

AĞIR İŞ MAKİNALARININ TASARIMINDA TEORİK-DENEYSEL GERİLME VE YORULMA ANALİZİ

Prof.Dr. Tuncer TOPRAK*

İ.T.Ü. Makina Fakültesi, Gümüşsuyu, İstanbul - topraktu@itu.edu.tr

Öğr. Gör. Dr. Ergün BOZDAĞ

İ.T.Ü. Makina Fakültesi, Gümüşsuyu, İstanbul

Araş Gör. Emin SÜNBÜLOĞLU

İ.T.Ü. Makina Fakültesi, Gümüşsuyu, İstanbul

ÖZET

Ağırlıklı olarak kaynaklı konstrüksiyon imalatı olan iş makineleri, çalışma şartları nedeniyle hem yüksek gerilmelerin etkisinde ve hem de malzeme yorulması problemleri ile karşı karşıyadır. Bu tip dinamik kuvvetlerin etkisindeki makina ve elemanlarının tasarım aşamasında, hidrolik silindirler vasıtasıyla uygulayabilecek en büyük kuvvetler dikkate alınarak, gerilme analizi ve boyutlandırmalar yapılır. Ancak bilgisayar ortamında çok gelişmiş yazılımlarla bile yapılan sayısal analizlerde, hem uygulanan olası kuvvet sistemi ve hem de dinamik etkilerin gerçeğe yakın modellenmesi genellikle mümkün olamamaktadır. Ayrıca kaynak dikişlerindeki hatalardan ve geometrik süreksizliklerden kaynaklanacak gerilme yığılmalarının (stress concentrations) mertebesini tasarım aşamasında belirleme konusu da, tasarımcıyı her zaman düşündüren ve zor durumda bırakan konudur. Bu nedenlerle, iş makinelerinde olduğu gibi, bilhassa dinamik ve darbeli yüklerin etkisinde kalan bütün sistemlerde, tasarımdan sonra mutlaka yapılacak deneysel analizlerle tasarımın modifiye edilmesi gerekir. Bu tip uygulamalarda, sayısal analiz sonuçları ile, prototip üzerinde gerçek yüklemelerinde yapılan deneysel analiz sonuçları arasında büyük farklarla sık sık karşılaşılır. Bu farklılıklar bazen % 400'lere kadar varabilmektedir.

Dinamik ve darbeli kuvvetlerin etkisinde çalışan iş makinelerinde çok sık karşılaşılan bir başka durum da, malzeme yorulması (fatigue) sonucu makina ve elemanlarının hasar görmesidir. Değişken kuvvetler sonucu oluşan gerilmelerin büyüklüğü ilgili sınır değerlerin altında kalmasına rağmen, belirli tekrar sayısından sonra, malzeme yorulmasından kaynaklanan hasarlar oluşmaktadır. Bu bakımdan, hem tasarım aşamasında sanal ortamda ve hem de prototip üzerinde deneysel olarak yorulma ömür analizlerinin gerçekleştirilmesi gerekir. Yapılan yorulma analizlerinin sonucuna ve bulunan ömür değerlerine bağlı olarak tasarım tekrar modifiye edilir.

Bu çalışmada, ağır iş makinelerinde teorik ve deneysel gerilme analizleri, tasarım ve boyutlandırma aşamasında dikkat edilmesi gereken noktalar incelenecek, ayrıca endüstriyel uygulamalardan örnekler verilecektir.

Anahtar Kelimeler: İş makineleri, tasarım, gerilme, yorulma, deneysel.

The Theoretical and Experimental Stress and Fatigue Analysis At The Design of Earth Moving Machinery

ABSTRACT

Mainly being welded structures, the heavy loading and operating conditions on earth moving machinery are main reasons for unexpected fatigue problems. Although the commercially available dynamic and static stress analysis software have developed further in decision making, the net loading conditions and results of impacts from real operating conditions, especially when of great hardness, are never to be perfectly modeled. Moreover, design criteria not facilitating the faults in welding and unforeseen concentration points are of nightmares among engineers involved with the job.

The conditions aforementioned and similar considerations enforce an experimental approach on stress and fatigue analysis to be conducted to modify and improve the durability of such designs. Error fractions of up to 400% are sometimes observed under dynamic and impact-dominated loading conditions between numerical and on-the-field measurements, thus making an experimental test a "must" in development of an earth moving machine. Under the vision provided by such field tests, fatigue tests on critical parts of the machines can be conducted for improved life and durability of the structure.

This paper involves a quick look on the application of theoretical and experimental stress analysis to structures of earth moving machinery, with addressing special care on critical points to be considered during design process, developing the ideas with applications examples from the real world.

Keywords: Earth moving machinery, design, stress, fatigue, experimental

* İletişim yazarı

Bu yazı TMMOB Makina Mühendisleri Odası İstanbul Şubesinde düzenlenen II. İş Makinaları Sempozyumu ve Sergisi'nde bildiri olarak sunulmuştur.

KAYNAKLI KONSTRÜKSİYONLARDA TASARIM KRİTERLERİ

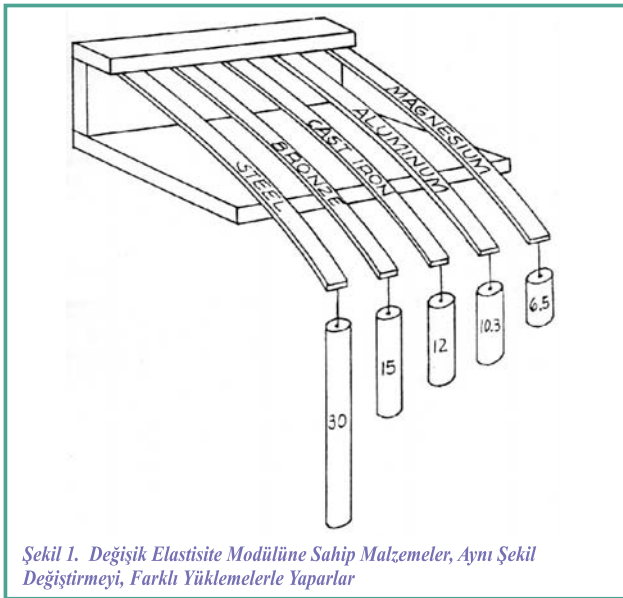
Kaynaklı konstrüksiyonlarda tasarım ve boyutlandırma aşamasında yapılacak analizler için 3 ana bölüm;

- Kuvvet sistemi,
- Malzeme ve geometri seçimi,
- Gerilme ve şekil değiştirme,

şeklinde oluşur. Tasarımı yapılacak sistem veya elemana uygulanması olası kuvvet sisteminin büyüklüğü, statik, harmonik değişken veya darbe şeklinde olması hakkında yeterli bilgiye sahip olunmalıdır. Hareketli parçalarda oluşan atalet kuvvetlerinin, bazı durumlarda normal uygulanan kuvvetlerden daha büyük olacağı gözden kaçırılmamalıdır. Bu gibi durumlarda hafif malzemeler kullanarak, atalet kuvvetleri azaltılabilir.

Malzeme seçimi yapılırken, çekme-basma mukavemetleri, yorulma mukavemeti, elastisite ve kayma modülleri hakkında, uygulanan kuvvet sistemini de dikkate alarak dikkatli seçim yapılmalıdır. Aynı elastisite modülüne, ancak değişik kopma mukavemetine sahip malzemelerin aynı yük altında aynı şekil değiştirmeyi yapacakları, yani rijitliklerinin aynı olacağı, buna karşılık değişik elastisite modülüne sahip malzemelerin, aynı şekil değiştirmeyi, farklı yüklemelerle yapacakları unutulmamalıdır.

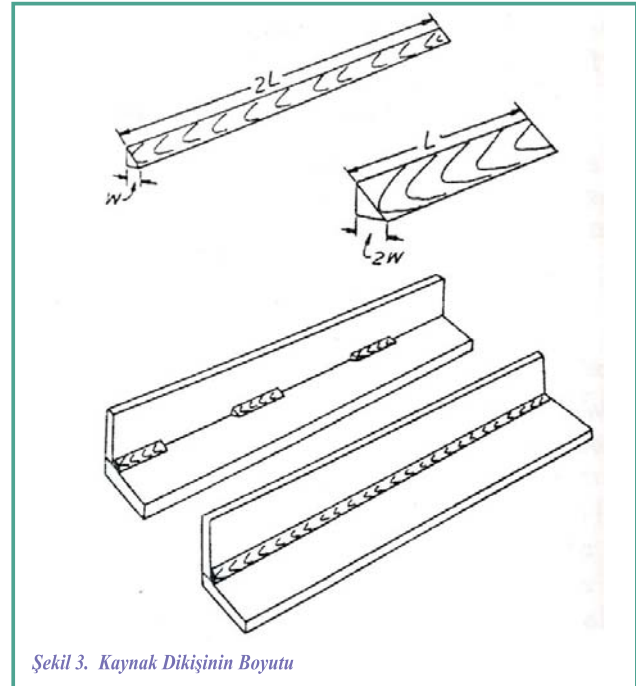
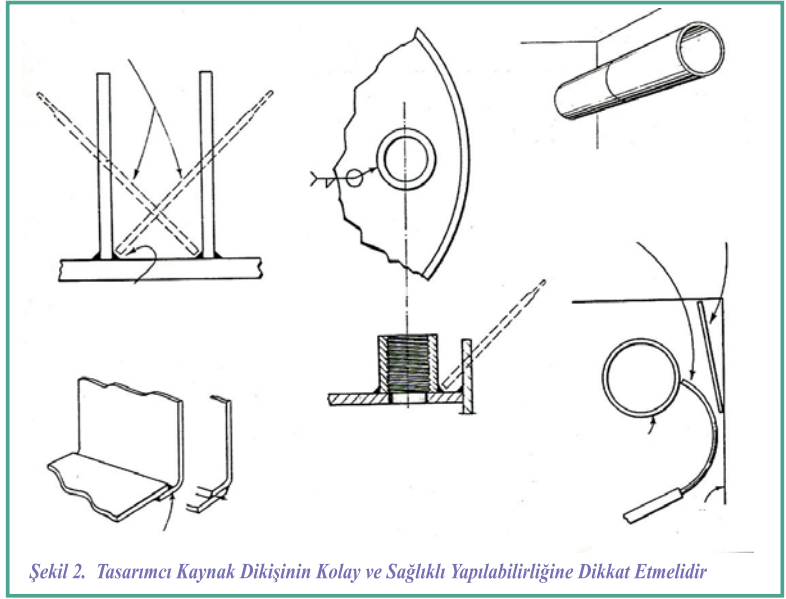
Yükleme sonucu kritik konumlarda oluşacak kesit tesirlerine



(eksenel kuvvet, kesme kuvveti, eğilme ve burulma momentleri) göre uygun profil kesiti seçilerek istenilen rijitlik sağlanabilir.

Tasarım ekibi ile imalat ekibi sürekli işbirliği halinde olmalıdır. Tasarımcı, boyutlandırma ve şekillendirme yaparken, imalat edilebilirliğine ve kolaylığına dikkat etmelidir. Parçalar kaynakla birleştirilirken, kaynak dikişlerinin en uygun ve kolay yapılabilirliği göz önünde bulundurulmalıdır. Bilhassa dinamik ve darbeli yüklerin etkisindeki iş makinelerinde yapılacak kaynak hataları, gerilme yığılmalarına ve hasarlara neden olmaktadır.

Tasarımcı ve imalatçının kaynak dikiş boyutlarını belirlerken de



dikkatli davranması gerekir. Gereğinden fazla kaynağın maliyeti ve hata yapma olasılığını artıracak bilinmelidir. Küçük boyutlu kuvvet uygulamalarında kaynak dikişinin sürekli olması yerine kesikli olması düşünülebilir. Ancak süreksizliklerin gerilme yığılmasına (stress Concentration), bilhassa darbeli ve dinamik kuvvet uygulamalarında malzeme yorulmasına neden olacağı da dikkate alınmalıdır. Kutu kesitlerde rijitliği artırıcı plakların (stiffeners) birleştirilmesinde kaynak dikiş boyutları küçük seçilebilir.

Tasarım ve boyutlandırma aşamasında en önemli noktalardan biri de gerilme emniyet katsayısının seçimidir. Uygulanması olası kuvvet sistemine göre ve malzeme kopma mukavemetine göre yapılan boyutlandırmalar bilinmeyen bazı faktörler sonucunda istenmeyen hasarlara neden olabilirler. Bu faktörler, malzeme içindeki süreksizlikler (malzeme üretim hatası), imalat hataları, tasarım hesaplarındaki hatalar ve kuvvet sistemindeki bilinmeyen değişimler olabilir. Bu nedenle boyutlandırma aşamasında, makina elemanında oluşacak en büyük gerilmenin, malzeme akma gerilmesinden belirlenecek bir emniyet payı ile küçük olması sağlanır. Emniyet katsayısının seçiminde genellikle tavsiye edilen değer, katsayının 3 olarak seçilmesidir. Malzeme dökme demir ise bu rakamın 1.3 ile, darbeli yüklemelerde da 2 ile çarpılması tavsiye edilir [1].

Dinamik ve darbeli yüklerin etkisinde çalışan iş makinelerinin elemanlarına gelen kuvvet sisteminin büyüklüğü ve uygulanış şeklinin tam olarak bilinmesi genellikle mümkün olamamaktadır. Bu bakımdan tasarımın ilk aşamasında, tahmini yüklemeye göre sayısal analizler (Sonlu Elemanlar Yöntemi Finite Element Method) kullanılarak boyutlandırmalar yapılır ve prototip üretilir. Seri imalata geçmeden evvel, prototip üzerinde gerçek çalışma şartlarında yüklemeler yapılarak **Deneysel Gerilme Analizi** yöntemi ile gerçek gerilmeler bulunur ve bu gerilmeler sayısal analizde bulunan değerlerle karşılaştırılarak, tasarımda modifikasyonlar gerçekleştirilir.

KAYNAKLI KONSTRÜKSİYONLARDA GERİLME VE YORULMA ANALİZİ

Dinamik ve darbeli yüklerin uygulandığı iş makinelerinde, kaynaklı birleşme konumlarında

ve diğer süreksizlik oluşturan konumlarda gerilme yığılmaları (stress concentration) oluşur. Bu konumlardaki gerilmelerin değerleri, süreksizliğin geometrisine ve boyutlarına bağlı olarak değişir. Bu nedenlerle tasarım aşamasında bu durumu tam olarak dikkate almak mümkün olmayabilir. Bilinmeyen bu büyük ve değişken gerilmeler yapıda malzeme yorulmasına neden olarak, beklenmeyen hasarlar oluşturabilir. Bu bakımdan bilhassa gerilmelerin büyük olacağı konumlarda, sivri köşeler, kaynak süreksizliği, delikler gibi süreksizlik oluşturan durumlardan mümkün olduğu kadar kaçınmak gerekir.

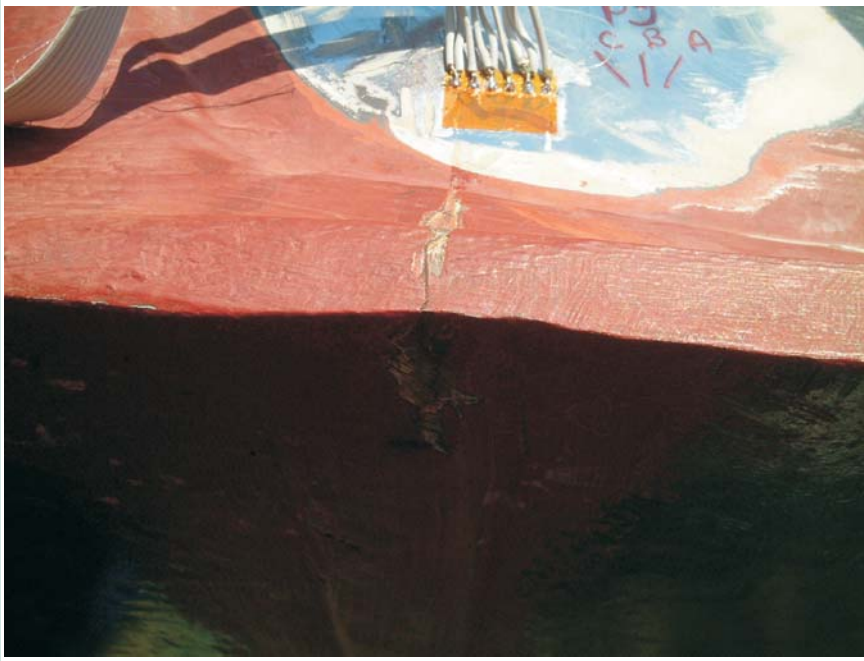
Değişik tip iş makinelerinde, genellikle değişken ve bazı durumlarda da darbeli etki yapan kuvvet etkileri söz konusudur. Değişken kuvvetler, örneğin kırıcı eleman bağlanmış bir



Şekil 4. Paletli Bir Ekskavatörün Bomunun Orta Göbek Yatağının Çevresi Boyunca Oluşan Yırtılma



Şekil 5. Ekskavatör Bomunun Makina Gövdesine Bağlandığı Bölgeye Yakın, Üst ve Yan Saclarda Oluşan Devamlı Çatlağın Sağ Taraftan Görünüşü



Şekil 6. Ekskavatör Bomunun Ana Gövdeye Bağlandığı Bölgeye Yakın, Üst ve Yan Saclarda Oluşan Çatlağın Sol Taraftan Görünüşü



Şekil 7. Malzeme Yorulması Sonucu Kıran Hidrolik Silindirin Bağlandığı Yatak Pimi

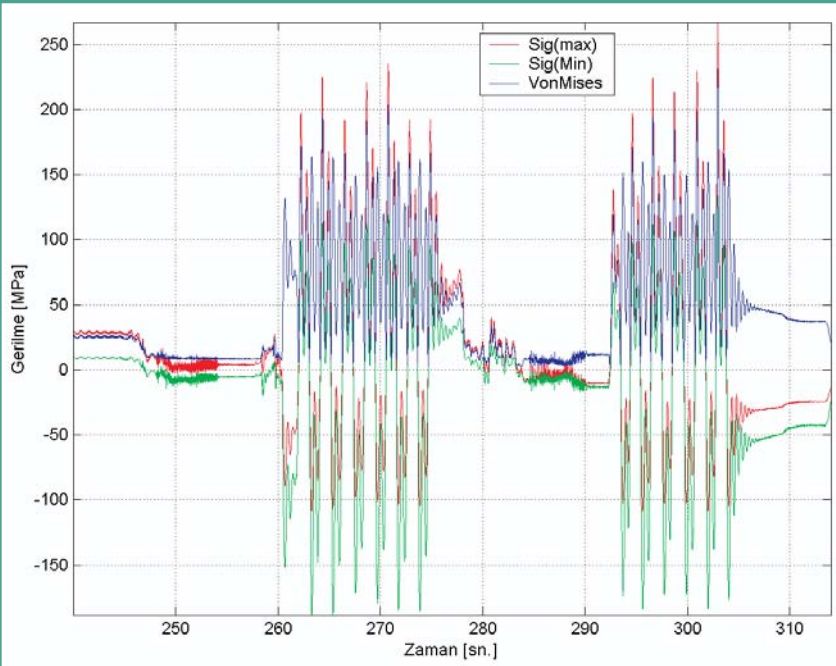
ekskavatörde yaklaşık olarak harmonik değişen bir dinamik yükleme söz konusu olmasına rağmen, arazide kazma işlemi yapan bir ekskavatörde tamamen gelişi güzel değişen dinamik kuvvetler uygulanır. Bu gelişi güzel değişen kuvvetlerin büyüklüğü kadar doğrultuları da değişkendir. Örneğin, topraktan kazma işlemi yaparken kepçenin uçtaki tınaklarından birinin sert bir kayaya rastlaması durumunda, boma büyük oranda burulma etkisi de yapan tehlikeli yükleme

durumu söz konusu olur. Bomun açılma durumuna göre, bu kuvvetlerin moment kolu da değişeceğinden büyük gerilmeler oluşur. Bu gerilmeler malzemenin sınır değerlerinin altında kalsa bile, dinamik etki dolayısıyla yorulma problemi her zaman olasıdır. Bu gibi yorulma hasarlarına, pratikte çok sık rastlanır. Aşağıdaki resimler, bir ekskavatörün arazideki çalışma şartlarında, değişik elemanlarında, gerilme yığılması ve yorulma sonucu oluşan çatlak ve yırtılmaları göstermektedir.

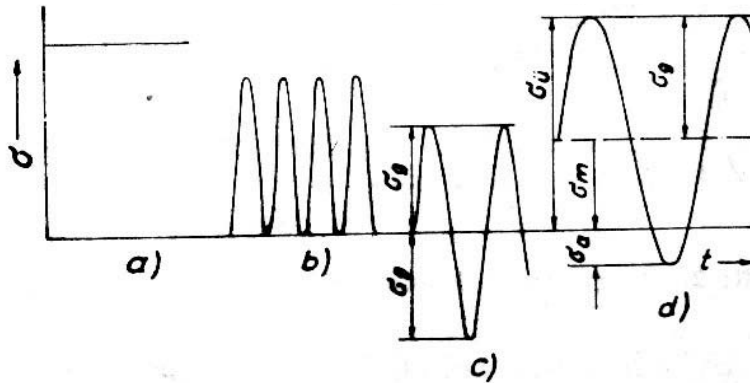
Bu hasarların oluştuğu ekskavatör üzerinde yapılan deneysel gerilme analizi ile seçilen kritik noktalarda ve hasarların oluştuğu konumlarda gerilmelerin büyüklüğü ve değişimi arazi çalışma şartlarında ölçülerek incelenmiştir. Aşağıdaki grafik, ölçümler sonucunda örnek olarak, bomun kola bağlantı kısmına yakın konumda oluşan asal gerilmelerin ve von Mises gerilmelerinin değişimini göstermektedir.

Tasarım aşamasında sayısal yorulma analizi sırasında gerilme analizi yapıldıktan sonra, kritik konumlardaki gerilmelerin olası maksimum ve minimum değerleri seçilerek, gerilmelerin de harmonik değiştiği kabul edilerek yorulma ömür hesapları yapılır. Kritik konumlar seçilirken, gerilmelerin yüksek olacağı, çentik kenarları, kaynak kenarları, delik kenarları, sivri konumlar gibi gerilme yığılmasının olacağı konumlar bilhassa seçilmelidir. Daha evvelce de belirtildiği gibi, gerilme yığılma katsayısı (stress concentration factor), çentiğin geometrisine, büyüklüğüne göre değişir. Bunun için literatürde ve uluslararası standartlarda, deneysel veya sayısal analizler sonucu

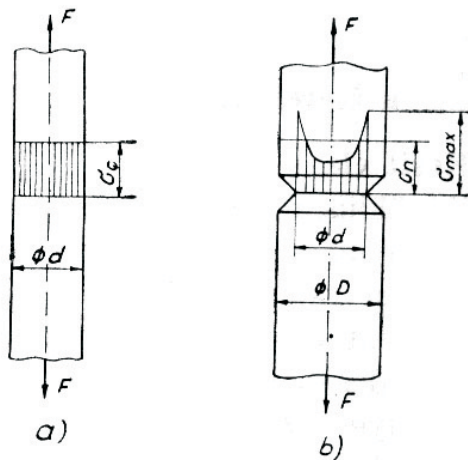
bulunan katsayılar tablo ve diyagramlar halinde verilir. Ancak bu analizler sınırlı geometriler için yapıldığından, bizim analizini yaptığımız konum geometrisine en yakın geometri tablolarından bulunarak katsayı seçilir. Seçilecek harmonik değişimin formu, gerilmenin maksimum ve minimum değerleri dikkate alınarak, aşağıdaki şekilde görülen formlardan birine benzeyecektir.



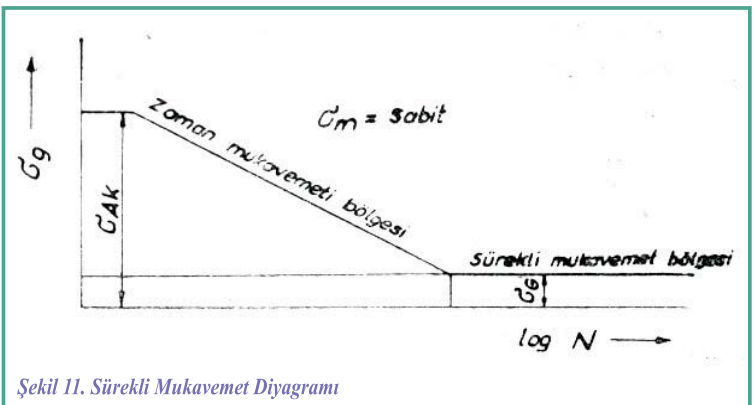
Şekil 8. Arazideki Bir Yükleme Durumunda Bomun Arma Bağlantı Kısımına Yakın, Bomun Sağ Yan Yüzünde, Üst Sacı Yakın Konumda Asal Gerilmelerin Zamanla Değişimi



Şekil 9. Sayısal Yorulma Analizi İçin Olası Harmonik Gerilme Değişimlerine Örnekler



Şekil 10. Gerilme Yığılmasına Örnek Olarak Dairesel Kesitli Bir Mil Üzerinde Açılan Çentik Sonucunda Oluşan Gerilmenin Konuma Göre Değişimi



Şekil 11. Sürekli Mukavemet Diyagramı

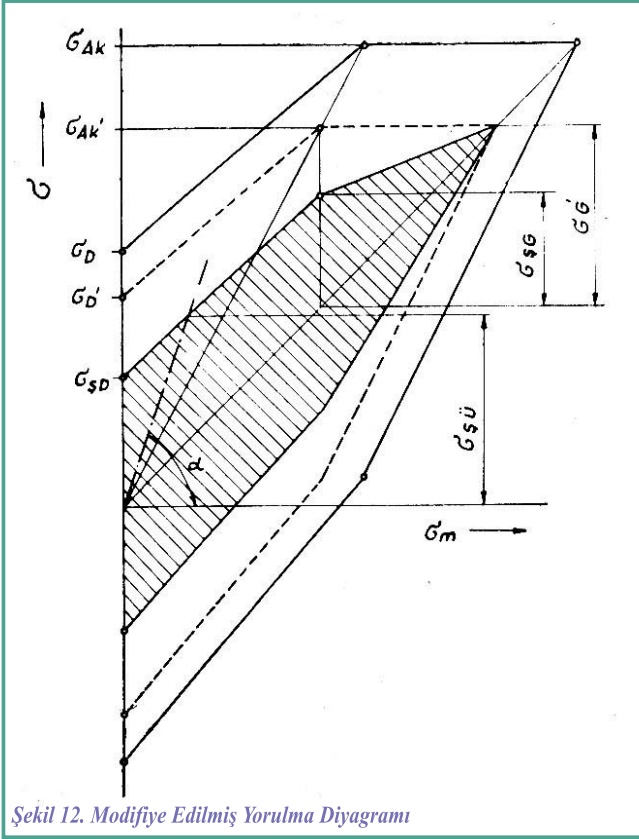
Malzeme yorulması için laboratuvarlarda yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, belirli bir σ_m değeri için, gerilme genliği ile gerilmenin tekrar sayısı N (logaritmik ölçekte) arasındaki bağıntı aşağıdaki şekilde verilmiştir (Wöhler eğrisi).

Standartların tanımladığı boyut, geometri ve yüzey işleme şartlarındaki nünuneler üzerinde yapılan testler, malzeme yorulması hakkında bilgi verir. Ancak, uygulamada, analizi yapılan cismin boyutları, geometrisi ve yüzey işleme şartları farklı olacağından, oluşturulan yorulma diyagramlarının analizi yapılan eleman için modifiye edilmesi gerekir.

Dinamik yükleme hakkında yeterli bilgi bulunmaması durumunda, gerçek yükleme şartlarında deneysel gerilme analizi yaparak, kritik konumlardaki gerilme değişimleri belirlenir. Bunun için yorulma kırılması olasılığı olan noktaların öncelikle belirlenmesi gerekir. Bu noktalar en büyük dinamik gerilme genliğine sahip noktalardır.

Gerilme değişimlerinin gelişmesi güzel (random) olması durumunda (genellikle bu şekildedir.) değişik analiz yöntemi ile ömür hesabı yapılır. Bu yöntemler de uluslararası standartlarda tanımlanmıştır. Tanımlanan bir ömüre göre sürekli mukavemet oluşturacak gerilme analizi için ilgili standartta gerilme hesabı aşağıdaki gibi formüle edilmiştir. Standartta değişik konstrüksiyonlar ve yükleme şekilleri için belirlenmiş katsayılar

seçilerek, gerilme genliği (S_r) ile tekrar sayısı (N) arasındaki bağıntı da uygulanır.



Şekil 12. Modifiye Edilmiş Yorulma Diyagramı

$$\log N = \log C_0 - d/\sigma - m \log S_r$$

Yukarıdaki formül daha basit formda yazılabilir.

$$S_r^m N = C_d$$

Burada

$$\log C_d = \log C_0 - d\sigma$$

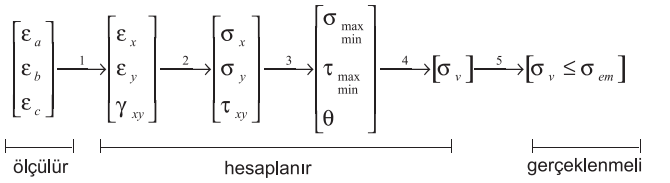
dir. Yukarıda bahsi geçen katsayılar ilgili uluslararası standardın verdiği tablolardan seçilir.

İŞ MAKİNALARINDA GERÇEK ÇALIŞMA ŞARTLARINDA DENEYSEL GERİLME ANALİZİ

Yukarıda da belirtildiği gibi, iş makineleri çok güç yükleme şartlarında çalışan makinelerdir. Yüklemeler genellikle değişken ve darbeli şekilde uygulanır. Bu bakımdan, tasarımın boyutlandırması, sayısal analizlerle (FEM Sonlu Elemanlar Metodu) gerçekleştirildikten sonra seri üretime geçmeden evvel, mutlaka prototip üzerinde gerçek çalışma şartlarındaki yüklemelerle deneysel gerilme analizi gerçekleştirilmelidir. Deneysel gerilme analizi, gerilme yönünden kritik olarak belirlenen çok sayıda noktaya Strain Gageler yapıştirılarak yapılır. Arazide, normal ve zor çalışma şartlarında, her bir noktadan şekil değiştirme bileşenleri

(strains) ölçülerek kaydedilir ve daha sonra mukavemet formülleri ile gerilme bileşenleri, asal gerilmeler ve bir kırılma hipotezi (failure theory) ile belirlenen eşdeğer mukayese gerilmesi (von Mises) hesaplanır. Bu gerilmelerin, malzemenin emniyet gerilmesinden, küçük olup olmadığı kontrol edilir. Gerekli durumlarda tasarım modifye edilir. Tek eksenli gerilme oluşan konumlara klasik, tek elemanlı strain gage, düzlem gerilme halinin olduğu konumlara da 3 elemanlı strain gage rozetleri yapıştırılır.

Seçilen üç doğrultudaki birim uzamalar ölçüldükten sonra aşağıdaki akış diyagramında görülen gerilme analizi adımları gerçekleştirilir.



Aşağıda, yerli olarak üretilen bir backhoe-loder üzerinde yapılan deneysel gerilme analizinde örnek sonuçlar verilmiştir. Ölçümlerde, önce tesis içinde özel olarak hazırlanan yükleme standında ölçümler gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, arazide olası en güç yükleme koşullarından bir paket oluşturularak, ölçümler yapılmıştır. Ölçümler sırasında, çok sayıda strain gageden, aynı anda ölçümleri kaydedebilmek için çok kanallı strain gage ölçüm sistemi kullanılmıştır. Dinamik analiz nedeniyle, her bir noktadan saniyede 1000 ölçüm kaydedilmiştir (örnekleme frekansı 1000 Hz).



Şekil 13. Test Standında Hidrolik Sistem ile Kepçinin Uç Trnağından Eksenrik Kuvvet Uygulanması



Şekil 14. Strain Gage Rozetlerinin Yapıştırıldığı Değişik Kritik Konumlardan Örnekler

Aşağıdaki tabloda, test standında yapılan yükleme şartlarından bir kısmı örnek olarak verilmiştir. Tekrarlanılabilirlik kontrolü için her bir test birkaç kere tekrarlanmıştır.

Test standında yapılan değişik yükleme koşullarında, ölçüm

Tablo 1. TEST 11xx ile Kodlanan Değişik Yükleme Halleri

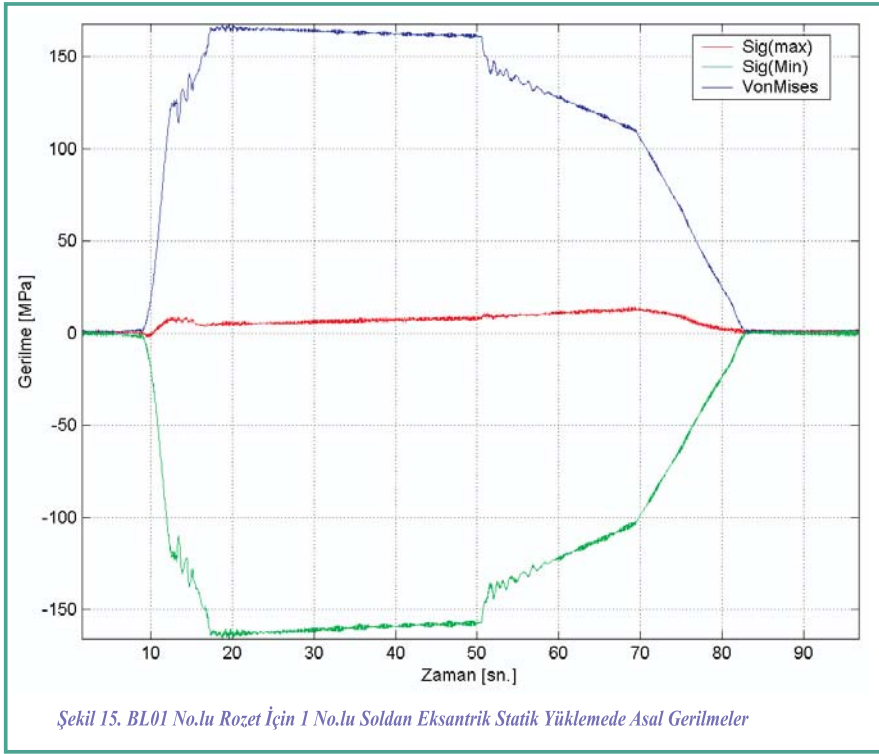
Hal1	Backhoe ile tekerlekler yerden kesilmesin diye dengeleme yapıldı. (Backhoe geriye doğru uzatıldı) Bu esnada değişimler kaydedildi. Budan sonraki tüm testler bu şartlarda gerçekleştirildi.
Hal 2	Yükleme ve Boşaltma (1 kez)
Hal 3	Yükleme ve Boşaltma (1 kez)
Hal 1	Yükleme ve Boşaltma (1 kez)
Hal 2	Yükleme ve Boşaltma (1 kez)
Hal 1	Yükleme ve Boşaltma (1 kez)
Hal 2	Yükleme ve Boşaltma (1 kez)
Hal 3	Kol koparma ile deneme yapıldı Yükleme ve Boşaltma (1 kez)
Hal 4	Kol koparma ile deneme yapıldı Yükleme ve Boşaltma (1 kez)

yapılan konumlardan birinde kaydedilen ölçümlerle hesaplanan asal gerilmeler ve von Mises gerilmelerinin değişimi aşağıdaki şekilde örnek olarak verilmiştir.

Arazide yapılan bir değişik yükleme koşulu ve ölçüm sonuçları ise aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

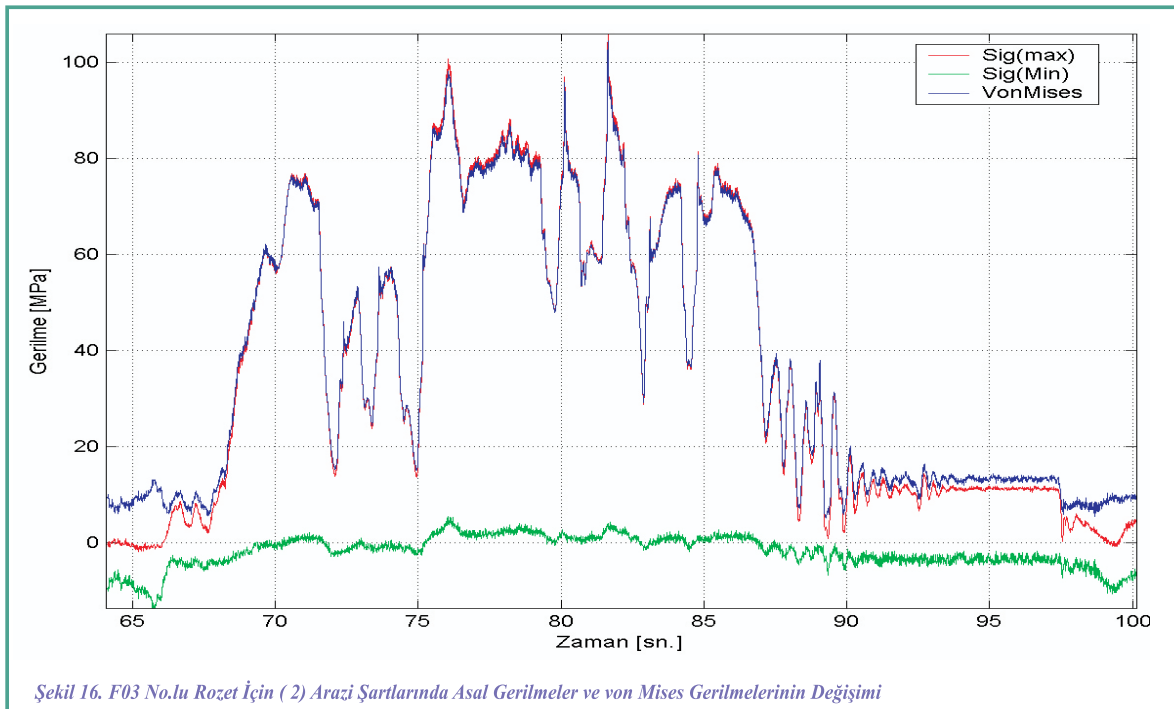
Tablo 2. Gerçek Çalışma Şartlarından Birinin Tanımı

TEST 1300, 1310, 1320, 1340, 1350	Makina, asfalt yola çıkartılmıştır. Kepçesine yaklaşık 3 tonluk yükleme yapılmış ve hız kesici tümseklerden de atlayarak belirli bir parkuru tamamlamıştır. Üç tonluk yük ile kepçede silkeleme hareketi yapılmıştır. Üç tonluk yük ile kepçede boşaltma ve tutma hareketi yapılmıştır. Veri almak için 500 Hz de örnekleme yapılmıştır. Deneyle her bir grup için yaklaşık aynı şartlarda tekrar edilmiştir.
-----------------------------------	--

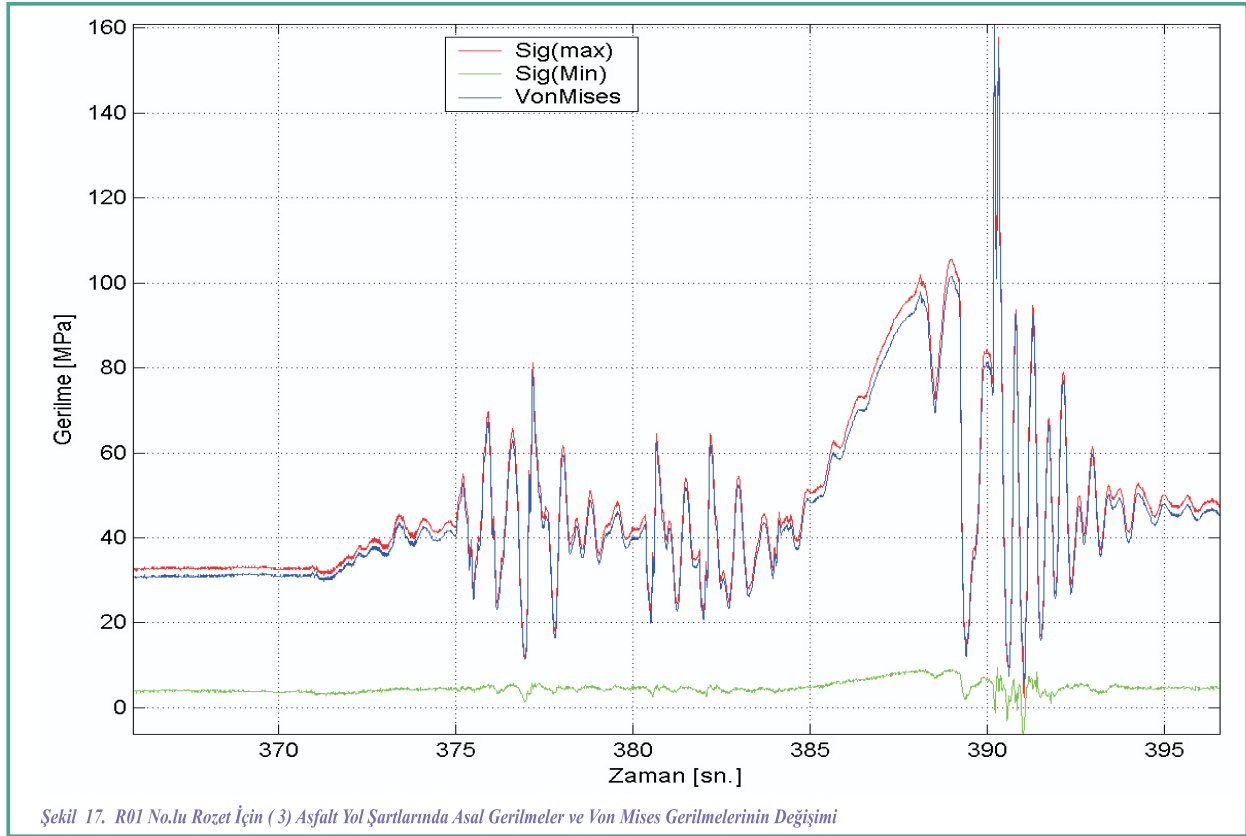


Tablo 3 : Ekskavatore Yol Üzerinde Yapılan Değişik Operasyonlarda Oluşan Gerilmelerin Maksimum Değerleri

TestNo	Hal No	GageNo	Sx	Sy	Txy	S1	S2	von Mises
1300	2	R01-A	4,2	38,9	4,5	39,5	3,7	37,8
1300	3	R01-A	13,3	150,5	42,2	162,4	1,4	161,7
1300	4	R01-A	10,3	138,4	25,2	143,2	5,5	140,5
1300	2	R02-A	4,9	15,5	12,3	23,6	-3,2	25,4
1300	3	R02-A	13,6	48,2	41,9	76,3	-14,5	84,5
1300	4	R02-A	5,8	37,3	33,0	58,1	-15,0	66,9
1300	2	R03-A	3,3	-7,3	5,0	5,2	-9,3	12,8



Ölçüm örnekleri verilen iş makinası üzerinde, arazide ve özel olarak hazırlanmış test standında, normal çalışma şartlarında karşılaşılabilecek en kötü yükleme şartları uygulanarak, belirlenen noktalarda strain gageler ile şekil değiştirme bileşenleri (strains) ölçülmüş, anında bilgisayara kaydedilmiştir. Uygulanan kuvvet sisteminin dinamik olması nedeniyle ölçümlerde her bir noktadan saniyede 1000 ölçüm (örnekleme frekansı 1000 Hz) kaydedilmiştir. Ölçümler, çok kanallı (64 kanal) Strain Gage Data Acquisition System ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sonucunda kaydedilen data değerlendirilerek, ilgili noktalardaki asal gerilmelerin (principal stresses) ve eşdeğer gerilmenin (von Mises Gerilmesi) zamanla değişimleri hesaplanmıştır. Daha sonra gerilmelerin yüksek olduğu konumlarda tasarım modifikasyonu için öneriler geliştirilmiştir.



SONUÇ

İş makinaları, zor yükleme ve çevre şartlarında çalışan, genellikle kaynaklı imalat yöntemi ile yapılan makinalardır. Bu makinaların gerek tasarım ve gerekse imalatı sırasında gerilme ve yorulma analizi yönünden çok titiz davranılması gerekmektedir. Bilhassa kesit tesirlerinin (eksenel kuvvet, kesme kuvveti, eğilme ve burulma momentleri) yüksek olduğu konumlarda gerilme yığılmalarına (stress concentration) neden olabilecek geometrilere ve imalat hatalarına çok dikkat etmek gerekecektir.

İş makinaları normal çalışma şartlarında dinamik kuvvetlerin etkisinde kaldığından, malzeme yorulması da çok önemli bir tasarım aşamasıdır. Çalışma şartlarında oluşan gerilmeler, malzeme için sınır değerleri aşmamasına rağmen, tekrarlı yüklemenin etkisi ile makina elemanlarında malzeme yorulması hasarları oluşur. Bu tip hasarlara pratikte çok sık rastlanır.

Gerek gerilme ve gerekse yorulma analizleri, tasarım aşamasında ilgili sayısal yöntemlerle (Sonlu Elemanlar Yöntemi vs. gibi) analiz edilerek boyutlandırılmalar gerçekleştirilir. Ancak bilhassa dinamik ve darbeli yüklerin uygulandığı konstrüksiyonlarda, sayısal yöntemlerle tekil noktadaki gerilme yığılmalarının gerçek değerlerini tanımlayabilmek genellikle mümkün olamamaktadır.

Ayrıca elemanlara uygulanan kuvvet sistemi ve değişimi de tam olarak bilinmemektedir. Bu nedenlerle, iş makinalarının tasarımından sonra üretilecek ilk prototip üzerinde, gerçek çalışma şartlarında dinamik gerilme analizi ve bazı kritik elemanlarda yorulma testi yapmak zorunlu hale gelmektedir.

KAYNAKÇA

1. **O.W. Blodgett**, "Design of Weldments", The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, 1976.
2. **T. Toprak, E. Bozdağ, E. Sünbülüoğlu**, "Hidromek - HMK 220 LC Ekskavator Bomunun Dinamik Gerilme Analizi", İ.T.Ü. Araştırma Projesi Raporu, Temmuz 2003.
3. **J.W. Dally, W.F. Riley**, "Experimental Stress Analysis", Mc Graw Hill, 1985.
4. **A.S. Khan, X. Wang**, "Strain Measurements and Stress Analysis", Prentice Hall, 2001.
5. **C.C.Perry**, "Te Strain Gage Primer", Mc. Graw Hill, 1962.
6. **T. Toprak, E. Bozdağ, E. Sünbülüoğlu**, "Rota Yapı İnşaat Ltd. Şti. ne Ait Volvo Ew170 Lastik Tekerlekli Volvo Ec240 Lc Paletli Ekskavatorlerin Bomunda Dinamik Gerilme Analizi", İ.T.Ü Araştırma Projesi Raporu, Ekim 2003.
7. **T. Toprak, E. Bozdağ, E. Sünbülüoğlu**, "Hidromek HMK 103 BX Pro Ekskavatorde Statik ve Dinamik Gerilme Analizi", İ.T.Ü Araştırma Projesi Raporu, Temmuz 2004.