



ULAŞIM VE LOJİSTİK SİSTEMLERİ MERKEZİ BAŞKANLIĞI

TEHLİKELİ MADDE TAŞIYAN TANKLAR İÇİN SONLU ELEMAN ANALİZ TALİMATI

1. AMAÇ ve KAPSAM

Bu talimat, tankların sonlu eleman analiz yöntemiyle uygulama birliğinin sağlanması ve asgari şartların belirlenmesi amacıyla hazırlanmıştır. Bu talimat, ADR Bölüm 6.8 kapsamındaki ivme yüklerine göre tasarımı yapılan *taşıma birimlerinin bağlantı elemanları, gövde ve iskelet yapılarının sonlu elemanlar yöntemi ile analizini* kapsamaktadır.

2. SORUMLULAR

Tehlikeli Madde ve Kombine Taşımacılık Müdürlüğü
Tehlikeli Madde ve Kombine Taşımacılık İnceleme Uzmanları

3. TANIMLAR / KISALTMALAR

ADR: Tehlikeli Malların Karayolu ile Uluslararası Taşımacılığına İlişkin Avrupa Anlaşmasını,
FEA: Sonlu Eleman Analizini,
ifade eder.

4. UYGULAMA

4.1.FEA Analiz Programının Doğrulanması

Başvuru sahibi tasarım doğrulaması için kullanmayı planladığı FEA analiz programının lisansını ve bu programın güncel sürümüne sahip olduğunu gösteren dokümanları TSE TMKT Müdürlüğü'ne sunmalıdır.

Başvuru sahibi eğer mevcut ise, ince cidarlı yapıların analizi ile ilgili doğrulama örneklerini TSE TMKT Müdürlüğü'ne sunmalıdır. Aksi halde FEA yöntemi strain-gage yöntemi ile doğrulanmalıdır.

Tank üreticisi, eğer mevcut ise, ince cidarlı yapıların analizi ile ilgili doğrulama örneklerini TSE TMKT Müdürlüğü'ne sunmalıdır. Eğer tank üreticisi, ince cidarlı yapıların analizi ile ilgili doğrulama örneklerine sahip değil ise; Örnekler mevcut olmadığında, aşağıdakilerden biri veya her ikisini ölçülerek FEA analizi doğrulanır:

Basınç testi sırasında tank gövdesi üzerinde gerilme (strain-gage yöntemi ile) Hidrolik basınç testi sırasında eğilme (deflection)

Basınç testi sırasında tank gövdesi üzerinde gerilme (strain-gage yöntemi ile) Hidrolik basınç testi sırasında eğilme (deflection)



ULAŞIM VE LOJİSTİK SİSTEMLERİ MERKEZİ BAŞKANLIĞI

TEHLİKELİ MADDE TAŞIYAN TANKLAR İÇİN SONLU ELEMAN ANALİZ TALİMATI

Tank üreticisi, aşağıda verilen temel özellikleri FEA analiz programı üzerinde TSE TMKT Müdürlüğüne gösterebilmelidir:

- Temel geometri (elemental geometry)
- Temel kalınlık (elemental thickness)
- Temel basınçlar (elemental pressures)
- Düğüm noktalarına uygulanan dış kuvvetler
- Modelin kenarında veya başka yerde, düğüm noktalarındaki herhangi bir sınırlama

4.2. Geometrik Model

- Tank gövdesinin yüzey olarak modellenmesi tercih edilir.
- CAD model nötr bir formatta: IGES, STEP, PARASOLID vb. formatlarda kaydedilir. Nötr formatta kaydedilen model analizde kullanılmalıdır.

4.3. Koordinat Düzlemi

- Koordinat sistemi model ile uyumlu olacak şekilde yerleştirilmeli, ivme yükleri koordinat sistemine göre uygulanmalıdır.

4.4. Elemanlar

- 2D olarak çizimi yapılan bölgelerin hexagonal elemanlar ile ağ yapısı oluşturulur.
- 3D olarak çizimi yapılan bölgelerin tetragonal elemanlar ile ağ yapısı oluşturulur.
- Tank-şase bağlantılarının eleman boyutunun fine (10-25 mm) olarak belirlenir (Eğer tank-şase bağlantıları 3 boyutlu olarak modellenmişse tetragonal elemanların boyutunun sac et kalınlıkları mertebesinde olmalıdır)
- Tank uçlarının FEA ile doğrulanması gerekiyorsa (örneğin; hesaplama ile doğrulanamayan tank uçları için), tank bombesinin eleman boyutu fine (10-25 mm) olarak belirlenmelidir
- Tankın geri kalan bölümünün eleman boyutu Medium (30-50 mm) olarak belirlenmelidir
- Tekillik (Singularity) görülen bölgelerdeki elemanların geçiş yarıçaplarının artırılmalı ve/veya bu bölgelerde daha küçük eleman kullanılmalıdır (Mesh refinement).
- Tekillik bölgelerinin tespiti için ilgili bölgelerin deformasyon değerlerine bakılmalıdır. Deformasyon ile gerilim değerleri orantılı değişmiyorsa veya arasında uyumsuzluk varsa söz konusu bölgede tekillik hatası olduğu değerlendirilir.

4.4.1. Mesh Yapımında Dikkat Edilecek Bazı Hususlar

- Eleman Tipi ve Boyutuna Karar Vermek: Kullanılan elemanların büyüklüğünün hesaplama alanı içindeki değişimleri yansıtacak kadar küçük olması sağlanır fakat, gereksiz çok sayıda eleman

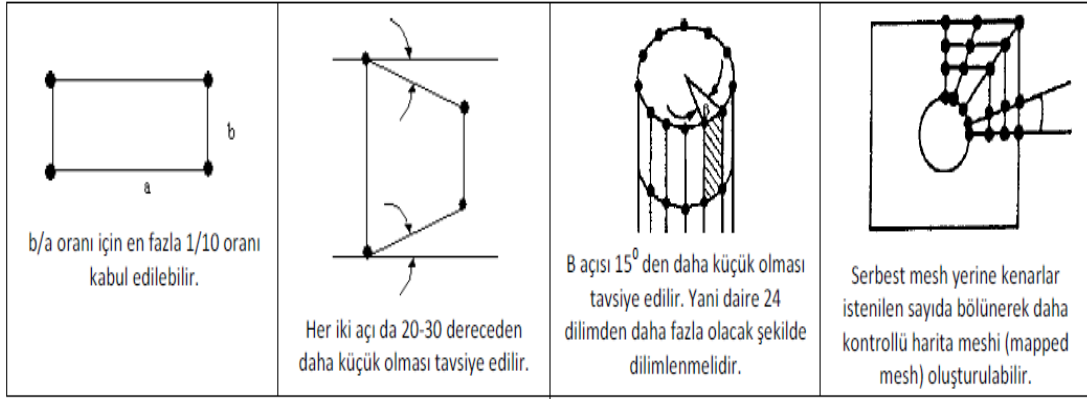
ULAŞIM VE LOJİSTİK SİSTEMLERİ MERKEZİ BAŞKANLIĞI

TEHLİKELİ MADDE TAŞIYAN TANKLAR İÇİN SONLU ELEMAN ANALİZ TALİMATI

kullanılması da istenilmez. Gerilmelerin yoğun olduğu bölgeler gibi sonucu daha fazla etkileyen kısımlarda eleman boyutları düşürülmelidir.

- Geometriye uygulanmış olan mesh tipi, boyutu ve sayısının doğru sonuçlar almak için yeterli olup olmadığı analiz yapımında kullanılan programın kendisine ait mesh kriter tablosundan kontrol edilmelidir.

Elemanlarda müsaade edilebilecek biçim bozukluklarına dikkat edilmelidir: Geometrik şekil elemanlar ile örülürken şeklin karmaşık olması durumlarında ya da uygun eleman ağının oluşturulamadığı durumlarda bazı bölgelerde elemanlar aşırı derecede şekil bozukluğuna uğrar. Bu gibi yerlerde elemanların şekil bozukluğunun kabul edilebilir sınırlar içinde olmasına dikkat edilmelidir. Mesh yaparken (eleman ağı örülürken) kontrolü tamamen programa bırakmak bazen bu sonucu verebilir. Bu nedenle mesh yapmadan önce hangi kenarların ne kadar parçaya bölüneceği, ya da o bölgelerde kullanılacak eleman boyutlarının ne olacağı gibi bazı kararların kullanıcının alması gerekir. Mesh yaparken bazı dikkat edilecek hususlar aşağıda verilmiştir.



4.5.Sınır Koşulları

- İlgili tasarım standardına göre belirtilen analiz basıncı değeri, tank modelinin iç yüzeyine uygulanır.
- TS EN 12493 standardı kapsamındaki LPG tankları için analiz basıncı, tasarım basıncının 0,833 katı olarak kabul edilir.
- Konsolların şasiye bağlantı noktaları tüm hareket yönlerinde sabitlenir (Kendinin taşıyan gövdeli yapılar için aşağıdaki sınır şartları ayrıca uygulanır).

4.5.1. Kendini Taşıyan Gövdeli Yapılar İçin Sınır Koşulları

- Yukarıda verilen sınır şartlarına ek olarak, kendini taşıyan gövdeli yapılar için aşağıdaki sınır şartları dikkate alınır.

ULAŞIM VE LOJİSTİK SİSTEMLERİ MERKEZİ BAŞKANLIĞI

TEHLİKELİ MADDE TAŞIYAN TANKLAR İÇİN SONLU ELEMAN ANALİZ TALİMATI

- King-pin bağlantısının tüm yönlerde hareket engellenir, sadece dikey ekseninde hareketine müsaade edilebilir.
- King-pin bağlantısına yanal eksen üzerinde, çekicinin 5. tekerinde olduğu gibi $\pm 5^\circ$ hareket verilebilir.
- Konik geçişli kendini taşıyan gövdeli yapılarda, tankın yük altında içe çökme tehlikesi bulunmaktadır. Bunun kontrolü lineer buckling analizi ile mümkündür. Lineer buckling analizi, aşağıda verilen sınır şartları ile birlikte hareket yönünde 2g ivme yükü ile uygulanır:
 - King pin bağlantısı yukarıdaki gibi sabitlenir, diğer konsollar ise hareket yönünde serbest bırakılır.
 - Konik gövde bölümü için lineer buckling analizi, King-pin konsolları için gerilme analizi çıktıları incelenir. Bu analizler, gövdeyi destekleyen kalıcı yapılarla birlikte yapılmalıdır. Örneğin; tasarımda kalıcı olarak sabitlenmiş olan dalgakıran veya ara bölmeler vb.

4.6.Kuvvetler

- Tasarım standardında belirlenen değerlerde basınç yükü, tank iç cidarına uygulanır.
- Hesaplanan ivme yükleri ayrı ayrı, ivme yönüne dik yüzeylere tercihen yayılı yük olarak uygulanır. İvme yükü hesaplanırken, tankın taşıdığı maksimum yük dikkate alınır.
- Tankın boş kütlesi model üzerine tanıtılmalı veya girilen malzeme yoğunluğuna göre program tarafından hesaplanmalıdır. Program tarafından hesaplanan kütle, tasarım kütlesi ile karşılaştırılmalıdır.
- Tank uçları FEA analizi ile doğrulanacak ise, tasarım standardında verilen ilgili hesaplama basıncı tank ucunun iç yüzeyine uygulanır. Sabitleme, tank ucu üzerinde değil, bağlı olduğu silindirik gövde cidarının bir bölümünü dahil edecek şekilde gövde cidarından, veya tank konsollarından yapılır.
- *Elleçleme için kullanılan bağlantı ekipmanlarının (taşıyıcı halkalar, mapalar, askılar vb.) FEA analizi ile doğrulandığı durumlarda, taşıyıcı yapıların nasıl bağlanacağı göz önüne alınmalı ve buna göre kuvvetler uygun açılarda uygulanmalıdır. Dolu olarak taşınamayan taşıma birimi için, toplam yük 1g ivme yükü esas alınarak belirlenir. Bunun dışında kalan taşıma birimleri için, toplam yük ilgili Tasarım Onay standardı ve ADR Bölüm 6.8'e göre belirlenir.*

4.7.Gerilim Değerlerinin Okunması

- Tank gövdesi üzerinde, Membrane gerilim değerleri okunur.
- Tank bağlantı konsolları/ayaklarında Von-Misses bileşke gerilim değeri okunur.
- Konik geçişli kendini taşıyan gövdeli yapılarda, lineer buckling analizi için tanımlanan sınır şartlarında, king-pin grubu için Von-Misses bileşke gerilim değeri okunur.
- Bununla birlikte, tüm bağlantıların sabitlendiği durumda diğer konsolların Von-Misses bileşke gerilim değeri okunur.

ULAŞIM VE LOJİSTİK SİSTEMLERİ MERKEZİ BAŞKANLIĞI

TEHLİKELİ MADDE TAŞIYAN TANKLAR İÇİN SONLU ELEMAN ANALİZ TALİMATI

- Konik geçişli kendini taşıyan gövdeli yapılarda, lineer buckling analizinde güvenlik faktörü okunur. Bu katsayı en az 2 olmalıdır.
- Tekillik hatasında şüphelenilen bölgelerde deformasyon okunur. Gerilme ile orantılı olup olmadığına bakılır. İstenilen doğrultudaki çökme (deplasman) miktarı Directional Deformation değeri dikkate alınarak okunur.

4.8.Okunan Gerilimlerin Değerlendirilmesi

Okunan gerilmelerin uygun olmadığı durumlarda, öncelikle mesh kriterleri ve kontak bağlantıları gözden geçirilmelidir. Değerlendirmenin anlaşılabilmesi için gerekli tanımlar aşağıda verilmiştir.

- **Büyük yapısal süreksizlikler:** Gerilim dağılımının belirgin bir bölgede et kalınlığı boyunca etkileyen süreksizliklerdir. Örnek olarak farklı mekanik özelliklere sahip malzemelerin birleşim noktaları, malzemenin büküm noktaları, konik geçiş bölgeleri verilebilir.
- **Genel Membran Gerilimi (P_M):** Büyük yapısal süreksizliklerin uzağında kalan bölgelerde et kalınlığı boyunca oluşan normal gerilim.
- **Local Membran Gerilimi (P_L):** Büyük yapısal süreksizliklerin civarında kalan bölgelerde et kalınlığı boyunca oluşan normal gerilim.
- **Eğme gerilimi (P_B):** Büyük yapısal süreksizliklerin uzağında kalan bölgelerde malzeme yüzeyinde en yüksek değere ulaşan gerilim.
- **Geçme kriteri (f):** İlgili standarda göre tank ve bağlantıları üstünde izin verilebilen maksimum gerilim miktarıdır.

ADR`ye göre geçme kriterleri aşağıda verilmiştir.

$$f = \text{Min} (\sigma \leq 0,75 Re; \sigma \leq 0,5 Rm)$$

TS EN 13094 sonlu eleman analizi için geçme kriteri aşağıdaki gibidir:

- Tank Gövdesi;
 $f = \text{Min} (\sigma \leq 0,75 Re; \sigma \leq 0,5 Rm)$
Değerlendirme, genel membran gerilme üzerinden yapılır.
- Yapının Diğer Bölümleri (Tank-şase bağlantı konsolları);
 $f = \text{Min} (\sigma \leq 0,75 Re; \sigma \leq 0,5 Rm)$
Ancak, bu yapıların birbirlerine bağlandığı bölgelerdeki lokal gerilme yığılımları için;
 $f = Re$
Değerlendirme, Von Misses bileşke gerilme çıktısı üzerinden yapılır.

ULAŞIM VE LOJİSTİK SİSTEMLERİ MERKEZİ BAŞKANLIĞI

TEHLİKELİ MADDE TAŞIYAN TANKLAR İÇİN SONLU ELEMAN ANALİZ TALİMATI

TS EN 12493 (LPG tankı) sonlu eleman analizi için geçme kriteri aşağıdaki gibidir:

- Tank Gövdesi;
 $f = \text{Min} (\sigma \leq Re/1,6; \sigma \leq Rm/2,5)$
Değerlendirme, membran gerilme üzerinden yapılır. Ancak, bombeli tank uçlarının KNUCKLE bölgesinde okunan gerilme değeri, lokal membran gerilme (P_L) olarak dikkate alınır ve bu bölge TS EN 13445-3 ANNEX C 'ye göre değerlendirilir.
- Yapının Diğer Bölümleri (Tank-şase bağlantıları);
TS EN 13445-3 ANNEX C 'ye göre değerlendirilir.
Değerlendirme, Von Misses bileşke gerilme çıktısı üzerinden yapılır.

TS EN 13807 (Batarya Araç ve ÇEGK) sonlu eleman analizi için geçme kriteri aşağıdaki gibidir:

- Tüpler, silindirler, basınçlı kaplar ve bunların bağlantı elemanları için;
 $f = 0,77 R_e$
Tüpler üzerinde noktasal gerilme oluşmaması için önlemler alınmalıdır.
- Tanklar ve iskelet yapı için;
 $f = \text{min} (\sigma \leq 0,75 Re; \sigma \leq 0,5 Rm)$

Taşıyıcı yapıların (mapa) sonlu eleman analizi için geçme kriteri aşağıdaki gibidir:

- Taşıma birimi dolu olarak taşınabiliyor ise;
 $f = \text{min} (\sigma \leq 0,75 Re; \sigma \leq 0,5 Rm)$
- Taşıma birimi dolu olarak taşınamıyor ise;
 $f = 0,77 Re$

TS EN 13445-3 Ek C'ye göre geçme kriteri aşağıdaki gibidir.

$f = \text{min} (\sigma \leq 0,75 Re; \sigma \leq 0,5 Rm)$ veya ilgili tasarım standardına göre belirlenen maksimum izin verilebilir gerilme olmak üzere;

$$P_M \leq f$$

$$P_L \leq 1,5 f$$

$$P_L + P_B \leq 1,5 f$$

- Yüksek veya düşük sıcaklıkta ve değişken yükler altında gerilim artış noktaları da mutlaka yorulmaya karşı göz önüne alınmalıdır. Özellikle kriyojenik tanklarda bu kontrollerin yapılması çok önemlidir.
- Yukarıdaki verilenler dışındaki tasarım standartları için, TS EN 12493 standardı yaklaşımı referans alınabilir. Tank gövdesi için ADR geçme kriterleri kullanılır.

NOT: Tasarım standardında aksi belirtilmedikçe; hesaplama yöntemi ile doğrulanan tank gövdeleri için ayrıca FEA analizi ile yapılması gerekmemektedir. Sadece tank-şasi bağlantı konsolları için FEA analizi yapılması yeterlidir.



ULAŞIM VE LOJİSTİK SİSTEMLERİ MERKEZİ BAŞKANLIĞI

TEHLİKELİ MADDE TAŞIYAN TANKLAR İÇİN SONLU ELEMAN ANALİZ TALİMATI

- TS EN 13094 standardı kapsamındaki tanklar buna göre değerlendirilir. Fakat hesaplama ile doğrulanması mümkün olmayan bir gövde parçası söz konusu ise, bu parça için FEA analizi yapılmalıdır. (Örneğin; kutu kesitli tankların bazı uç tipleri)
- Özellikle TS EN 12493 standardı kapsamındaki LPG tanklar için bu durum **geçerli değildir**. Tank gövdesi de FEA analizinde kontrol edilmelidir.

5. İLGİLİ DOKÜMANLAR

ULM-02-FR-04-018 Tanklar, Sökülebilir Tanklar, Tüplü Gaz Tankerleri, Tank Konteynerleri Ve ÇEGK'ler İçin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Yapılan Analiz Raporu Formu

ADR Tehlikeli Malların Karayolu ile Uluslararası Taşımacılığına İlişkin Avrupa Anlaşması

TS EN 12493+A1 Sıvılaştırılmış Petrol Gazı (LPG) İçin Kaynaklı Çelik Basınçlı Kaplar - Karayolu Tankerleri - Tasarım ve İmalat

TS EN 13094 Tehlikeli Maddelerin Taşınması İçin Tanklar-Çalışma Basıncı 0,5 Bar'ı Geçmeyen Metalik Tanklar-Tasarım ve Yapılış

TS EN 13445-3 Ateşle Temas Etmeyen Basınçlı Kaplar-Bölüm 3:Tasarım

TS EN 13807 Taşınabilir Gaz Tüpleri - Akülü Araçlar - Tasarım, İmalat, İşaretleme ve Deneyler