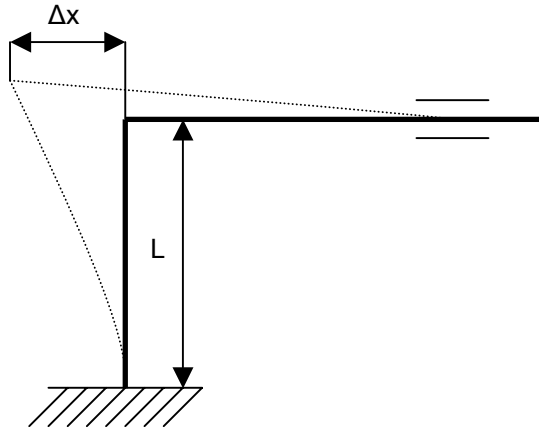
Şekil 12. ASA Doğal kompanzasyon hesaplama diyagramı

Tablo 6'dan da görüldüğü gibi değişik koşullarda çalışan boru sistemleri için, karar vermek; basit işlemler ve Şekil 11 'de verilen diyagramla çok basit bir hal almaktadır.

1,3,4'üncü sütundaki sistemler yeterli esnekliğe sahip çıkmıştır ve bu sistemler için diğer yöntemleri uygulamaya gerek yoktur. 2. Sütundaki sistem ise kritiktir. Gerçek sonuçlar karışık ve uzun işlemlerle bulunarak sistemin gerçekten yeterli esnekliğe sahip olup olmadığı belirlenebilir [12].

3.3.2 Grafik Analiz Yöntemi

Boru hatlarında ısı genleşmelerin doğal kompanzasyon ile alınması, literatürde belirtilen değişik diyagramlar yardımıyla hesaplanabilir. Bu çerçevede Şekil 13'de gösterilen boru hattının analizi, Şekil.14 verilen diyagram yardımıyla kolay bir şekilde yapılır.. Bu diyagramda borunun nominal çapının ve ısı genleşme katsayısının bilinmesi ile doğal kompanzasyonu sağlayan L uzunluğu belirlenir [6].



Şekil 13. Grafik analiz gerekliliği için L uzunluğu

Bu diyagramda ön gerilmeler ihmal edilmiştir. Ön gerilme durumlarında L uzunluğunun azaltılarak doğal kompanzasyon sağlanmış olur. Örneğin % 50 ön gerilme durumunda L değerinin % 30 ' u alınarak kompanzasyon sağlanır [7].

Örnek 6:

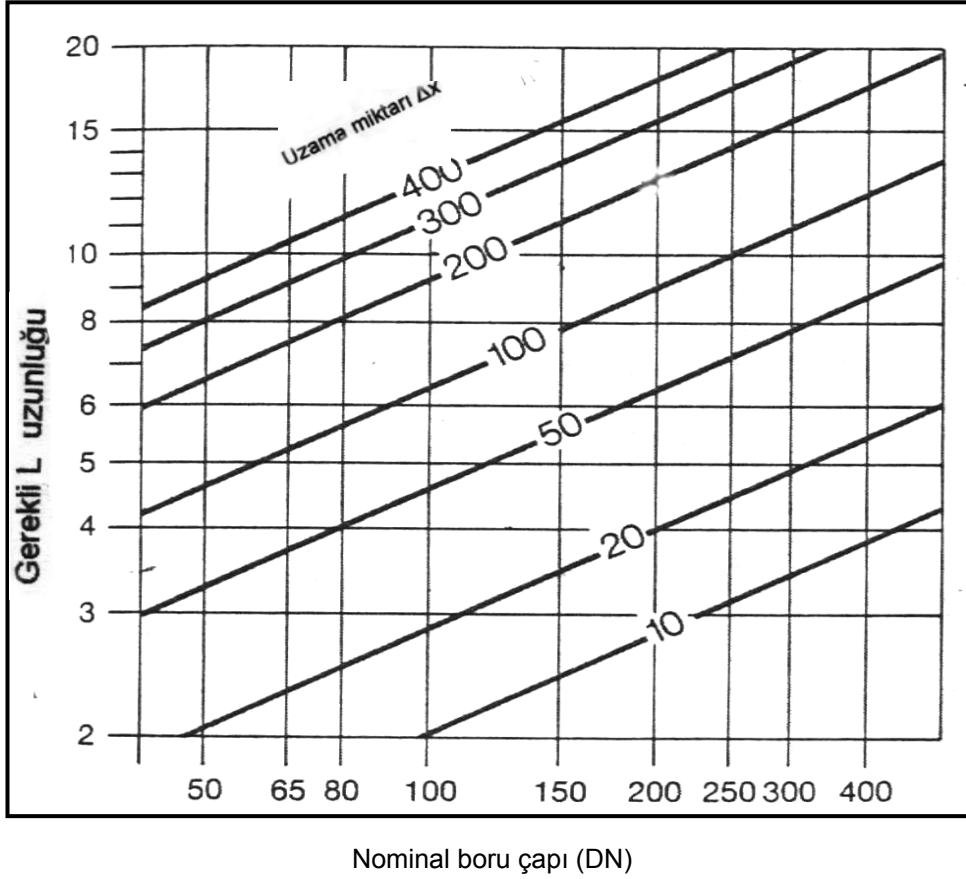
Boru nominal çapı DN = 150
Sistemdeki uzama $\Delta x=100$ mm

olan bir boru sistemi için gerekli olan L uzunluğu, 8 m olarak diyagramdan bulunabilir.

Bu örnekte eğer ön gerilme söz konusu olsaydı:

$$L = L + 0.3L = 8 + 0.3 \cdot 8 = 5.6 \text{ m}$$

elde edilirdi.



Şekil 14. Isıl genleşmelerin doğal kompanzasyonla alınması [7].
(Bu diyagram 300°C , $\sigma_{emn}=80\text{ N/mm}^2$, ön gerilmemiş St 37 için geçerlidir.)

3.3.3 Parçalara Ayırma Yöntemi

Borularda ısıl genleşme analizinin gerçekte uzun ve karışık işlemlere sahip olduğu daha önce de belirtilmişti. Bu yöntemin seçilmesi halinde vakit kaybı ve yanlış yapma olasılığı göz ardı edilmemelidir. Fakat bu yöntemi kullanmak istemeyenlerin başvurabileceği kolay ve hızlı bir yaklaşık çözüm sağlayan bir metod vardır [14].

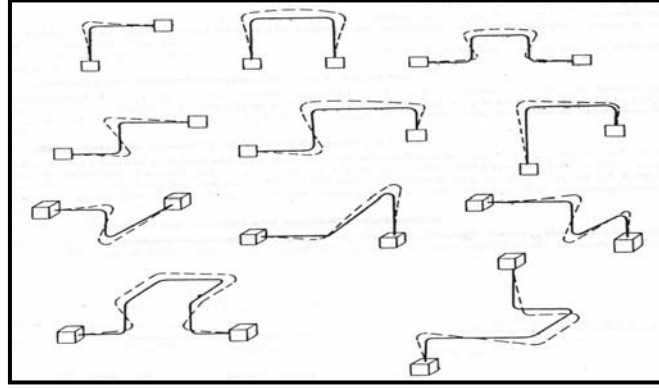
Bu yöntemde en çok kullanılan parçalar L, Z, U şeklindeki borulardır (Şekil 15). Bunlar standartlaştırılmış ve değişik boyut ve malzemeler için tablolar oluşturulmuştur. Analizin kolaylaştırılması için de basit ve kullanışlı bir form oluşturulmuştur [14].

Gerçekte basit birkaç boru şekli için oluşturulan bu tablolar sayesinde uzun ve karmaşık sistemler de yaklaşık olarak çözülebilmektedir. Karmaşık sistemleri incelerken benzer şekle sahip bölümler hayali ya da gerçek destek noktalarıyla parçalanır. Böylece tablolarda bulunan benzer şekillere benzetilmiş olur. Her bir bölüm ayrı bir sistem gibi incelenir ve hesaplanan yeterli esnekliğe sahip olduğunu gösterir. Her bir bölümün emniyetli çıkması halinde "*sistem güvenlidir*" denebilir [12].

Yukarıdaki değerler hesaplandıktan sonra şu işlem sırasında form doldurularak kolay ve hızlı bir şekilde boru hattının analizi yapılmış olur [14].

- Formda uygun şekle sahip sütun seçilir.
- Sistemin verilen değerleri tablodaki yerlerine yazılır.
- Verilen ölçüler için dirsek faktörü seçilir.

- Şekil faktörü hesaplanır.
 - Efektif çap uzunluğu hesaplanır.
 - İzin verilen en büyük gerilme değeri bulunur.
 - Gerçek genleşme değeri hesaplanır.
- d) Gerçek değer ile izin verilen en büyük gerilme değeri karşılaştırılır.



Şekil 15. Değişik Boru Parçalarının Genleşmeleri

Nominal Boru Çapı		
Tablo	Etkin Boru Çapı	$D_r =$
	Etkin Dirsek Uzunluğu	$L_r =$
Kısa Parça Uzunluğu		$H =$
Uzun Parça Uzunluğu		$w =$
Tablo	h/H oran	$h/H = O$
	H/w Eğrisi	$H/w =$
	Şekil Faktörü Bulunur	$f_s =$
		(n = 1)
Kare Kose Uzun.		$H + w = L_s =$
Etkin Dirsek Uzunluğu Top :		$L_r =$
Toplam Etkin Uzun		$L_s + L_r = L =$
Etkin Çap Uzunluğu		$\frac{L}{D_r} = f_l =$
Boru Malzemesi		
Servis Tipi		
İsletme sıcaklığı		$T_h =$
Montaj sıcaklığı		$T_c =$
Tablo	Emniyet Gerilmesi	$S_A =$
	Genleşme Faktörü	$f_{eh} =$
	Genleşme Faktörü	$f_{ec} =$
Top Genleşme Fak. $f_{eh} - f_{ec}$		$f_e =$
Hesaplanan Gerilme $\frac{f_e f_s}{f_l}$		$S_E =$

Şekil 16. Parçalara ayırma yöntemi formu (L Şeklindeki boru için)

3.3.4 Gerçek Analiz Yöntemi

Literatürde boru hatlarında ısı genleşme gerilmelerinin bilgisayar desteği olmadan tam ve kesin çözümünü veren birçok yöntem vardır. Bu sistemlerle iki sabit nokta arasındaki boru sistemi tam ve kesin olarak incelenebilir. Bu tür analiz yöntemlerinde işlem kalabalığını ortadan kaldırmak ve hesaplamaları düzenlemek için çeşitli tablolar oluşturulmuştur [3].

Bunların içinde en çok bilinenlerden biri ünlü boru tasarımcısı S. W. Spielvogel' in iki boyutlu sistemlerde elastik merkeze dayalı Spielvogel teoremidir. Bu yöntemde reaksiyon kuvvetlerinin etkidiği, tam olarak bulunabilen bir nokta vardır. Bu noktada reaksiyon momentleri sıfırdır. Eğer reaksiyon kuvvetlerinin yönü belirlenebilirse; yani bu yönde olan ve elastik merkezden geçen ve nötr eksen olarak adlandırılan, eğilme momentlerinin sıfır olduğu noktalar bulunmuş olur. Reaksiyon kuvvetlerinin değerleri hesaplanabilirse, herhangi bir noktaya göre eğilme momentleri, reaksiyon kuvvet değerinin, o noktadan nötr eksene olan uzaklık ile çarpılması ile bulunur. Yani problem sadece reaksiyon kuvvetlerinin şiddetini ve yönünü bulmaya dönüşür [3].

Geniş kullanım alanı bulan bu yöntem daha sonraları geliştirilerek Mitchel C.T. tarafından tekrar sunulmuştur. Mitchel'in sunduğu yöntemde nötr eksenin iki sabit noktayı birleştiren çizgiye paralel olduğu öngörülmüştür. Gerçekte bu simetrik parçalar için doğrudur. Fakat simetrik olmayan parçalarda tam sonuç elde etmek bu yöntemle mümkün değildir [3].

Mitchel'in yönteminin 2 boyutlu sistemler için olması ve simetrik olmayan boru sistemlerinde tam sonuç verememesi, yeni yöntemler geliştirilmesine yol açmıştır.

3 boyutlu sistemlerde tek bir elastik merkez noktası tayin etmek çok zor ve zahmetlidir. Spielvogel bu nedenden dolayı 3 değişik elastik merkezle çalışmayı uygun bulmuş ve 3 yüzeyin kesişiminden oluşan boru sistemleri için her yüzeye ait bir elastik merkez hesaplaması yoluna gitmiştir.

Hao Hsiao bu fikri daha başka kesin çözümlerle geliştirmiş ve basit işlemlerden oluşan bir yöntem geliştirmiştir. Hao Hsiao yöntemi en iyi , en gerçekçi ve hesaplaması en kolay yöntem olarak kabul edilir. Aşağıda bu yöntem incelenecektir. İşlemlerin ve tabloların nasıl oluşturulduğu anlatılmayacaktır. Buna gerek de yoktur. Aşağıdaki işlem sırasına göre Tablo 7 ve Tablo 8 doldurularak hesaplama çok kolay bir şekilde tamamlanabilir [3,13].

İşlem sırası :

1-Boru sisteminin 3 boyutlu bir şekli çizilir.

- Koordinat eksenleri çizilir.
- Her borunun ve dirseğin başlangıç,bitiş noktaları işaretlenir.
- Bu noktalara harf veya rakam verilir.
- Her noktanın koordinatları hesaplanır.

2-Boru çapı ve boru et kalınlığı seçilir.

- Seçilen boru çapı ve et kalınlığına göre;
- Borunun atalet momenti:

$$I = \frac{\pi}{64} \times [D^4 - (D- 2t)^4] \quad (21)$$

- Borunun kutupsal atalet momenti:

$$S^* = \frac{\pi}{32D} \times [D^4 - (D- 2t)^4] \quad (22)$$

- Termal uzama miktarı "e" Şekil 1'den seçilir.
- Borunun bağlantı noktalarının koordinat farklarını "e" ile çarpıp uzama miktarları bulunur.

3-İşletme sıcaklıkları tespit edilir. Ve bu sıcaklıklardaki elastisite modülleri bulunur.

- T_c Montaj sıcaklığı
- T_h İşletme sıcaklığı
- E_c T_c 'deki Elastisite modülü
- E_h T_h 'deki Elastisite modülü
- S_c Montaj sıcaklığındaki emniyetli boyuna eğilme gerilmesi
- S_h İşletme sıcaklığındaki emniyetli boyuna eğilme gerilmesi

4-Gerilme redüksiyon faktörü "f" bulunur.

- Emniyet gerilmesi hesaplanır.

$$S_A = f (1.25 S_c + 0.25 S_h) \quad (23)$$

5-Dirsek yarıçapı "R", Boru nominal yarıçapı "r" belirlenir.

- Dirsek karakteristiği:

$$h = \frac{R.t}{r^2} \quad (24)$$

- Dirsek esneklik faktörü:

$$n = \frac{1.65}{h} \quad (25)$$

- λ katsayısı:

$$\lambda = 5 \pi R \frac{n-1.3}{6} \quad (26)$$

- τ katsayısı:

$$\tau = \pi R \frac{n+1.3}{4} \quad (27)$$

6-Dirseklerin geometrik merkezleri hesaplanır

- Centroit:

$$c = \frac{2R}{\pi} \quad (28)$$

7-Borular ve Dirsekler buldukları yüzeylere göre ayrılır.

8-Her yüzeyde ;(Tablo 7)

- Boru merkezi koordinatları "L" ile çarpılır. $L, L_x, L_y, L_z, L_x^2, L_y^2, L_z^2 \dots$ hesaplanır.
- Dirsek merkezi koordinatları "L" ile çarpılır. $L=1$ alınır, $L_x, L_y, L_z, L_x^2, L_y^2, L_z^2 \dots$ hesaplanır.

9-Her yüzeydeki boruların toplamı bulunur ;(Tablo 7)

- (1), (8), (15) nolu satırlar hesaplanmış olur.

10-Her yüzeydeki dirseklerin toplamı bulunur ;(Tablo 7)

- (2), (9), (16) nolu satırlar hesaplanmış olur.

11-Her yüzeydeki dirseklerin toplamı λ ile çarpılır.

- (3), (10), (17) nolu satırlar hesaplanmış olur.

Tablo 7. Gerçek hesap formu 1

		L3	L	LX	LX2	LY	LY2	LZ	LZ2	LXY	LXZ	LYZ	X	Y	Z
X Y	B														
	O														
	R														
	U														
	1	TOPLAM													
	D														
	I														
	R														
	S														
	E														
	K														
	2	TOPLAM													
	3	Lambda * 2													
	4	1+3+25													
5	4 / TL														
6	5 * TLX,Y,Z														
7	4-6														
		L3	L	LX	LX2	LY	LY2	LZ	LZ2	LXY	LXZ	LYZ	X	Y	Z
X Z	B														
	O														
	R														
	U														
	8	TOPLAM													
	D														
	I														
	R														
	S														
	E														
	K														
	9	TOPLAM													
	10	Lambda * 2													
	11	8+10+25													
12	11/TL														
13	12* TLX,Y,Z														
14	11-12														
		L3	L	LX	LX2	LY	LY2	LZ	LZ2	LXY	LXZ	LYZ	X	Y	Z
Y Z	B														
	O														
	R														
	U														
	15	TOPLAM													
	D														
	I														
	R														
	S														
	E														
	K														
	16	TOPLAM													
	17	Lambda * 2													
	18	15+17+25													
19	18/TL														
20	19*TLX,Y,Z														
21	18-20														
22	2+9+16														
23	To* 22														
24	1+8+15+23														
25	(3,333) * 24														
		A	B	C											
R	1														
E	2	D	E	F	KATSAYILAR										
A	3	G	H	K	A= -ly / lx = D= ly / lxy = G= -lyz / lxz =										
K	4	1+2	L		B= -lxz / lx = E= -lyz / lxy = H= lz / lxz =										
S	5	1-3	M		C= X* Ec* I / lx(518,4) X=DeltaX										
I	6	5+8	N	P	F = Y* Ec* I / ly(518,4)										
Y	7	4_6	Q	R	K = Z* Ec* I / lz(518,4)										
O	8	L+M													
N		Y=R+Q													
K.		Z=(P+NY)+L													
		X=C-AY-BZ													

DATA LİSTESİ
D=
t=
l=
S*=
T=
e=
Eh=
Ec=
X=
Y=
Z=

FAKTÖRLER
h=
n=
R=
Lambda=
To=
li=
lo=

ATALET MOMENTLERİ
1-lx_US=
2-ly_US=
3-lz_US=
4-lx_USUS=
5-ly_USUS=
6-lz_USUS=
7-11/3,6=
8-12/3,6=
9-13/3,6=
lx=1+4+7+8=
ly=2+5+7+9=
lz=3+6+8+9=

KATSAYILAR
A= -ly / lx = D= ly / lxy = G= -lyz / lxz =
B= -lxz / lx = E= -lyz / lxy = H= lz / lxz =
C= X* Ec* I / lx(518,4) X=DeltaX
F = Y* Ec* I / ly(518,4)
K = Z* Ec* I / lz(518,4)

12- Tüm yüzeylerin ;

- Tüm borular toplamı (24).
- Tüm dirsekler toplamı (22).
- toplamları çarpı τ (23).
- Hepsinin toplamı çarpı 3.333 (25).

13- Her yüzeyde ;

- (4), (11), (18) hesaplanır.

14- Her yüzeyin ortalaması bulunur

- (5) ortx ve orty.
- (12) ortx ve ortz.
- (19) orty ve ortz

15- Her yüzeyde;

- ortx * $T_{Lx} \dots vb$
- (13) ortz * $T_{Lz} \dots vb$
- (20) orty * $T_{Ly} \dots vb$ hesaplanır.

16- (7), (14), (21) hesaplanır. $I_x, I_y, I_z, I_x'', I_y'', I_z'', I_{xy}, I_{xz}, I_{zy}$ hesaplanmış olur.

17- Atalet momentleri hesaplanır. I_x, I_y, I_z

18- Katsayılar hesaplanır (A,B.....K,L,M,N.....Q)

- Böylece BX, BY, BZ hesaplanmış olur.

19- Tablo 8 doldurulur.

- Her noktanın koordinatları yazılır.
- Her noktadan ortalama yüzey değerleri çıkartılır
- Bulunan değerler BX, BY, BZ ile çarpılır.
- M_x, M_y, M_z bulunur.

20- Her noktanın intensifikasyon katsayıları belirlenir

- intensifikasyon katsayıları

$$I_i = \frac{0.9}{h^3} \quad (29)$$

- intensifikasyon katsayıları

$$I_o = \frac{0.75}{h^3} \quad (30)$$

- Burulma durumlarında $i=1$
- Uç konumlarda $i= 1.3$

4. BİLGİSAYAR DESTEKLİ TASARIM

Bilgisayar her türlü özelliği ile günlük yaşamımıza girmiş ve vazgeçilmez ihtiyaçlarımızdan biri olmuştur. Bilgi depolama, hızlı işlem yapma, hatasız çalışma vb. özellikleri her alanda ona çok önemli görevler yüklenmesini sağlamıştır. Uzun ve karmaşık hesaplar daha önceleri yaklaşık çözümler veya kabullerle çözümlenirken günümüzde tam ve kesin sonuçlar elde edilebilmektedir.

Uzun hesap teorisindeki işlemlerin uzun olması ve her nokta için tekrar etmesi hesaplayan kişinin hem vaktini almasına hem de yanlışlar yapmasına olanak sağlar. Bu bölümde, uzun hesap teorisinde anlatılan işlemlerin bilgisayar vasıtasıyla çok kolay ve kısa zamanda tam doğru yapılmasını sağlayan bilgisayar programı anlatılmaktadır.

Bilgisayar dili olarak C++ kullanılmıştır. Program interaktif olarak çalışmakta ve kullanıcıya değişik durumlar için hesap yapma kolaylığı sağlamaktadır. Programda girilen verilere göre SI veya İngiliz birim sistemi kullanılabilir. Programın başındaki sabitler değiştirilerek girilebilecek nokta, boru ve dirsek sayıları arttırılabilir.

Kullanıcıya ilk olarak borunun karakteristik özellikleri sorulmaktadır. Bu sorulara mevcut sistemin boru çapı, boru et kalınlığı, dirsek yarıçapı, boru nominal yarıçapı, elastisite modülü, ısı uzama katsayısı gibi özellikleri girildikten sonra her noktanın 3 boyutlu uzaydaki koordinatları bir text dosyası halinde girilir. Her noktanın koordinatları alt alta x, y, z sıralamasına göre yazılır. Dikkat edilecek bir husus ta dirsek geometrik merkezlerin bir text dosyası halinde girilmesidir. Düz boruların geometrik merkezleri programca hesaplanmaktadır. Dirseklerin geometrik merkezleri dirseğin gidiş yönü, konveks veya konkav olma durumlarına göre değiştiğinden ayrıca hesaplanarak bir text dosyası halinde girilmesi daha sağlıklı olacaktır. Yine her dirseğin centroidleri koordinat dosyasında olduğu gibi alt alta x, y, z, sıralamasıyla yapılacaktır. Dikkat edilecek bir ikinci hususta intensifikasyon katsayılarının da yine bir text dosyası halinde girilmesidir, çünkü intensifikasyon katsayıları da boru parçasının bulunduğu düzleme ve borunun gidiş yönüne bağlıdır. Intensifikasyon.txt dosyasının hazırlanışı da diğer text dosyalarının hazırlanışı ile aynıdır.

Bu girdiler hazırlandıktan sonra program çalıştırılır. Sonuç olarak her noktanın toplam gerilme değerleri emniyetli akma gerilmesi ile karşılaştırmalı bir şekilde ekrana çıktı olarak verilmektedir. Ayrıca kritik noktalar, emniyet gerilmesini aşan noktalar da kullanıcıya bildirilmekte ve hesap tamamlanmaktadır.

Program basit bir çerçevede hazırlanmıştır. Geliştirilmesi ve eklenmesi gereken daha bir çok yönü vardır. Bu program, kullanıcıya uzun ve karışık tablolarla ve işlemlerle uğraşmak yerine sadece yukarıda açıklanan girdileri girerek hesap yapma kolaylığı sağlamaktadır.

Programda kullanılan kısaltmaların anlamları ; (Kullanılış sırasına göre)

x, y, z	Noktanın uzaydaki koordinatları
i_x, i_y, i_z	İntensifikasyon faktörleri
M_x, M_y, M_z	Noktanın momentleri
S_E	Boyuna büküm gerilmesi
$T_{gerilme}$	Toplam gerilmeler
L_3, L, L_x	Tablo 7'deki hesaplanacak değerler
T_{L3}, T_L, T_{Lx}	Yukarıdaki değerlerim toplamları
D	Gerçek boru çapı
t	Boru et kalınlığı
R	Boru nominal yarıçapı
R	Dirsek yarıçapı
e	Termal uzama
E_c	Montaj sıcaklığında elastisite modülü
P	İşletme basıncı
h	Dirsek karakteristiği
n	Dirsek fleksibilite faktörü
To	katsayı τ

Lambda	katsayı λ
SA	İzin verilen maksimum büküm gerilmesi
SigmaP	Boyuna basınç gerilmesi
Syıldız	Borunun kutupsal atalet momenti
I	Borunun kesit atalet momenti
ortx, orty, ortz	Yüzeylerin ortalama değerleri

4.1 PROGRAMIN ALGORİTMASI

- 1) Veri girişleri
 - a) Sabitler (Boru çapı, Boru et kalınlılığı vb.)
 - b) Koordinatlar (Her noktanın 3 boyutlu uzaydaki koordinatları)

- 2) Girilen iki noktanın boru dirsek kontrolü

- 3) Yüzezlere ayırma;
 - a) Boruların yüzeylere bölüştürülmesi
 - b) Dirseklerin yüzeylere bölüştürülmesi

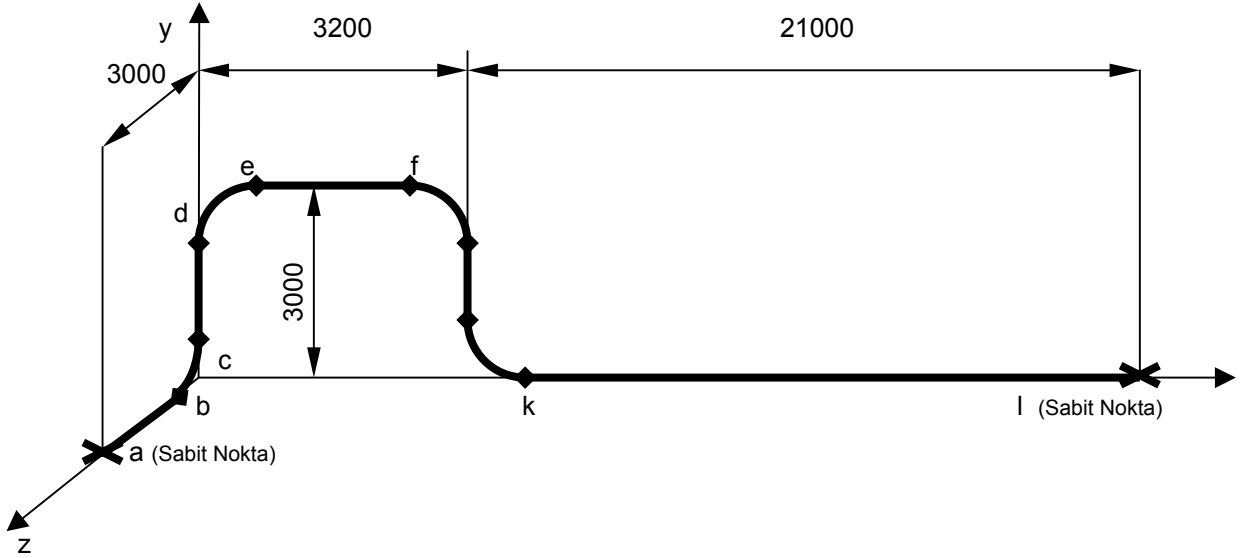
- 4) Ağırlık merkezlerinin hesapları ($x, y, z, L, L_x, L_{x^2}, L_y, L_{y^2}, L_z, L_{z^2}, L_{xy}, L_{xz}, L_{yz}$)
 - a) Her boru için
 - b) Her dirsek için

- 5) Her yüzeyde;
 - a) Boru hesaplarının toplamı
 - b) Dirsek hesaplarının toplamı
 - c) Dirsek toplamları çarpı (λ)

- 6) Toplam ;
 - a) Tüm boruların ağırlık merkezi hesaplarının toplamı
 - b) Tüm dirseklerin ağırlık merkezi hesaplarının toplamı çarpı (τ)
 - c) $[(6-a)+(6-b)]*3.333$
 - d) $(5-a)+(5-b)+(6-c)$

- 7) Hesaplar;
 - a) Yüzey ortalamalarının hesaplanması ($ortx, orty, ortz$)
 - b) Toplam $L_{x^2}, L_{y^2}, L_{z^2}$ 'lerden ,ortalamalarla toplam L_x , toplam L_y , toplam L_z 'lerin çarpımlarının çıkarılması ve $I_{x^2}, I_{y^2}, I_{z^2}, I_{xy}, I_{xz}, I_{yz}$ değerlerinin hesaplanması
 - c) I_x, I_y, I_z Atalet momentlerinin hesaplanması
 - d) Katsayıların hesaplanması (A, B, C, D, E, F, G, H, K)
 - e) X, Y, Z 'nin bulunması
 - f) Her yüzey için ($x - ortx, y - orty, z - ortz$) ifadelerinin bulunması
 - g) Her noktanın M_x, M_y, M_z momentlerinin hesaplanması
 - h) İntensifikasyon faktörlerinin girilmesi
 - i) Her noktaya ait S_E hesabı
 - j) Her noktanın toplam gerilmelerinin hesabı
 - k) Her noktanın toplam gerilmesinin ,emniyetli akma gerilmesi (S_A) ile karşılaştırılması

5. BİLGİSAYAR DESTEKLİ HESAPLAMA



Şekil 17. Örnek 6'nın izometrik görünüşü

Şekil 17'de gösterilen DN 250 ($\Phi 273 \times 63$) boru hattında 14 bar basınçta doymuş buhar ($T_{\text{doyma}}=198.32^\circ\text{C}$) dolaşmaktadır. Boru malzemesi St 35 olup, montaj 20°C sıcaklıkta yapılmıştır. Kullanılan dirsek yarıçapı 254 mm'dir. Buna göre sistemin yeterli esnekliğe sahip olup olmadığını analiz edelim:

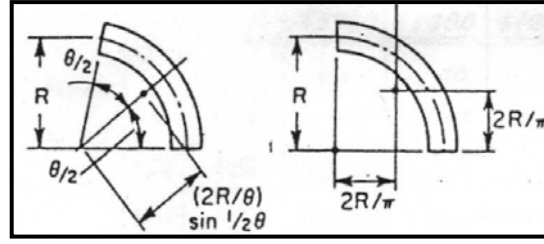
- Program tarafından sorulan, Tablo 9'daki veriler girilir
- Tablo 10'daki veriler bir text dosyasına yazılır.

Tablo 9. Veri listesi

Veriler		Değer	Birim
Boru Dış Çapı	D	273	Mm
Boru Et Kalınlığı	t	6.3	Mm
Dirsek Yarıçapı	R	254	Mm
Boru Nominal Yarıçapı	r	125	Birimsiz
Isıl uzama Miktarı	e	230	mm/100m
Elastikiyet Modülü	E	2.1×10^5	N/mm ²
Çalışma Basıncı	P	14	bar
Emniyet Gerilmesi	S_A	140	N/mm ²

- Boru koordinatları; Şekil 17'de verilen izometrik görünüşteki her bir noktanın 3-Boyutlu uzaydaki koordinatlarıdır.
- İntensifikasyon katsayıları; Dirsek, dönemeç, ve sabit noktalar için hesaplanır.
 - Sabit noktalarda, burulma gerilmesi bileşkesi yoktur, oluşan eğilme gerilmesi dolayısıyla intensifikasyon katsayısı "1.3" alınır.
 - Borunun gidiş yönünde intensifikasyon katsayısı "1" alınır.
 - Koordinatlarda değişimin olmadığı yönde intensifikasyon katsayısı "1.85" alınır.
 - Koordinatlarda değişimin olmadığı yönde intensifikasyon katsayısı "1.54" alınır.

c) Dirsek geometrik merkezleri Şekil 18'de görüldüğü gibi hesaplanır.



Şekil 18. Dirseklerin geometrik merkezi

Tablo 10. Veri listesi

Noktalar	Boru Koordinatları			İntensifikasyon Katsayıları			Dirsekler	Geometrik Merkezler		
	X	Y	Z	X	Y	Z		X	Y	Z
a	0.0	0.0	3000	1.3	1.3	1	bc	0.0	161.7	161.7
b	0.0	0.0	254	1.54	1.85	1	de	161.7	2907.7	0.0
c	0.0	254	0.0	1.54	1	1.85	fg	3167.7	2907.7	0.0
d	0.0	2746	0.0	1.54	1	1.85	hk	3292.7	161.7	0.0
e	254	3000	0.0	1	1.54	1.85				
f	1946	3000	0.0	1	1.54	1.85				
g	3200	2746	0.0	1.54	1	1.85				
h	3200	254	0.0	1.54	1	1.85				
k	3454	0.0	0.0	1	1.54	1.85				
l	24200	0.0	0.0	1	1.3	1.3				

Bu sistemin bilgisayar çıktısı aşağıda verilmiştir

SONUÇLAR

BORU HATTI	0	NOKTASINDA GÜVENLİDİR !	$S_E = 101.117607$	<	140 N/mm ²
BORU HATTI	1	NOKTASINDA GÜVENLİDİR !	$S_E = 48.63.8626$	<	140 N/mm ²
BORU HATTI	2	NOKTASINDA GÜVENLİDİR !	$S_E = 67.536552$	<	140 N/mm ²
BORU HATTI	3	NOKTASINDA GÜVENLİDİR !	$S_E = 63.319118$	<	140 N/mm ²
BORU HATTI	4	NOKTASINDA GÜVENLİDİR !	$S_E = 74.793175$	<	140 N/mm ²
BORU HATTI	5	NOKTASINDA GÜVENLİDİR !	$S_E = 84.444695$	<	140 N/mm ²
BORU HATTI	6	NOKTASINDA GÜVENLİDİR !	$S_E = 74.7105$	<	140 N/mm ²
BORU HATTI	7	NOKTASINDA GÜVENLİDİR !	$S_E = 55.743443$	<	140 N/mm ²
BORU HATTI	8	NOKTASINDA GÜVENLİDİR !	$S_E = 65.296158$	<	140 N/mm ²
BORU HATTI	9	NOKTASINDA GÜVENLİDİR !	$S_E = 33.166233$	<	140 N/mm ²

“SİSTEM YETERLİ ESNEKLİĞE SAHİPTİR ! “

6. SONUÇ

Bu çalışmada; boru hatlarındaki ısıl genleşmeler ve bunları alma (giderme) yöntemleri incelenmiştir. Boru hatlarının, yüksek sıcaklıktaki akışkanlar ile çalıştığı için genleştikleri ve bu genleşmelerin önemli problemlere yol açabileceğini bir kez daha vurgulamakta yarar vardır. Bu genleşmelerin bir şekilde alınmaları gereklidir.

Değişen teknoloji ve bilim bu alanda da çok farklı yöntemlerin doğmasına sebep olmuştur. Bu genleşmelerin alınmasında; bu çalışmada da sözü geçen kompensatörler, dengeleyiciler bunların dışında metal hortumlar, vb. araçlar kullanılmaktadır. Fakat bazı sistemler kendi şekillerden dolayı bu genleşmeleri doğal olarak kompanse edebilecek yapıya sahiptirler. Çoğu sistem de genleşmeleri doğal kompanzasyon ile gidermesine rağmen, kompanzasyon araçları kullanılmaktadır. Bu da işletme ve yatırım maliyetlerini artmasına yol açmaktadır. Sistemin ısıl genleşme hesabının önceden yapılması yeterli esnekliğe sahip sistemlerde boşuna kompanzasyon araçları kullanılmasını engeller. Ayrıca, bu yöntemlerle kritik noktaların belirlenmesi de kompanzasyon araçlarının doğru bir şekilde kullanılmasını sağlar.

Bu çalışmada, değişik analiz yöntemleri incelenmiştir. Pratik analiz, grafik analiz ve parçalara ayırma kısa zamanda sistemin esnekliği hakkında bilgi edinmek için uygulanırlar. Tam ve kesin sonuçların elde edilmesi zor olmakla beraber, önemli ölçüde zaman almaktadır. Fakat bilgisayarlar sayesinde bu işlemler bizim için birkaç saniyede çözülmüş hale gelmiştir. Bu çerçevede gerçek analiz yönteminin bilgisayar programı hazırlanmıştır.

Hızla değişen bilim ve teknolojiye biz mühendislerin görevi en kısa zamanda, en iyiyi değil; en ekonomiyi, en sağlamı değil; yeterli sağlamı yapmaktır.

7. KAYNAKLAR

- [1] AYVAZ A.Ş. "Expansion Joints Kmpansatörler", Calostat Industries, 1996.
- [2] HOLMES, E. "Handbook Of Industrial Pipework Analyze", McGraw Hill Book Company, 1973.
- [3] KING, R.C. CROCKER, S.N. "Piping Handbook", McGraw Hill Book Company, 1973.
- [4] PARMAKSIZOĞLU, İ. C., AVCI, S. Boru Tesisatlarında Isıl Gerilme Analizi, 25, Tesisat Mühendisliği, Kasım-Aralık, 1997.
- [5] HYDRA. "Metal Bellows Handbook", Witzemann GmbH, 1980.
- [6] ORAL, A. "Boru Sistemleri Teknik El Kitabı", Sümerbank Teknik Yayınları, 1978
- [7] HYDRA. "Kompansatören, Das Handbuch Der Kompansatören", Witzemann GmbH, 1990.
- [8] DÜRR LTD. "Pipework Specification Notes", İngiltere, 1990.
- [9] RECKNAGEL / SPRENGER. "Taschenbuch für Heizung und Klima Technik", Oldenburg Verlag GmbH, München, 1981
- [10] POLİTEKNİK LTD.ŞTİ. "Boru Genleşme Parçaları Kompansatörler", 1989.
- [11] ALARKO A.Ş. Boru Hatları Analizi,
- [12] WILEY, J. "Design Of Piping Systems", M.W. Kellogg Co., 1956.
- [13] ALKAN, İ. Piping Flexibility Analyze, DESA A.Ş. Çalışması, 1987.
- [14] ÇANAKÇI, C. "Boru Hatlarında Isıl Genleşme ve Analiz Yöntemleri" Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Yıl içi Projesi, 1999

ÖZGEÇMİŞ

Cihan ÇANAKÇI

29/01/1977 tarihinde Bursa'da doğdu. Ortaokul ve Lise öğrenimini 1995 yılında Bursa Ulubatlı Hasan Anadolu Lisesinde tamamladı. 1996 yılında Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü kazandı. Halen aynı bölümde "4. Sınıf Öğrencisi" olarak okumaktadır.

Arif HEPBAŞLI

1958 yılında İzmir'de doğdu. İzmir Motor Teknik Lisesi'ni bitirdikten sonra (1976), Yüksek öğrenimini sırasıyla; Lisans: Selçuk Üniversitesi (1980), Y.Lisans (ve Y.Dil Hazırlık Sınıfı): İTÜ (1985) ve Doktora (aynı zamanda DESA A.Ş.): S.Ü (1990)'nde tamamladı. İş hayatında ise; S.Ü.'nde Araş. Gör.(1982-1996), DESA A.Ş.'de (Demir Kazan ve Makina Sanayii) Proje Başmühendisliği ile Planlama ve Kalite Sağlama Md.Yard.(1986-1992) ve AKZO-KEMİPOL A.Ş.'de (Boya Sanayii) Mühendislik ve Yatırımlar Md.Yard. (1992-1993) ve SİMPLOT ve BEŞİKÇİOĞLU A.Ş.'de (Dondurulmuş Parmak Patetes Fabrikası) Bakım-Onarım Müdürü (1993-1995) görevlerinde bulundu. Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nin Makine ve Gıda Mühendisliği Bölümlerinde dersler verdi (1995-1996). 1996 yılından beri, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü (Md.Yard.) ile Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde Öğretim Üyesi olarak (Isı Tekniği Konularında) çalışmakta olup, Enerji Yöneticisi Sertifikasına sahiptir. Evli olup, Almanca ve İngilizce bilmektedir