



Araştırma Makalesi

BETONARME KİRİŞLİ KONSOL DÖŞEMELERDE BASINÇ DONATISI ORANININ UZUN SÜRELİ DEFORMASYONLARA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF COMPRESSION REINFORCEMENT RATIO ON LONG-TERM DEFORMATIONS IN REINFORCED CONCRETE CANTILEVER BEAM-SLAB SYSTEM

Furkan BİRDAL^{1*}  0000-0002-2243-418X
Oğuzhan YÜKSEL²  0009-0006-5886-2190
Mehmet Mustafa ÖNAL³  0000-0002-9682-2214

Makale Bilgileri	ÖZET
Anahtar Kelimeler: Kirişli Konsol Döşeme, Basınç Donatısı Oranı, Uzun Süreli Deformasyon, Sonlu Eleman Analizi	Günümüzde inşaat sektöründe yeni yapısal sistemlerin inşasına yönelik artan ihtiyaç, çeşitli yenilikçi mimari yaklaşımların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte, bir yapının taşıyıcı sisteminin tasarımında öncelikli kural statik emniyet ilkesidir. Bu nedenle, mimari açıdan avantajlar sunan bir tasarımın statik açıdan detaylı bir şekilde analiz edilmesi büyük önem taşımakta ve yapının ekonomik ömrü açısından da önem arz etmektedir. Bu makalede, mimari avantajlar sunan kirişli konsol döşemelerde basınç donatısı oranının uzun süreli deformasyonlara etkisi ele alınmıştır. İnşaat sektöründe yapı tasarımı ve uygulamalarında yenilikçi yaklaşımlar geliştirilse de sahada geleneksel yöntemlerin daha yaygın olarak uygulandığı gözlemlenmektedir. Uzun süreli deformasyonlar belirli mühendislik yaklaşımlarıyla tahmin edilebilmekle birlikte, öngörülemeyen bazı belirsizlikler içerebildiğinden, güvenli tasarım açısından dikkate alınmaları gerekmektedir. Zira birçok parametre, uzun süreli deformasyonları önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bu çalışma kapsamında, sahada uygulama karşılığı olan bir tasarım yaklaşımı analiz edilmiştir. Gerekli izinler alınarak, iki katlı ve kirişli konsol çıkması bulunan bir yapı modellenmiştir. Yapının yapısal sistem analizi, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarımda yer alan kirişli konsol döşemelerin uzun süreli deformasyon değerlendirmesi, TS500 Betonarme Elemanlarda Kullanılabilirlik bölümünde yer alan formülasyonlar esas alınarak yapılmıştır. Bu formülasyonlarda, kesitteki basınç donatısı oranı değiştirilerek uzun süreli deformasyonların hangi oranda etkilendiği sayısal olarak incelenmiştir. Basınç donatısı oranının

^{1*} Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, fbirdal@ahievran.edu.tr

² Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, yuksel.oguzhan@ogr.ahievran.edu.tr

³ Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, mmonal@ahievran.edu.tr

Sorumlu yazar: fbirdal@ahievran.edu.tr

Başvuru tarihi:24.06.2025; Düzeltme Tarihi 30.06.2025; Kabul Tarihi 08.07.2025

taşıma gücü açısından yeterli olduğu durumlarda dahi, kullanılabilirlik sınır durumu açısından taşıdığı önem değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda, TS500 standardında belirtilen sehim sınırları çerçevesinde; ani sehim ve uzun süreli sehim yönünden değerlendirmeler yapılmıştır. Bu makaleyle, günümüzde mimari açıdan tercih edilebilirliği artmakta olan kirişli konsol döşemeli yapı tasarımlarında, statik emniyetin artırılmasına yönelik yaklaşımlara katkı sağlanması amaçlanmıştır.

Article Info	Abstract
Keywords: Reinforced Concrete Cantilever Slab with Beams, Compression Reinforcement Ratio, Long-Term Deformation, Finite Element Analysis	With the increasing demand for the construction of new structural systems in today's construction industry, various innovative architectural approaches have emerged. Nevertheless, the foremost rule in the design of a structural system remains the principle of structural safety. Therefore, conducting a detailed structural analysis of a design that offers architectural advantages is of great importance—not only for ensuring safety but also for maximizing the service life of the structure. This study investigates the effect of the compression reinforcement ratio on long-term deformations in cantilever slabs with beams, which offer certain architectural benefits. Although innovative approaches in design and implementation continue to develop in the construction industry, traditional methods are still more commonly used in practice. While long-term deformations can be estimated using engineering approaches, they may also involve unforeseen uncertainties, making them a critical consideration for safe design. Many parameters can significantly influence long-term deformations. In this context, the study focuses on a design approach that corresponds to real-life construction practices. A two-story structure featuring cantilever beams was modeled upon obtaining the necessary permissions. The structural system was analyzed using the finite element method. Long-term deformation assessments of the cantilever slabs were carried out in accordance with the formulations provided in the “Serviceability of Reinforced Concrete Elements” section of TS500. By varying the compression reinforcement ratio in the cross-section, the extent to which long-term deformations are affected was examined numerically. Even if the compression reinforcement ratio satisfies strength requirements, its significance in terms of serviceability limit states was also evaluated. As a result, deflection limits specified in the TS500 standard were used to assess both immediate and long-term deflections. It is hoped that this study will contribute to enhancing structural safety in the design of cantilever slab systems, which are increasingly preferred for their architectural appeal in contemporary practice.

1. GİRİŞ

Betonarme yapıların taşıyıcı sistemlerinin tasarımında taşıma gücü ve kullanılabilirlik önemli sınır durumlar olarak tanımlanmaktadır. Yapısal sistemlerin tasarımında yenilikçi mimari yaklaşımların artmasıyla birlikte, deformasyonlardan kaynaklanan kullanılabilirlik sınır durumu, tasarımda belirleyici bir faktör haline gelmiştir. TS500 standardında 13. Bölümde Betonarme Elemanlarda Kullanılabilirlik kavramı ifade edilmiştir. Bu tanımda özet olarak yapıda ve yapı elemanlarında taşıma gücü açısından yeterliliğin sağlanmasının yanı sıra yapısal elemanlarda veya yapının tamamında sistemin aşırı şekil ve yer değiştirmeye neden olmayacak biçimde tasarlanmasının gerektiği belirtilmiştir (TS500,2020). Bu kapsamda, ani sehim sınırlandırılmasında, yapısal elemanlarda oluşan eğilmede çatlama momenti ve elemanda oluşan maksimum moment dikkate alınırken uzun süreli sehimlerde ani sehime ilave olarak sünme ve büzülme etkisi ile oluşan ilave deformasyonlar da göz önüne alınmaktadır (Denklem 1, Denklem 2).

$$\delta_t = \delta_i + \delta_{ig} \lambda$$

Denklem 1 (TS500)

$$\lambda = \frac{\gamma_t}{1 + 50\rho'}$$

Denklem 2 (TS500)

δ_t : Toplam sehım

δ_i : Ani sehım

δ_{ig} : Kalıcı yüklerden oluşan ani sehım

γ_t : Kalıcı yük süre katsayısı

λ : Kalıcı sehım katsayısı

ρ' : Basınç donatısı oranı

Kalıcı yük etkisinde oluşan bu deformasyonlarda, kalıcı yük süre kat sayısı, kesitte bulunan basınç donatısı parametrelerinden oluşan λ sehım kat sayısı hesaplanarak toplam sehım belirlenmektedir. İnşaat sektöründe güncel tasarımların taşıyıcı sistem üzerindeki etkilerinin kısa ve uzun süreli davranış açısından ortaya konması yapının ekonomik ömrü açısından önemli hale gelmiştir. Betonarme yapılarda deformasyonların doğru bir şekilde tahmin edilmesi ve analizi, yapının servis ömrü ve statik güvenliği açısından etkilidir. Günümüzde bilgisayar teknolojisinin gelişmesi, ileri analiz ve modelleme teknikleri göz önüne alındığında tasarımcı mühendisler açısından deformasyonların daha gerçekçi tahmini mümkün hale gelmiştir. Ülkemizde kullanılan statik tasarım yazılımları deformasyonların açısından TS500'de verilen denklemleri esas almaktadır. Bundan dolayı makalede sonlu elamanlar analizi sonucu yapılan değerlendirmelerde Denklem 1 ve 2 kullanılmıştır. Betonarme yapılarda deformasyon sınırları hesabında uluslararası standartlara yönelik yapılan araştırmalarda, uzun süreli sehımler açısından sünme ve büzülme etkilerine bağlı deformasyonların hesabı için bir çarpanın kullanıldığı görülmüştür (ACI,2004). Betonarme elemanlarda ve yapılarda deformasyon analizinin önemine yönelik yapılan literatür taramasında bu hususun tasarımda önemini vurgulayan araştırmalar incelenmiştir. (Al-Sunna ve ark.,2012), Fiber polimerler ile güçlendirilmiş kiriş ve döşemelerin deformasyon davranışını araştırdıkları makalede deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yirmi dört betonarme fiber polimerler ile güçlendirilmiş kiriş ve döşeme numunesi üzerinde gerçekleştirdikleri deneysel araştırmada, fiber polimerler ile güçlendirilmiş betonarme elemanların tasarımında kullanılabilirlik sınır durumunun önemli olduğu ancak bu kapsamda gerçekleştirilen analizlerin uzun sürdüğü ve tasarım için basitleştirilmiş yöntemlere ihtiyaç duyulduğu vurgulanmıştır. Ayrıca çalışmada kısa süreli deformasyonların tahmin edilmesinde çatlama momentinin hesaplanmasının da önemli olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada her ne kadar güçlendirilmiş betonarme elemanlarda deformasyon analizleri ele alınmış olsa da kullanılabilirlik sınır durumu için yapılan hesaplamaların basitleştirilmiş bir yaklaşımla değerlendirilebileceği görülmüştür (Al-Sunna ve ark.,2012). Makalede konsol kiriş-döşeme sistemlerinde TS500'de verilen denklemlerin tasarımcılar açısından pratik hesaplamaya olanak sağladığı değerlendirilmiştir. Ayrıca TS500'e göre ani sehımlerinin hesabında da çatlama-eğilme momentinin dikkate alındığı yukarıda detaylandırılmıştır. Literatürde uzun süren deformasyonların oluşumunun sünme ve büzülme etkisi parametrelerine bağlı olduğu belirtilmektedir. Sünme ve büzülme etkileri birçok farklı etkene bağlı olarak değişebilmektedir. Bu etkiler, uzun süreli deformasyonlar açısından oldukça önemlidir. Uzun süreli deformasyonlar, sadece kullanılabilirlik sınır durumu açısından değil taşıma gücü açısından da sorunlar ortaya çıkarabilmektedir. Artan deformasyonlar ile ön görülemeyen kesit tesirleri oluşabilmekte ve bu durum taşıma gücünü olumsuz etkileyebilmektedir. Bununla birlikte uzun süreli deformasyonlarda çatlaklar gözlemlenebilmektedir. Tüm bu etkiler gözle görülebilir deformasyon ile birleşince hem statik emniyet açısından hem de mimari kullanım açısından olumsuz sonuçlar ortaya çıkarabilmektedir. Başka bir çalışmada (Loewe ve ark., 2023), sehım hesaplama yöntemlerinin kesin sonuçlar vermediğini ve bu kapsamda gerçekleştirilecek analizlerin uzun sürdüğünü belirtmişlerdir. Buna rağmen sehım hesaplamalarının tasarımın erken aşamalarında hesaplanmasının gerekli olduğunu, eğilme etkisi altındaki betonarme elemanların boyutlandırılmasında bu etkinin dikkate alınması gerektiğini vurgulamışlardır. Döşemeler gibi eğilme elemanlarında; minimum kalınlık, döşemenin açıklığı, narinlik oranı gibi parametrelerin deformasyon açısından önemli olduğu ifade edilmiştir. Çalışmada, betonarme döşemelerdeki uzun süreli etkilere göre döşeme kalınlığının belirlenebilmesine yönelik yaklaşımların olduğu ancak farklı yöntemlerle güçlendirilmiş döşemelerde pratik hesaplamaya yönelik yaklaşımların yeterli olmadığı belirtilmiştir (Loewe ve ark., 2023). Ayrıca literatürde, uzun süreli deformasyon etkilerinin dikkate alındığı eğilme altındaki elemanların tasarımına yönelik çeşitli deformasyon formülasyonları da mevcuttur. Bu yöntemlerle uzun süreli deformasyon parametresi hesaplanabilmektedir. Literatürde Rangan-Scanlon yöntemi olarak ifade edilen bu yaklaşımda kalıcı yükler için uzun süreli deformasyon çarpanı elde edilmektedir. Uzun süreli deformasyon çarpanının, TS500'de verilen

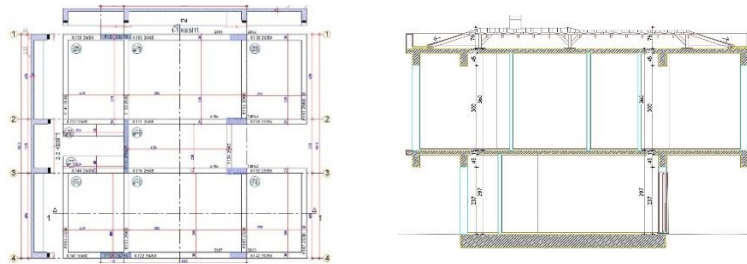
Birdal¹ ve ark.

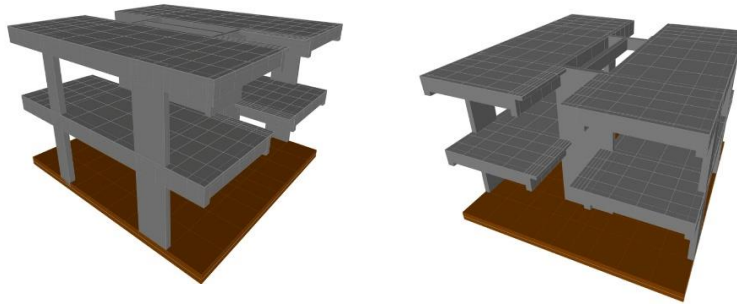
denklemden olduğu gibi süre faktörü ve basınç donatısı oranına bağlı olduğu görülmüştür. Ancak bu yöntemde toplam deformasyon hesabında sınır şartlarına bağlı deformasyon kat sayısı, efektif atalet momenti, ilave hareketli yük gibi parametreler de hesaplamalarda dikkate alınmaktadır (Loewe ve ark., 2024). Başka bir çalışmada (Ahmadi-Nedushan ve ark.,2024), tek yönlü döşemelerde malzeme maliyeti optimizasyonu yapmışlardır. Şehim sınırlandırmalarının döşemelerin servis yükleri altındaki ani ve uzun süreli deformasyonlarını kontrol ederek yapısal bütünlüğün korunmasında önemli olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada kullandıkları optimizasyon yöntemi ile konsol döşemelerde; döşeme kalınlığı, donatı çapı ve donatı aralığı parametreleri dikkate alınarak maliyet optimizasyonunu etkili bir şekilde yapabildiklerini göstermişlerdir. Sürekli mesnetlenen döşemelerin yük dağılımı ve azaltılmış eğilme momentleri etkisine bağlı olarak ekonomik tasarımın yapılabileceğini ortaya koymuşlardır (Ahmadi-Nedushan ve ark.,2024). Dolayısıyla konsol döşemelerin davranışında, döşeme kenarlarının mesnetlenmesinin yük dağılımı açısından önemli olduğu anlaşılmaktadır. Makalede örnek olarak seçilen tasarımda konsol döşemelerin dört kenarı da kirişlere mesnetlenmektedir.

Döşeme çalışma yönü doğrultusundaki kenarları konsol kirişlere mesnetlenmeyen tek doğrultulu konsol döşemelerin kısa ve uzun süreli deformasyonlar açısından daha hassas olduğu söylenebilecektir. Makalede yapılan analizlerde sonlu elemanlar yöntemi kullanılmış, ancak sadece ani deformasyonların belirlenebilmesine yönelik doğrusal analiz yapılmıştır. Literatürde çatlak etkilerinin de dikkate alındığı doğrusal olmayan analiz yaklaşımları ile uzun süreli deformasyonlar daha gerçekçi belirlenebilmektedir. Ancak çatlak etkilerinin de göz önüne alındığı doğrusal olmayan analiz yaklaşımları uzun vakit alabilmekte ve yüksek bilgisayar kapasitesini gerektirebilmektedir. Bu sebeple uzun süreli deformasyonlar açısından güvenli tarafta kalan pratik hesap yaklaşımlarının efektif olduğu belirlenmiştir. (Pecic, Masovic & Stosic,2023) yapmış oldukları çalışmada betonarme elemanların deformasyon kontrolünde açıklık/yükseklik oranının etkisini incelemişlerdir. Makalelerinde deformasyon kontrolü için yeni bir yaklaşım sunmuşlardır. Bu parametrik formülasyon içerisinde; kesit boyutlarını, çekme ve basınç donatılarının pozisyonlarını, betonun uzun süre ve mekanik parametrelerini esas aldıklarını belirtmişlerdir. Ayrıca önerdikleri bu parametrik formülasyona yönelik örnek analizler yapmışlardır. Bu formülasyonun tasarım açısından basit ve uygulanabilir olduğunu göstermişlerdir. Çalışmada, uzun süreli deformasyonların sadece betonun sünme ve büzülme etkileri gibi uzun süre parametrelerine bağlı olmadığı; tasarımın, donatılardırmanın ve eğilme elemanı geometrik özelliklerinin sonucu değiştirebildiği görülmüştür (Pecic, Masovic & Stosic,2023). Makalede uzun süreli şehimler açısından TS500’de verilen denklemlerde kalıcı yük süre katsayısı (γ_t) tablo olarak verildiği için hesaplamalarda tasarıma bağlı olan basınç donatısı oranı değişken olarak seçilmiştir. (γ_t) kalıcı yük süre katsayısı ise TS500’de 5 yıl ve daha fazla yükleme süresi için “2” olarak dikkate alınmıştır. Makale kapsamında döşeme basınç donatısı oranı değiştirilerek uzun süreli deformasyon hesabı yapılmıştır. Şehim sınırlarının karşılaştırılmasında ise TS500’de verilen Çizelge 13.3 esas alınmıştır. Basınç donatısı oranının uzun süreli deformasyonlara olan etkisi örnek bir modelleme çalışması üzerinden incelenmiştir. Bu deformasyonlar literatür çalışmalarından da görüleceği üzere sadece konsol döşemelerle ilgili değildir. Birçok parametreye bağlı olan bu etkinin matematiksel olarak ortaya konulması oldukça kompleks bir problemdir. Uzun süreli deformasyonların yapının bütünü açısından önemi dikkate alındığında, bu analizin yapısal tasarımda statik emniyet açısından basitleştirilmiş yaklaşımlarla göz önüne alınması oldukça önemlidir. Makalede, günümüzde mimari açıdan kullanımı yaygınlaşan kirişli konsol döşemeler dikkate alınmıştır. Literatür araştırmalarında konsol kirişli döşemelerde uzun süreli deformasyon etkilerinin irdelendiği ve basınç donatısının uzun süreli deformasyonlara yönelik etkisinin analitik olarak ele alındığı çalışmaların oldukça sınırlı olduğu belirlenmiştir. Bu kapsamda makale ile tasarım yapan mühendisler ve betonarme elemanlarda uzun süreli deformasyonları inceleyen araştırmalara katkı sunabilmesi amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

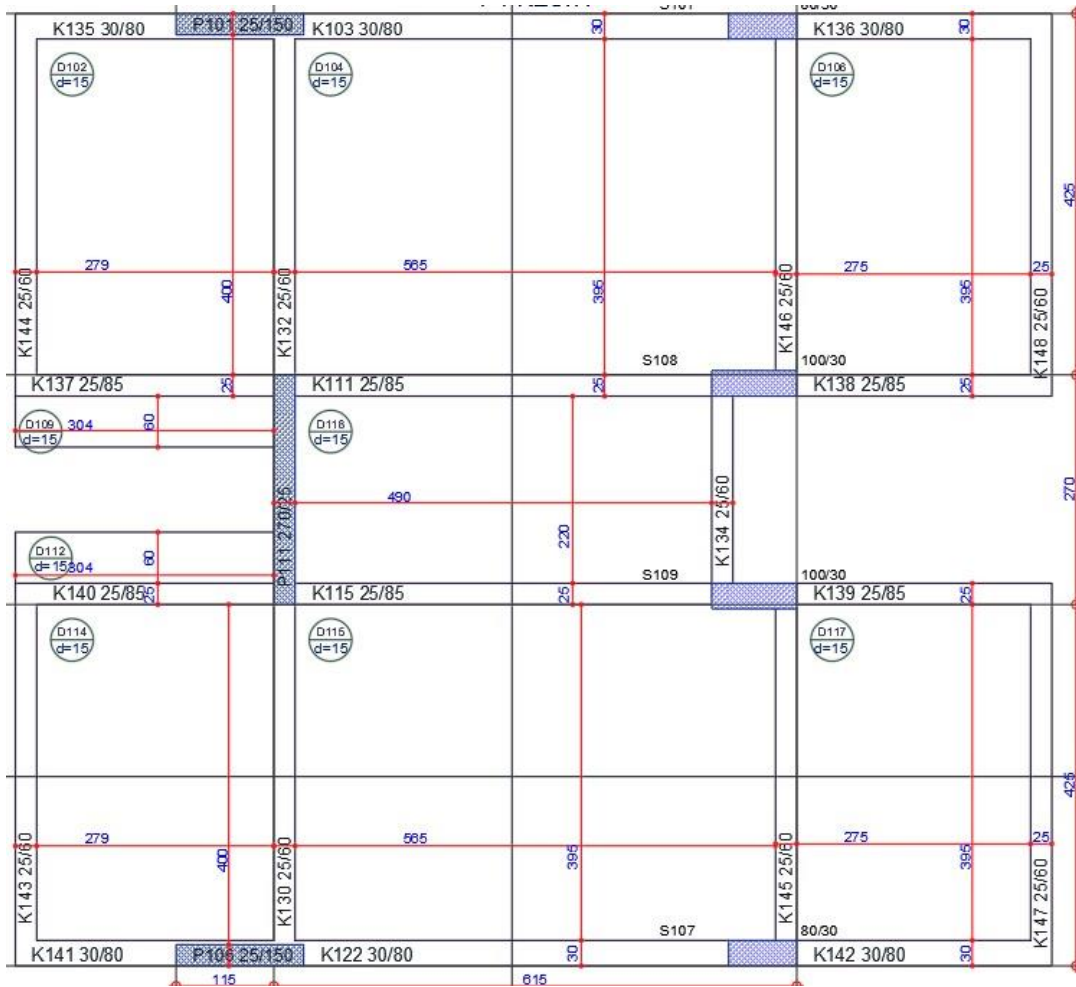
Çalışma kapsamında zemin + 1 normal kattan oluşan ve iki yönde kirişli konsol döşemelere sahip bir tasarım gerekli izinler alınarak modellenmiştir (Şekil 1).





Şekil 1. Kirişli konsol döşemeli örnek yapı modeli (CSI,2025)

Modellemede sonlu eleman yöntemi kullanılmıştır. Konsol döşemeler, farklı genişlik ve yüksekliğe sahip kirişlere mesnetlenmektedir (Şekil 2).



Şekil 2. Örnek yapı kalıp planı

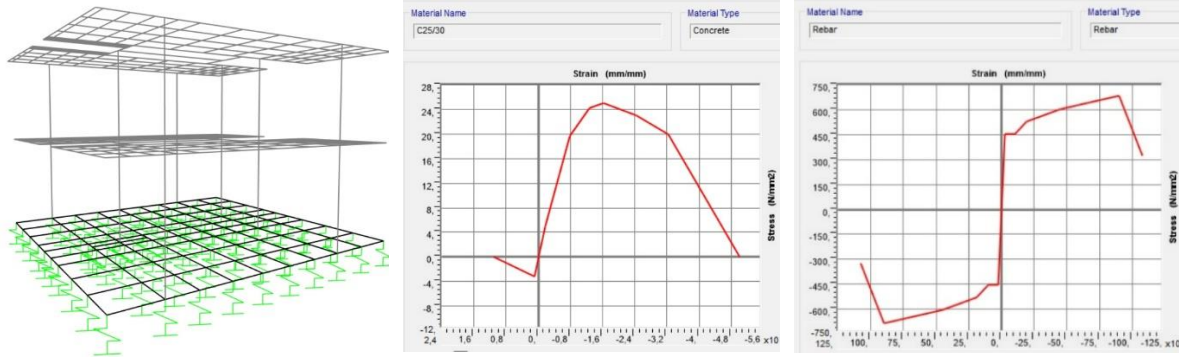
Yazılım olarak SAP2000 V.26.2.0 (License owner, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi) kullanılmıştır (CSI,2025). Zemin etkileri için yay tanımlaması yapılmış, sistem yapı zemin etkileşimli olarak analiz edilmiştir (Şekil 2). TS498'e göre döşeme yükleri tanımlanmış (konsollarda hareketli yük 500kg/m²), duvar yükleri ise projeye uygun şekilde kirişler üzerine etkilmiştir. Yapı yatay yükler, düşey yükler ve TS500 1.4G + 1.6Q ve G + Q + E yük kombinasyonlarına göre analiz edilmiştir. Deprem parametreleri, zemin özellikleri, malzeme özellikleri ve kesit özellikleri tanımlandıktan sonra sonlu eleman modeli analiz edilmiştir (Şekil 3-4).

Birdal¹ ve ark.

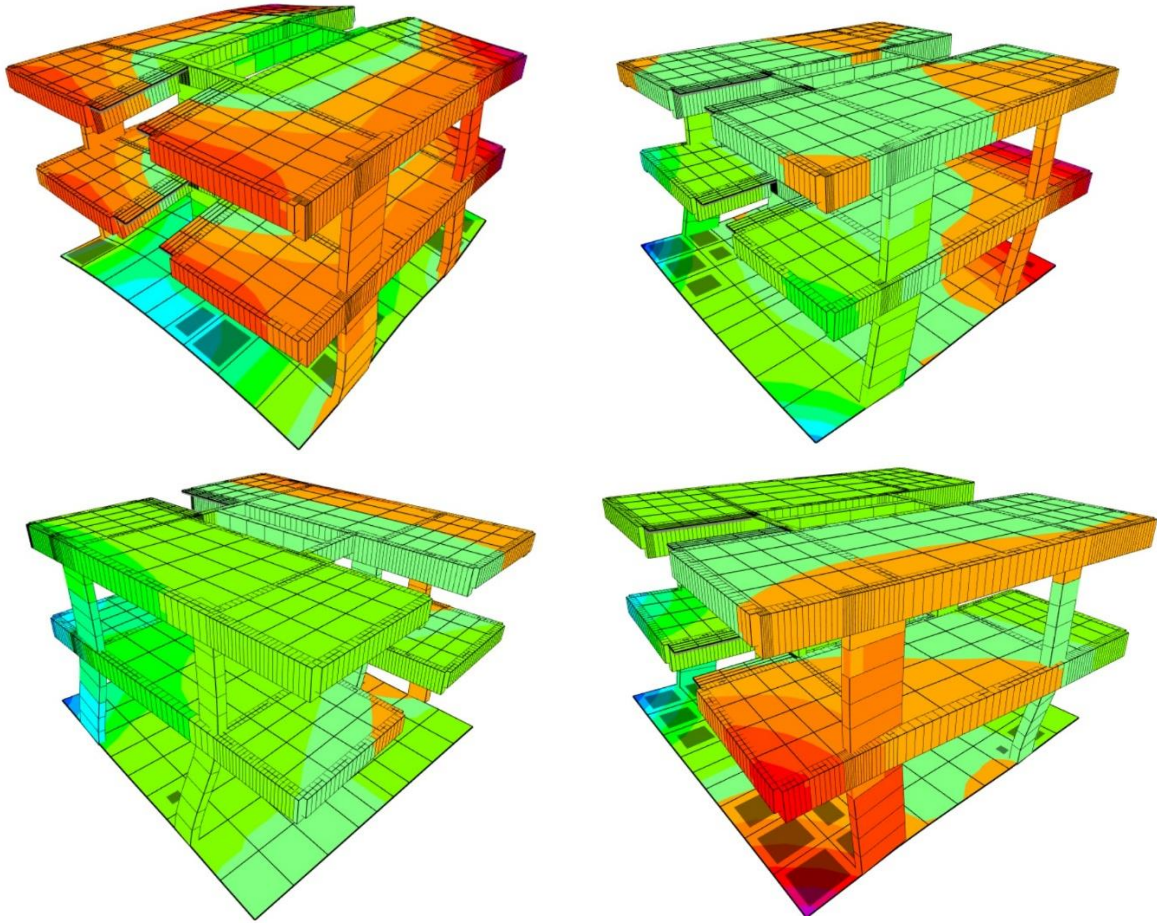
Analiz sonuçlarında konsol döşemelerin uç noktalarındaki maksimum deformasyon değerleri belirlenmiştir. TS500'de sünme ve büzülme etkisini dikkate alan ek deformasyonların hesabı Denklem 1 ile yapılmaktadır. TS500'de daha kesin hesaba gerek duyulmayan durumlarda bu denklemin kullanılabileceği belirtilmektedir.

$$\delta_t = \delta_i + \delta_{ig} \lambda$$

Denklem 1 (TS500)



Şekil 3. Zemin yay modeli ve malzeme özellikleri (CSI,2025)



Şekil 4. Yapı modelinin farklı yük kombinasyonlarındaki analiz deformasyon şekilleri (CSI,2025).

Denklem 1'de uzun süreli etkileri dikkate alan toplam deformasyonun, kalıcı ve hareketli yüklerden oluşan ani deformasyon (δ_i) ve kalıcı yüklerden oluşan deformasyonun (δ_{ig}) kalıcı sehim kat sayısı ile (λ) çarpımının

Birdal¹ ve ark.

toplamından oluştuğu görülmektedir. Çalışmada ani sehim ve kalıcı yüklerden oluşan sehim değerleri için SAP2000 analizi sonuçları esas alınmıştır. Bu sehim değerleri yapı elemanlarının geometrik ve malzeme özelliklerine, yük seviyesine göre değişmektedir. Burada donatı detay tasarımı ile ilgili parametre ise λ çarpanıdır. λ çarpanı kalıcı yük süre kat sayısına ve kesitte bulunan basınç donatısı oranına göre değişkenlik göstermektedir. Denklem 2’de λ çarpanının kalıcı yük süre kat sayısının (γ_t) $1 + 50 \times \rho'$ (kesitte bulunan basınç donatısı oranı) bölümünden elde edildiği görülmüştür.

$$\lambda = \frac{\gamma_t}{1 + 50\rho'}$$

Denklem 2 (TS500)

Makale kapsamında deformasyon hesabı yapılan döşemelerin basınç donatısı oranı taşıma gücü açısından yeterli olsa da bu oranın ve değişiminin uzun süreli deformasyonlara etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Burada kalıcı yük süre kat sayısı (γ_t), 2 olarak 5 yıl ve daha fazla yükleme süresi için belirlenmiştir. İlk olarak basınç donatısı oranı için 0,0021 değeri dikkate alınarak SAP2000 (CSI,2025)sonucunda elde edilen deformasyon değerleri kullanılarak toplam deformasyonlar konsol döşeme uçlarında hesaplanmıştır. Bu deformasyonlar TS500’de sehim sınırları için verilen çizelge 13.3’teki $l_n/240$ değeri ile kıyaslanarak sınırlar içerisinde olup olmadığı kontrol edilmiştir. Burada $l_n/240$ seçilmesinin sebebi deformasyon analizi yapılan döşemenin “büyük sehimden etkilenebilecek elemanlar taşıyan” kategorisinde yer almaması şeklindedir. Eğer döşeme büyük sehimlerden etkilenebilecek elemanlar taşıyan ve bölme duvar bulunan bir döşeme ise sınır değer $l_n/480$ seçilmesi gerekmektedir. Makalede referans olarak belirlenen basınç donatısı oranı ilave mesnet donatıları ile %50, %75, %100, %150, %200 artırılarak uzun süreli deformasyonlar belirlenmiştir. Basınç donatısı oranının, taşıma gücü açısından yeterli olsa da uzun süreli deformasyonlar açısından yeterli olamayabileceği ve bu deformasyonlar dikkate alınarak TS500’de verilen hesaplama yaklaşımı ile analiz edilip artırılmasının gerekli olabileceği görülmüştür.

3. BULGULAR

Analiz sonucunda deformasyonlar açısından kritik öneme sahip yapının 1. ve 2. katında 20 noktada hareketli (Q) ve kalıcı yüklerden (G) oluşan ani sehim, sadece kalıcı yüklerden oluşan ani sehim, kalıcı sehim kat sayısı λ değeri dikkate alınarak uzun süreli sehim değerleri hesaplanmıştır. Döşemelerin net açıklık l_n değerleri dikkate alınarak toplam sehim ile bu değer kıyaslanmıştır. İlk olarak basınç donatısının 0,0021 değeri için λ değeri 1,81 olarak hesaplanmıştır. Kıyaslama sonucu Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. 0,0021 basınç donatısı oranında toplam sehim ve kıyaslama.

Döşeme/ Düğüm Noktası	(G+Q) Ani Sehim	(G) Ani Sehim	λ	Uzun Süreli Sehim	Toplam Sehim	l_n (mm)	$l_n/240$
DZ02 (22)	3,71	3,12	1,81	5,65	9,36	2600	10,83
DZ02 (30)	3,88	3,13	1,81	5,67	9,55	2600	10,83
DZ09 (325)	3,97	3,21	1,81	5,81	9,78	2850	11,88
DZ14 (31)	3,66	3,08	1,81	5,57	9,23	2600	10,83
DZ14 (28)	3,94	3,17	1,81	5,74	9,68	2600	10,83
DZ12 (327)	4,07	3,29	1,81	5,95	10,02	2850	11,88
DZ06(21)	4,72	3,90	1,81	7,06	11,78	2650	11,04
DZ06(23)	2,78	2,32	1,81	4,20	6,98	2650	11,04
DZ17(26)	2,80	2,34	1,81	4,24	7,04	2650	11,04
DZ17(33)	4,64	3,83	1,81	6,93	11,57	2650	11,04
D102 (244)	3,81	3,18	1,81	5,76	9,57	2790	11,63
D102 (248)	3,92	3,08	1,81	5,57	9,49	2790	11,63
D109 (252)	3,95	3,10	1,81	5,61	9,56	3040	12,67
D114 (262)	3,76	3,14	1,81	5,68	9,44	2790	11,63
D114 (258)	3,97	3,11	1,81	5,63	9,60	2790	11,63
D112 (254)	4,03	3,15	1,81	5,70	9,73	3040	12,67
D106(264)	4,87	3,94	1,81	7,13	12,00	2750	11,46
D106(268)	2,84	2,31	1,81	4,18	7,02	2750	11,46
D117(269)	2,84	2,32	1,81	4,20	7,04	2750	11,46
D117(273)	4,83	3,91	1,81	7,08	11,91	2750	11,46

Birdal¹ ve ark.

Tablo 1’den görüleceği üzere 0,0021 basınç donatısı oranı bazı düğüm noktalarında taşıma gücü açısından yeterli olmasına rağmen uzun süreli deformasyonlar açısından sınır değeri aşmıştır. Basınç donatısı oranı değeri %25 artırılarak 0,0026 değeri için hesaplama yapıldığında aynı düğüm noktalarında sınır değerin aşıldığı görülmüştür. Sonrasında sırasıyla %50 ($p'=0,0032$), %75 ($p'=0,0036$), %100 ($p'=0,0042$) değerleri için de denenmiş ancak sehim sınırı aynı düğüm noktalarında sağlanamamıştır. Ancak basınç donatısı oranı %150 artırıldığında uzun süreli deformasyonların sehim sınırı altında kaldığı belirlenmiştir (Tablo 2). Bu durum tasarımda Ø12/400 olarak belirlenen mesnet donatısına ilave olarak Ø12/200 oranında mesnette basınç donatısının artırılması ile sağlanabilmektedir.

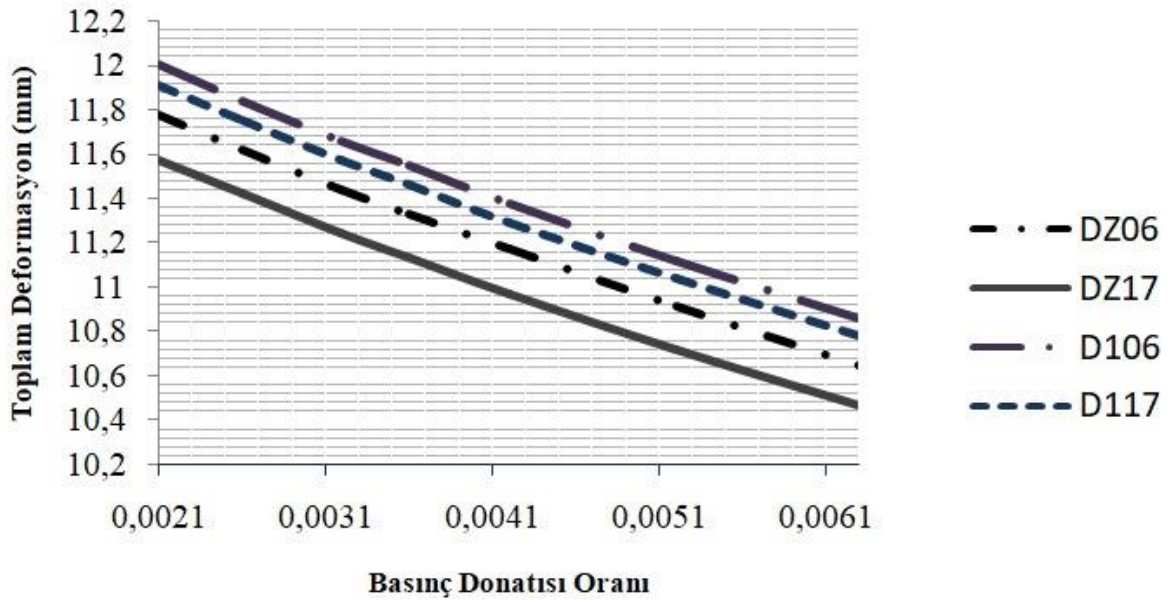
Tablo 2. 0,0052 basınç donatısı oranında toplam sehim ve kıyaslama.

Döşeme/ Düğüm Noktası	(G+Q) Ani Sehim	(G) Ani Sehim	λ	Uzun Süreli Sehim	Toplam Sehim	ln (mm)	ln /240
DZ02 (22)	3,71	3,12	1,59	4,95	8,66	2600	10,83
DZ02 (30)	3,88	3,13	1,59	4,97	8,85	2600	10,83
DZ09 (325)	3,97	3,21	1,59	5,10	9,07	2850	11,88
DZ14 (31)	3,66	3,08	1,59	4,89	8,55	2600	10,83
DZ14 (28)	3,94	3,17	1,59	5,03	8,97	2600	10,83
DZ12 (327)	4,07	3,29	1,59	5,22	9,29	2850	11,88
DZ06(21)	4,72	3,9	1,59	6,19	10,91	2650	11,04
DZ06(23)	2,78	2,32	1,59	3,68	6,46	2650	11,04
DZ17(26)	2,80	2,34	1,59	3,71	6,51	2650	11,04
DZ17(33)	4,64	3,83	1,59	6,08	10,72	2650	11,04
D102 (244)	3,81	3,18	1,59	5,05	8,86	2790	11,63
D102 (248)	3,92	3,08	1,59	4,89	8,81	2790	11,63
D109 (252)	3,95	3,10	1,59	4,92	8,87	3040	12,67
D114 (262)	3,76	3,14	1,59	4,98	8,74	2790	11,63
D114 (258)	3,97	3,11	1,59	4,94	8,91	2790	11,63
D112 (254)	4,03	3,15	1,59	5,00	9,03	3040	12,67
D106(264)	4,87	3,94	1,59	6,25	11,12	2750	11,46
D106(268)	2,84	2,31	1,59	3,67	6,51	2750	11,46
D117(269)	2,84	2,32	1,59	3,68	6,52	2750	11,46
D117(273)	4,83	3,91	1,59	6,21	11,04	2750	11,46

Bu kapsamda deformasyonlar açısından kritik öneme sahip yapısal elamanlarda analiz sonucu elde edilen donatılar taşıma gücü açısından yeterli olsa dahi, uzun süreli deformasyonlar açısından analiz edilmesi gerektiği makalede gösterilmiştir. Bununla birlikte Tablo 2 incelendiğinde basınç donatısı oranı %150 artırılmasına rağmen uzun süreli toplam deformasyonların sınır değer içerisinde ancak bu değere çok yakın olarak hesaplanması, uzun süreli deformasyonların hesabında kritik öneme sahip yapısal elemanlar açısından daha ileri hesaplama yaklaşımlarının gerekebileceğini göstermiştir. Tablo 3’te kat planında maksimum deformasyon oluşan döşemeler için basınç donatısı oranına göre değişen deformasyon değerleri ve Şekil 5’te bunun grafiksel gösterimi verilmiştir. Çalışmada uzun süreli deformasyonlar açısından günümüz mimarisinde sıkça rastlanılan kirişli konsol döşemeler örnek olarak seçilmiştir. Ancak makalenin giriş bölümünde de belirtildiği üzere uzun süreli deformasyonların hesabı tüm yapısal elemanlar ve yapının tamamı açısından önemli olabilmektedir.

Tablo 3. Basınç donatısı oranına göre değişen deformasyon değerleri.

Döşeme		Basınç Donatısı Oranı (ρ)						
		0,0021	0,0026	0,0032	0,0036	0,0042	0,0052	0,0063
DZ06	Toplam Deformasyon (mm)	11,78	11,62	11,44	11,33	11,17	10,91	10,65
DZ17		11,57	11,42	11,24	11,13	10,97	10,72	10,47
D106		12	11,84	11,66	11,55	11,38	11,12	10,86
D117		11,91	11,75	11,57	11,46	11,29	11,04	10,78



Şekil 5. Toplam Deformasyon – Basınç Donatısı Oranı değişimi.

4. TARTIŞMA

Makale kapsamında betonarme kirişli konsol döşemelerde basınç donatısı oranının uzun süreli deformasyonlar açısından önemi örnek bir modelleme ve analiz çalışması ile ortaya konmuştur. Gerekli izinler alınarak örnek bir yapı modellenmiş, bu yapısal modelde deformasyonlar (sehim) açısından kritik düğüm noktaları belirlenmiştir. Bu düğüm noktalarındaki uzun süreli toplam deformasyon hesabı TS500'e göre gerçekleştirilmiştir. Değişen basınç donatısı oranlarında TS500'de verilen deformasyon sınırının sağlanıp sağlanmadığı incelenmiştir. Tasarımda verilen mevcut basınç donatısı oranına göre hesaplanan kalıcı sehim katsayısı değerinde yapısal sistemin döşemelerinin bazı düğüm noktalarında sınır değerin aşıldığı görülmüştür. Basınç donatısı %25, %50, %75, %100 artırıldığında yine sehim sınırlarının aşıldığı tespit edilmiştir. Ancak basınç donatısı oranı %150 artırıldığında ise sehim sınırlarının altında kalan değerler elde edilebilmiştir. Bu oran makaleye konu olan yapısal tasarım için elde edilmiştir. Tasarımın, konsol döşeme boyutlarının, yapı yüklerinin ve diğer parametrelerin değişiminde basınç donatısındaki artış oranı da değişebilecektir. Makalede örnek bir yapısal tasarımda bulunan konsol döşemelerde uzun süreli deformasyonun basınç donatısı ile değişimi incelenmiştir. Çalışmada uzun süreli deformasyonlar açısından basınç donatısı oranının önemi yapılan analizler ile belirlenmiştir. Yenilikçi mimari tasarımlarda yapısal sistemin taşıma gücü açısından analizi yanında, kullanılabilirlik sınır durumu açısından da önemi görülmüştür. Uzun süreli deformasyonlar bazı durumlarda statik emniyet ve yapının ekonomik ömrü açısından olumsuz sonuçlar ortaya çıkarabilecektir. TS500 yönetmeliği çerçevesinde pratik bir yöntemle bu deformasyonlar hesaplanabilmektedir. Ancak uzun süreli deformasyon değerlerinin çok daha kritik öneme sahip olduğu yapısal sistemler açısından ileri modelleme ve analiz yöntemlerinin kullanılabilmesi düşünülmüştür. Makalenin inşaat sektöründe tasarım aşamasında çalışan ve saha uygulamalarında yetkili mühendislere, betonarme yapılarda uzun süreli deformasyonların analizinde ileri modelleme ve hesaplama konularını esas alan bilimsel araştırmalara katkı sunabilmesi amaçlanmıştır.

Yazar Katkısı

Furkan BİRDAL: Fikir ve tasarım, Veri analizi, Makale yazımı, Sonuçların yorumlanması, Kaynak sağlama

Oğuzhan YÜKSEL: Veri toplama, Veri analizi, Makale yazımı,

Mehmet Mustafa ÖNAL: Fikir ve tasarım, Sonuçların yorumlanması, Kaynak sağlama

Teşekkür

Makale kapsamında modellenen yapıya ilişkin verileri sağlayan Doç. Dr. Oğuz Keleş'e teşekkürlerimizi sunarız.

Çıkar Çatışması

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Veri Kullanılabilirliği

Veri setleri ile ilgili sorular için, sorumlu yazar ile iletişime geçilmelidir.

KAYNAKÇA

- ACI Committee 318. (2004). Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318M-05). American Concrete Institute.
- Al-Sunna, R., Pilakoutas, K., Hajirasouliha, I., & Guadagnini, M. (2012). Deflection behaviour of FRP reinforced concrete beams and slabs: An experimental investigation. *Composites Part B: Engineering*, 43(5), 2125-2134.
- Ahmadi-Nedushan, B., & Almaleeh, A. M. (2024). Material Cost Optimization Of One-Way Reinforced Concrete Slabs Using An Elitist Genetic Algorithm: A Sensitivity Analysis Based On Aci 318-19. *Int. J. Optim. Civil Eng*, 14(4), 573-593.
- “CSI (Computers and Structures Inc.) 2025. SAP2000 Structural Analysis and Design.CSI, Licensed to Kirsehir Ahi Evran University,”. *Berkeley*: SAP2000 Ultimate 64 Bit v26.2.0.
- Pecic, N., Masovic, S., & Stosic, S. (2023). Span-to-depth ratio limits for deflection control of reinforced concrete elements. *Structural Concrete*, 24(2), 2547-2562.
- Sanabra-Loewe, M., Garcia, D., Tosic, N., & de la Fuente, A. (2023). Practical flexural design approach for one-way hybrid fiber-reinforced concrete slabs based on a parametric study on slenderness limits. In *Structures* (Vol. 56, p. 104926). Elsevier.
- Sanabra-Loewe, M., Garcia, D., Tošić, N., & de la Fuente, A. (2024). Design Tool for Finding Minimum Heights of Reinforced Concrete Beams and One-Way Slabs. *ACI Structural Journal*, 121(3).
- Standardı, T. (2000). Betonarme yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları (TS 500-2000). *Ankara, Türkiye, Türk Standartları*.