

SÖNÜM MODELLER VE YAPISAL DİNAMİK ANALİZLERİN GÜVENİRLİĞİ

N. Shaban¹ ve A. Caner²

¹ *Doktora Öğrencisi, İnşaat Müh. Bölümü, ODTÜ, Ankara*

² *Doçent, İnşaat Müh. Bölümü, ODTÜ, Ankara*

Email: nefize.saban@metu.edu.tr

ÖZET:

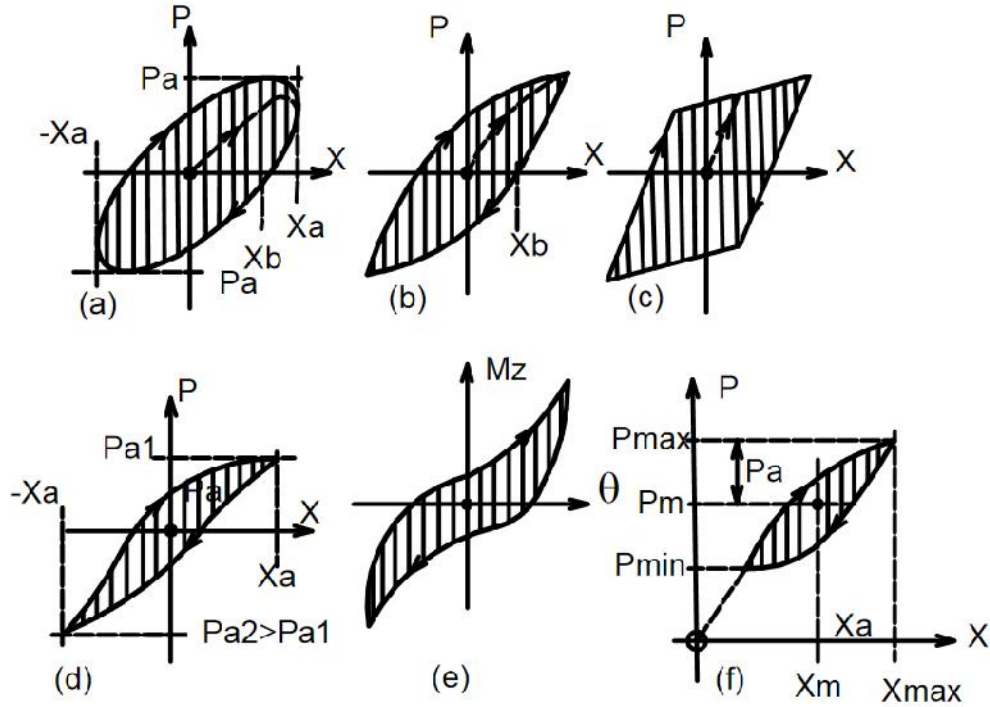
Yapısal dinamik analizlerin en önemli parametrelerinden biri sönüm modelidir. Sönüm oranının ve modelinin doğru (gerçeğe yakın) tayin edilmesi nümerik yapı modelinin gerçekçiliğini ve güvenilirliğini doğrudan etkilemektedir. Bu amaçla doğru bir tayin daha detaylı araştırmalar gerektirmektedir. Makale kapsamında, en yaygın kullanıma sahip olan sönüm modellerinin özellikleri ve yapısal dinamik analizler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapı özelliklerinin ve dinamik davranışının depremle sönüm modellerinin etkileri arasındaki fark da değerlendirilmiştir. Diğer yandan, sönüm oranındaki depremlik de sönüm modellerinin etkinlik alanları arasındaki farkı belirlemede oldukça önemlidir. Sönüm modeli tayinindeki bu etkenler sınıflandırılarak incelenmiş ve yapı özelliklerine göre dinamik analizlerde kullanılmak üzere sönüm modelleri için tavsiyeler verilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Yapısal dinamik analiz, Sönüm modeli, Nümerik model güvenilirliği

1. GİRİŞ

Sönüm, genel olarak, enerji kaybı sonucu yapıların dinamik tepkisini azaltan özellik olarak tanımlanır. Dolayısıyla sönüm, yapıların depreme dayanıklı tasarımında çok etkili bir parametredir, özellikle rezonans bölgesine yakın elemanlar için. Örneğin, sönüm oranının %0.5'ten %2'ye çıkması elemanların beklenen rezonans bölgesindeki deprem yükünü 2 katı ve üzeri kadar azaltabilmektedir. Rezonans bölgesinden uzaklaştıkça bu etki azalmaktadır. Sönüm, önemli olduğu kadar hassas da bir parametredir ve doğru tayin edilmesi yapısal dinamik analizlerin güvenilirliğini doğrudan etkilemektedir. Bununla birlikte sönüm, dinamik analizlerde ve depreme dayanıklı tasarımda belki de en az anlaşılan parametre ve analizlerin de en zayıf noktasıdır.

Sönüm, malzemelerin ve yapısal sistemlerin çok düşük gerilimler altında bile tamamıyla elastik davranmamasına dayalıdır. Birçok farklı şekilde meydana gelebilen bu inelastik davranış döngüsel yükleme altında enerji kaybına yol açar. Bu süreçte yutulan enerji ise gerilim-gerinme eğrisinin döngüsel yük altında çizildiği histerezis çevriminin iç alanı ile orantılıdır. Örnek histerezis çevrimleri şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Tipik do rusal ve do rusal olmayan histerezis çevrimleri

- (a) Do rusal malzeme için eliptik çevrim; (b) Yüksek gerilme altında metaller;
(c) Ba lantı noktaları; (d) Asimetrik çevrim; (e) Burulma altında kil; (f) Tek yönlü yüklemeye altındaki çevrim

Malzemelere ve yapısal sistemlere has olan sönüm özellikleri iki ana başlık altında sınıflandırılabilir: hızla bağımlı sönüm (rate-dependent damping) ve hızla bağımlı olmayan sönüm (rate-independent damping). İkinci sönüm türünde de yitilen enerji uygulanan yükün veya gerilimin genliğine bağımlı olabilir. Bunun haricinde hızla bağımlı (rate-dependent) sönüm yüklemenin hızına ve frekansına göre değişmektedir.

Sönümün önemli bir özelliği, yitilen enerjinin diğer koşullar sabitken gerilim genliğine göre nasıl değiştiğidir. Sönüm-gerilme bağıntılarının çoğu zaman karmaşık olmasına rağmen bazı reolojik mekanizmalar için bu bağıntı Denklem 1'deki gibi ifade edilebilir.

$$D = J\sigma_a^n \quad (1)$$

Bu durumda σ_a gerilim genliği; J ve n ise, J sönüm sabiti veya birim gerilim genliğinde yitilen enerji ve n de sönüm üstü olmak üzere malzeme sabitleridir.

Düşük gerilim genliklerinde iki koşul gözlemlenmektedir: (1) sönüm üstü $n = 2$ (ikinci derece sönüm) ve (2) eliptik histerezis çevrimi. Bu koşullar doğrusal viskoziteyi (ya da damper) tanımladıklarından, bu durum için "do rusal (lineer) sönüm" terimi kullanılmaktadır.

Orta ve yüksek gerilim genliklerinde iki çeşit doğrusal olmayan davranış gözlemlenmektedir: (1) eliptik olmayan histerezis çevrimleri ve (2) sönüm üstü n 'nin 2'den farklı, genelde daha büyük; değerleri olması.

Böylelikle hızla bağımlı sönüm ve hızla bağımlı olmayan sönüm iki ayrı başlığa ayrılabilir: (1) doğrusal (ikinci derece) sönüm ve (2) doğrusal olmayan sönüm.

2. DO RUSAL SÖNÜM

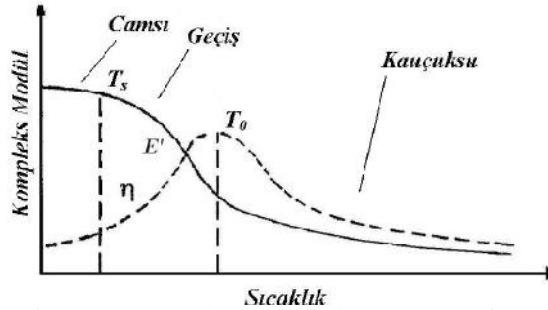
Metallerde düşük gerilimler altında ve polimer malzemelerde düşük ve orta seviyeli gerilmeler altında gözlemlenen görüngübilim (fenomenoloji) oldukça benzerdir ve do-rusal olarak tanımlanabilir. Ayrıca, iki malzeme türünde de frekansın (ve sıcaklığın) etkileri geveme (relaxation) olayıyla ilişkilendirilebilir. Fakat malzemelerin reolojik mekanizmaları oldukça farklıdır: metallerde anelastik ve ba-ka do-rusal mekanizmalar, polimerlerde ise viskoelastisite.

2.1. Metallerdeki anelastik mekanizmalar

Eğer bir numune düzgün (uniform) olmayan bir gerilime hızlı bir şekilde maruz kalırsa, numunenin yerel gerilme seviyelerine ve özelliklerine bağlı yerel (lokal) sıcaklık farklılıkları oluşmaktadır. Yükün numunedeki sıcaklık gradyanlarını yok edecek şekilde dağıtılmadığı durumda numunedeki bileşik sıcaklık gradyanları ısı akışı (heat flow) yaratmaya çalışır. Bu süreç, yüksek frekanslı (belirgin bir ısı akışı için gerekli olan zamandan çok daha küçük bir periyot) titreşimlerde ısı değişimsiz ve tersinebilirdir (adiabatic and reversible). Böylelikle döngüsel ısı akışı çok hafif ve gözlemlenen sönüm de çok düşüktür. Buna karşılık, çok düşük frekansta süreç eşit (izotermal) ama hala tersinebilirdir ve yutulan enerji yine çok düşüktür. Ama döngüsel gerilmelerin periyodu önemli bir ısı akışı için gerekli olan zamana benzer ise mekanik enerji tersinemez şekilde ısıya dönüşür ve sönümleme gözlemlenir.

2.2. Polimerlerde etki eden sıcaklık-frekans parametreleri

Polimerlerde görülen dağılım (dispersiyon) olayları polimer özelliklerini frekansa ve ısıya önemli derecede bağlar. Depolama modülü ve kompleks modül, frekansın artmasıyla veya sıcaklığın azalmasıyla kritik bir bölgede oldukça hızlı bir artış göstermektedir. Bu kritik bölgede sönüm modülü (loss modulus) ve sönüm tanjantı (loss coefficient) en yüksek değerlerine ulaşır. Bu etkiler şekil 2’de “tipik” bir viskoelastik malzeme için verilmiştir.



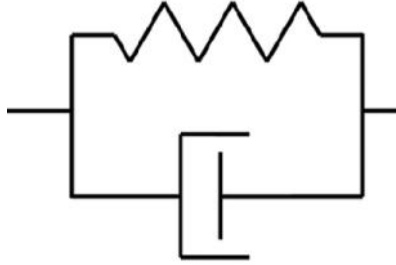
ekil 2. Sıcaklık ve frekansın depolama modülü ve sönüm faktörü üzerindeki etkisi

Düşük frekanslarda (veya yüksek sıcaklıkta) “kauçuksu” olarak adlandırılan bölgede gerilimdeki yavaş değişimleri geveme süreci izler (ikisi de aynı fazda) ve neticede salanan denge enerji yutulmasına katkı sağlamaz. Böylelikle “kauçuksu” bölgede bütün modüller ve sönüm değerleri oldukça düşüktür. Frekansın ve sıcaklığın aralarında için sönüm modülünün en yüksek olduğu “geçiş” bölgesi gözlemlenmektedir. Bu bölgede gözlemlenen döngüsel gerilimdeki faz farkı (phase lag) enerjiyi yutan bir mekanizma oluşur. Yüksek frekanslarda (veya düşük sıcaklıkta) depolama modülü deeri yüksektir, sönüm modülü ise oldukça küçüktür ve bu davranış katı bir elastik malzemeyi andırır. “camı” olarak adlandırılan bu bölgede malzemedeki geveme gerilim izleyebilecek kadar hızlı meydana gelemez ve malzeme bu yüzden elastik davranışa yakın bir davranış sergiler. Bütün bu gözlemlerde frekanstaki artışın etkisi sıcaklıktaki düşüşün etkisine eşit değildir.

2.3. Modelleme

2.3.1. Voigt modeli

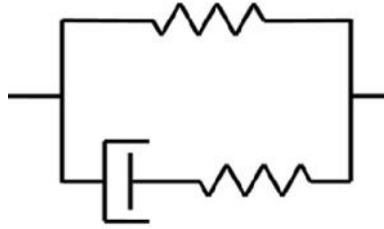
Bu model (Voigt cisim) gecikmeli elastik davranış olarak da anılan viskoelastik davranışı gösterir. Kelvin cisminde bulunan yay ve yavaş kutusu elemanları birlikte uyum içinde hareket ederler (her ikisinin de gösterdiği deformasyon aynıdır). Uygulanan yüke yavaş kutusu yavaşça açılarak karşılık verir. İlk önce bütün gerilme yavaş kutusunun üzerinde iken, uzama payı arttıkça gerilim yavaş yavaş yavaş geçecektir. Bu modelde yavaş paralel bağlanmış yavaş kutusu, elastik yayın dengeye gelmesi sırasında sönüm direnci gösterir. Bu sebeple elastik geri toparlanma gecikmeli olarak gözlemlenir. Modelin matematik çizimi şekil 3’te gösterilmiştir.



ekil 3. Voigt modeli

2.3.2. 3 Parametrelı anelastik model

Voigt modelinin kısıtlamalarına ve kusurlarına karın ekil 4’te verilen 3 parametrelı anelastik model anelastik davranı en iyi modelleyen en basit modeldir.



ekil 4. 3 Parametrelı anelastik model

3. DO RUSAL OLMAYAN SÖNÜM

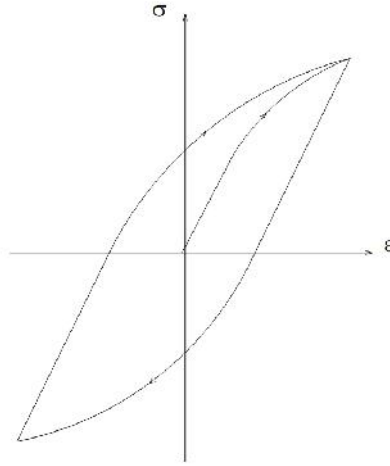
Küçük genlikteki gerilim veya gerilim altında metaller, polimer ve elastomerler genelde hıza ba lı do rusal sönüm sergilemektedir. Belirgin derecede do rusal olmayan davranı n gözlemlendi i durumlar ise yüksek gerilim altında yapı malzemelerinin ço unda; genel olarak metallerde, betonda, camı ve jeolojik malzemelerde.

Gerilim genli inin artmasıyla, özellikle yorulma sınırına yakın, sönümün de hem genli i hem de do rusal olmama derecesi artmaktadır. Do rusal olmayan histerezis çevrimleri üzerinde gerilim genli i ve gerilim belle i (stress history) etkilidir.

3.1. Metaller

Metallerdeki sönüm faktörü genli e ba lı (sönüm üstü n genelde 2’den büyük) ve frekanstan ba ımsızdır. Belirli bir gerilim genli inin üzerinde sönüm faktörü hızlı bir ekilde artmaktadır ve gerilim belle i de sönüm üzerinde önemli ölçüde etkili olabilmektedir.

Simetrik malzemelerin hıza ba lı olmayan histerezis çevrimlerinin “tipik” ekli ekil 5’te gösterilmi tir. Sivri uçlu olan bu çevrimler, do rusal malzemelere has olan eliptik histerezis çevrimlerinden birçok önemli noktada farklılık göstermektedir. Do rusal olmayan bu çevrimler iki tane pürüzsüz e riden olmaktadır. Bu e rilerin kesiti i noktalarda histerezis çevriminin sivri uçları meydana gelir, özellikle orta seviyeli gerilmeler altında.



ekil 5. Hıza bağılı olmayan sönüme has sivri uçlu histerezis çevrimi

Dinamik analizlerde kullanılmak üzere sönüm özellikleri üç farklı şekilde ifade edilebilir: (1) sönüm kuvveti (ya da kutusu veya viskoz kuvvet); (2) histerezis çevriminin gerilim-gerinim denklemleri veya (3) histerezis çevriminin içindeki alan (bir çevrimde yutulan enerji). Sönüm kuvveti temsili doğrusal sönüm ve doğrusal olmayan hıza bağılı sönüm için uygundur ama histerezis çevrimlerinin sivri uçlu olduğu doğrusal olmayan enerji kaybı için genelde uygundur.

Doğrusal malzemeler için çok yüksek sönümde veya geniş çevrimlerde bile tek bir depolama modülü tanımlanabilir. Ama doğrusal olmayan çevrim geniş ise tek bir depolama modülü tanımlanamaz ve gerinimin elastik bileşenini (gerinim enerjisi depolayan bileşen) sönümleyen bileşenden ayırt etmek oldukça zordur.

Histerezis çevrimiyle ifade edilen yutulan enerji çevrimin iç alanıyla Denklem 2’de belirtilen şekilde orantılıdır.

$$D = H\sigma_a\varepsilon_b \quad (2)$$

Burada H histerezis çevriminin eğiline bağılı bir katsayı; ε_b ise histerezis çevriminin sıfır gerilimdeki yarı genişliğidir. H sabitinin değeri için üst sınır dikdörtgen histerezis çevrimini ifade eden 4’tür. Alt sınır ise iki üçgenden oluşan histerezis çevrimi için elde edilen 2’dir. Bu iki sınır değer arasındaki $H = 2.7$ pratikte kullanılan metallerin davranışını makul bir biçimde yansıtabilmektedir.

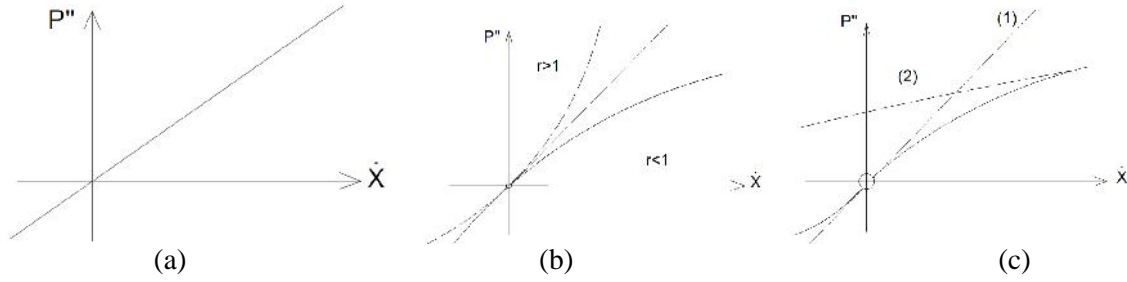
3.2. Diğer Malzemeler

Elastomerlerde %25 oranındaki gerinim ve üzerinde doğrusal olmayan davranış gözlemlenmektedir.

3.3. Modelleme

3.3.1. Hıza bağılı sönüm elemanları

Yapı malzemelerinin gerçekteki davranışını ifade etmek için farklı doğrusal olmayan sönüm kutu modelleri geliştirilmiştir. Ekil 6’da gösterilen bu modellerden (a) Newton cisimi (lineer sönüm kutusu) tek parametrelidir. Ekil 6 (b) ve (c)’de verilen modeller ise iki parametrelidir ve bazı malzemelerin davranışını daha gerçekçi yaklaşımlardır. Bütün modellerde P'' sönüm kutusundaki kuvveti temsil eder.



ekil 6. Do rusal olmayan viskozite modelleri

- (a) Do rusal viskozite (Newton ismi) $P'' = \mu_s \dot{X}$; (b) Üstlü viskozite (power law viscosity) $P'' = \mu_u \dot{X}^r$;
(c) Hiperbolik viskozite $\dot{X} = \mu_u \sinh DP''$

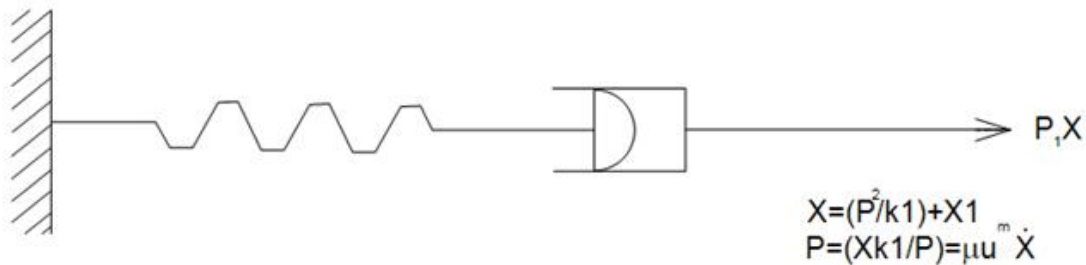
ekil 6'da verilen modellerin hızla bağımlı do rusal olmayan sönüm elemanlarının hiçbirisi viskozitenin zamanla değişim ve "yaşlanma" etkilerini modelleyememektedir. Bu etkiler ise metallerde, betonda ve diğer yapı malzemelerinde sönüm, sünme ve geveme olaylarının analizleri için önemlidir. Denklem 3 ile verilen zamanla bağımlı viskozite bağıntısı yaşlanma olaylarını ifade eden bağıntılardan biridir.

$$P'' = \mu_u t^m \dot{X} \quad (3)$$

Burada μ_u viskozite katsayısı; m yaşlanma üstü; \dot{X} de gerinim hızı. Eğer $m < 0$ ise malzemenin zamanla katılabilirliğini göstermektedir (P'' ve histerezis çevriminin genliği zamanla azalır). Eğer $m > 0$ (zamanla genleşen çevrim) ise malzemede zamanla yumuşayan viskozite veya döngüsel yumuşama gözlemlenmektedir. Bu iki durum da gerçek malzemelerde gözlemlendiği için bu bağıntı önemlidir.

3.3.2. Hızla bağımlı sönüm elemanları ve yaylar

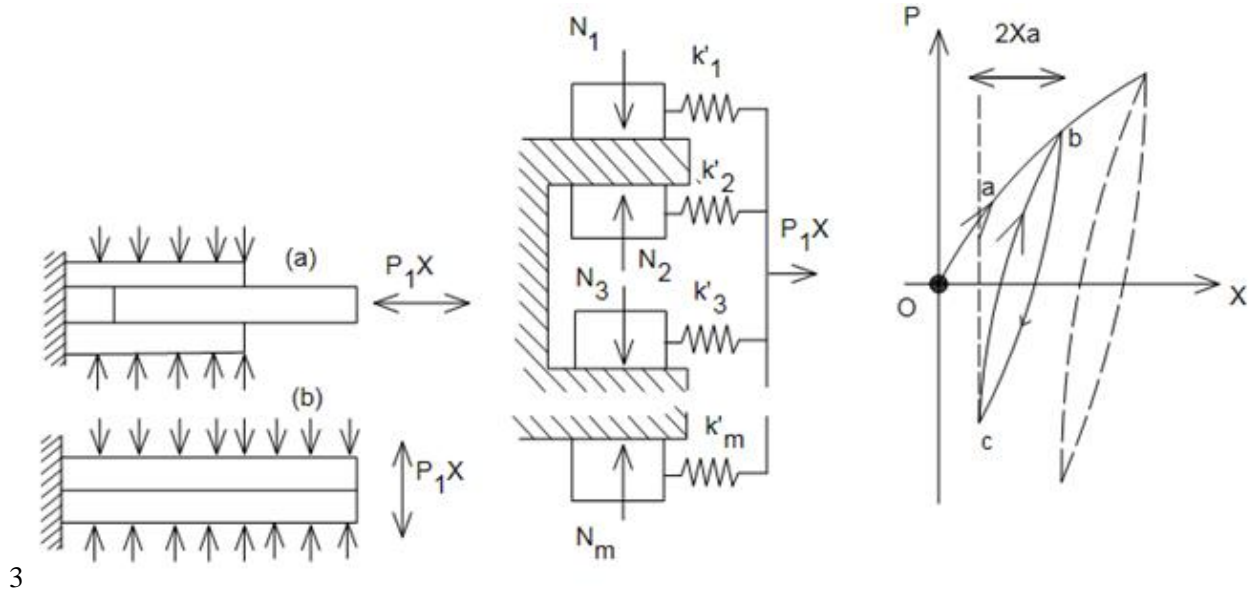
ekil 6'te verilen modellere yaylar ilave edilerek yeni modeller oluşturulabilir. Hata daha gerçekçi bir temsil için yaylar do rusal olmayabilir (elastik enerji sönümlenmeyen elemanlar). ekil 7'de buna örnek bir model verilmiştir. Bu model do rusal olmayan sönüm kutusu ve do rusal olmayan yay içermesinin haricinde yaşlanma etkilerini de modeller. Beton üzerindeki deneysel veriler bu modelin betonun davranışını gerçekçi ifade edebildiğini göstermektedir.



ekil 7. Do rusal olmayan yay-sönüm kutusu modeli

3.3.3. Hızla bağımlı olmayan Coulomb kayma modelleri

Bu modellerin viskoelastik malzeme modellerinden farkı, sönüm kutusunun yerine Coulomb kayma elemanı içermesidir. Bu modeller hızla değil de gerinim ve gerilim genliğine bağımlı özellikleri ifade eder. Yapıların birleşme yerlerindeki davranış için ekil 8'deki modeller kullanılabilir.



ekil 8. Yapı birle im yerlerindeki davranı ı modelleyen Coulomb kayma elemanları

4. RAYLEIGH SÖNÜM MODEL

Yapısal dinamik analizlerde en yaygın olan sönüm modeli doğrusal viskoz sönümü modelleyen Rayleigh sönüm modelidir. Bu modelin yaygın olarak kullanılmasının sebebi yapısal sistemin kütesinin ve katlı lının orantılı toplamı olması sonucu hesaplamalarda sağladığı kolaylıktır. Rayleigh sönüm modeli kullanıldığında sönüm matrisi [C] Denklem 4 ile ifade edilebilir.

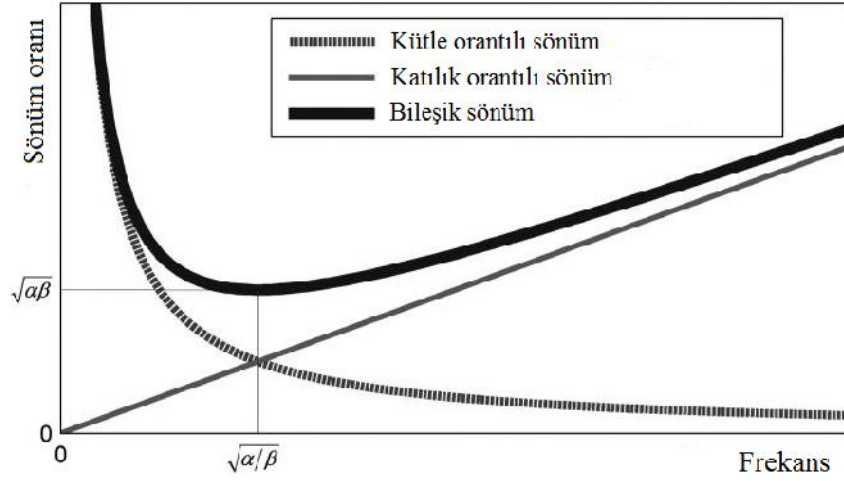
$$C = \alpha M + \beta K$$

(4)

Burada [M] yapısal sistemin kütle matrisi, [K] ise katılık matrisidir. α ve β ise sırasıyla (s^{-1}) ve (s) birimine sahip katsayılardır. Buna göre sistemin i modunun sönümü, ξ_i , Denklem 5 ile verilmektedir.

$$\xi_i = \frac{1}{2\omega_i} \alpha + \frac{\omega_i}{2} \beta \quad (5)$$

Burada ω_i sistemin i modunun dairesel frekansıdır. Yukarıda verilen bilgilerden, α ve β katsayılarının sistemin iki modu için belirlenmiş sönüm oranlarını sağlayacak şekilde tayin edilebileceği görülmektedir. Bu durumda sistemin diğer modlarına Denklem 5'e göre hesaplanan sönüm oranları tayin edilmektedir. Sönüm oranının frekansa göre değişimi ekil 9'da verilmiştir.



ekil 9. Rayleigh sönüm modeli

Rayleigh sönüm modelinin katılı a orantılı kısmı Voigt modelini (viskoelastisite modeli) ifade etmektedir. Kütleyle orantılı olan kısım ise yapısal sistemin serbestlik derecelerinin viskoz sönümleyicilerle sabit desteklere bağlanması modellemektir; yani gerçekte var olan bir elemanı modellemez ama modal sönüm oranları üzerinde ilave kontrol sağlığı için kullanılmaktadır.

Doğrusal viskoz sönüm modeli olan Rayleigh sönüm modeli, daha önce detaylı bir şekilde ifade edilen doğrusal ve doğrusal olmayan sönüm mekanizmalarını sınırlı bir alanda gerçekçi olarak ifade edebilmektedir. Deprem analizlerinin formülasyonunda toplam hareket kullanıldığında kütle orantılı sönümden dolayı çok yüksek sönümleme kuvvetleri oluşmaktadır. Bu sorun, formülasyonlarda yere göre göreceli hareket kullanılarak giderilebilir. Temel yalıtımı kullanılan sistemlerde ise Rayleigh sönüm matrisi sadece üst yapının katılı olarak oluşturulduğunda kütle orantılı kısımdan dolayı sönümleme kuvvetleri gerçek değerlerinin çok üstünde hesaplanmaktadır. Rayleigh sönüm modelinin katılık orantılı kısmından dolayı ise doğrusal olmayan analizlerde yumuşama gerçeği tanımlanmaz ve sönüm matrisinde de bağımsız katılı olarak kullanıldığında, sönüm kuvvetleri yine gerçek değerlerin çok üstünde hesaplanmaktadır. Bu sorunlara genel bir çözüm olarak kütle orantılı sönüm kısmının kullanılmaması ve katılık orantılı sönüm kısmı için de bir sınır belirlenmesi önerilmektedir.

5. SONUÇLAR

Sönüm, dinamik analizlerin çok önemli ve hassas bir parametresidir ve modellenmesi analiz sonuçlarının güvenilirliğini doğrudan etkilemektedir. Sönümü oluşturan mekanizmaların ve reolojik süreçlerin çeşitliliği ve karmaşıklığı sönümün modellenmesini oldukça zorlaştırır ve onu analizlerin en zayıf noktası haline getirir. Bu çeşitlilik ve karmaşıklığa karşın en yaygın olarak kullanılan sönüm modeli doğrusal viskoz Rayleigh sönüm modelidir. Sönümün reolojik süreçleri ve Rayleigh modelinin kullanımında dikkat edilmesi gereken hususlar bildirisi içerisinde verilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmaya verdikleri destekten dolayı TÜBİTAK BİDEB 2215 Programı'na teşekkür ederiz!

KAYNAKLAR

Deepak, R., Wijeyewickrema, A. C. And ElGawady, M. A. (2013). Appropriate viscous damping for nonlinear time-history analysis of base-isolated reinforced concrete buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **42**: 2321-2339.

3. Türkiye Deprem Mühendisli i ve Sismoloji Konferansı
14-16 Ekim 2015 – DEÜ – ZM R



Erduran, E. (2012). Evaluation of Rayleigh damping and its influence on engineering demand parameter estimates. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **41**: 1905-1919.

Hall, J. F. (2006). Problems encountered from the use (or misuse) of Rayleigh damping. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **35**: 525-545.

Lazan, B. J. (1968). Damping of materials and members in structural mechanics, Pergamon Press, Oxford, U.K.