

Çelik Yapı Tasarımını Etkileyen Son Dönemlerdeki Araştırma ve Gelişmeler[§]

Dr. Kağan Yemez

ArcelorMittal RZK ÇELİK SERVİS MERKEZİ SAN. VE TİC. A.Ş.
Makine Organize Sanayi Bölgesi 5. Cadde 121 Parsel / Demirciler Koyu / Dilovası / Gebze
Tel: (262) 724 89 00
E-Posta: kagan.yemez@rzkcelik.com

Öz

Geçen 20 yıl içindeki çelik üretim teknolojilerindeki önemli gelişmelerden biri olan ArcelorMittal Differdange ağır profil hadde hattında bulunan QST (su verme ve kendiliğinden temperlenme) ünitesi ile çelik üretiminde yüksek dayanım ve süneklik ile mükemmel kaynaklanabilirlik özelliklerinin birleştirilmesi sağlanmıştır. HISTAR™ markasıyla da pazarlanan, Avrupa ve Amerika ulusal standartlarında konvansiyonel yapısal çelikler arasında yüksek dayanımlı çelik olarak tanımlanmış ve performansları tamamen kabul edilen bu çelik kalitesinde üretilen çelik profiller, geniş açıklıklı uzay çatıların çelik elemanları, yüksek binaların ağır yük taşıyan “jumbo” kesit çelik kolonları, kompozit köprülerin derin çelik kirişleri, derin temellerin çelik zemin kazıkları gibi özellikli uygulamalarda ülkemizde ve Dünya’da ilk gününden itibaren büyük bir başarı ile kullanılmaktadır.

Yakın dönemlerde yapılan araştırma ve gelişmeler, yüksek dayanımlı QST çeliklerinin galvanizasyon sırasındaki davranışını, tasarım parametrelerini ve burkulma eğrilerini, yangın mühendisliğine katkısını, tüm dayanımının aktif olarak kullanılabilmesi için asimetrik olarak da üretilebilen dairesel veya sinüs gözlü petek kirişler ve yüksek dayanımlı QST kalitesinde H-kirişler ile yüksek dayanımlı betonu birleştiren yüksek performanslı kompozit yapılar ve köprüler gibi konuları kapsamaktadır.

Öteyandan deprem bölgelerinde yapılacak çelik yapılara yönelik yapılan araştırmalar, moment aktaran kolon-kiriş birleşimlerinin kirişin birleşime yakın bölgelerinde uygulanan azaltılmış kiriş kesiti, bir nevi binanın sigortası olarak olası plastikleşmenin bir başka deyişle deformasyonun kirişte olmasını sağlayarak Güçlü Kolon - Zayıf Kiriş gerekliliğinin garanti edilebilirliğini göstermiştir. Son dönemlerde araştırılan özel enerji yutan birleşim detayları sayesinde elde edilen süneklik ile deprem etkileri kontrol altında tutularak tasarım kolaylığı sağlanabiliyor. Belki de yaşadığımız depremlerde yumuşak kat düzensizliği nedeniyle çöken binaların önlenmesi yolunda çelik sektöründen gelen betonarme binalara yönelik çözüm önerisi gelecekte binlerce hayatı kurtaracak.

Anahtar sözcükler: HISTAR, Yüksek dayanımlı çelik, Çelik petek kiriş, Depreme karşı tasarım, Yangına karşı tasarım, Kolon-kiriş birleşimi.

[§] Bu bildiri TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası'nın düzenlediği 3. Ulusal Çelik Yapılar Sempozyumu için hazırlanmıştır. Gaziantep, 8-9-10 Ekim 2009.

Giriş

Bu makale, çelik yapı tasarımını olumlu yönde etkileyen çelik üretimi ve tasarımı üzerine yapılan araştıma projelerindeki en son gelişmeler ile birlikte QST çelik profillerinin verimli ve ekonomik olarak uygulamalarını özetlemektedir.

Çelik Sektöründeki Araştırma ve Gelişmeler

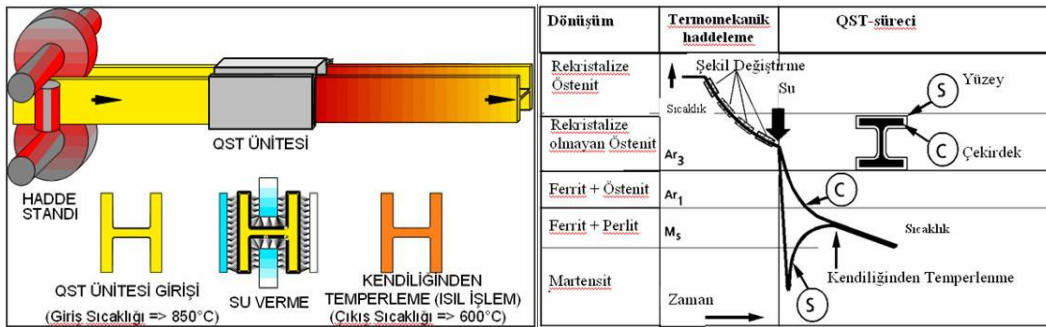
Yüksek Dayanımlı Çelikler

Geçen 20 yıl içinde çelik üretim teknolojilerindeki ilerlemeler, üretim süreçlerinde ve kapasitelerinde büyük gelişmelere zemin hazırlamıştır. Öncelikle çevresel konuların ele alınmasıyla çelik uzun ürünlerin yüksek fırınlarda demir cevherinden üretim süreci artık yerini modern teknoloji ile elektrik ark ocaklarında hurdadan üretim sürecine bırakmaya; diğer yandan bilgisayar kontrollü üretim hatlarında üretilen çelik ürünler yüksek dayanım sınırlarını zorlamaya başladı. ArcelorMittal Differdange ağır profil hadde hattında bulunan ve Liège'deki Centre de Recherches Métallurgiques (CRM) ile birlikte geliştirilmiş olan QST ünitesi, çelik üretiminde yüksek dayanım ve süneklik ile mükemmel kaynaklanabilirlik özelliklerinin birleştirilmesini sağlamıştır.

Yüksek dayanımlı çelik üretmek için geleneksel yöntemde çeliğe alaşım elemanları eklenir ve kontrollü sıcaklıklarda haddelenir. Bu termomekanik (TM) haddeleme tekniğinde nispeten düşük sıcaklıklarda yüksek şekil değiştirme oranları elde edilmesi için hadde hatlarının mekanik gücünün çok yüksek olmasının gerekliliği, çeliğin dayanımını artırırken aynı zamanda karbon eşdeğerliğini (CE) düşük tutabilme ve dolayısıyla kaynaklanabilirlik özelliğini sürdürebilmenin neredeyse olanaksız olması gibi kısıtlamaları vardır.

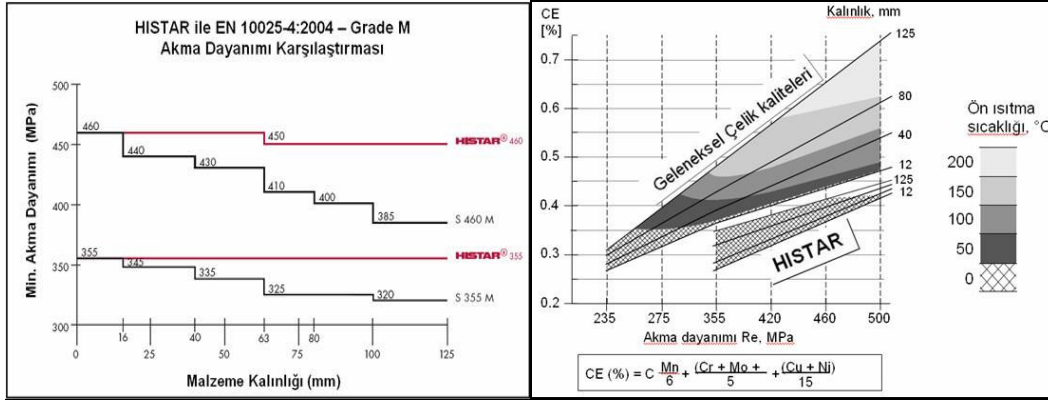
QST Çeliklerinin Özellikleri

QST sürecinde ise basınçlı su ve haddeleme ısısından yararlanır. Son TM haddesinden sonra, profilin tüm yüzeyine yoğun olarak su püskürtülerek dış soğutma uygulanır. Bu soğutma çekirdek sıcaklığı etkilenmeden önce bitirilir ve dış cidarlar çekirdekten yüzeye kendiliğinden akan enerjiyle ısı işlem görür (metalurji dilinde temperleme). Son hadde standından çıkan profilin doğrudan soğutma ünitesine girerken sıcaklığı tipik olarak 850°C'dir. Profilin tüm yüzeyine su verilme işleminden sonra, 600°C'de kendiliğinden temperleme ısı işlemi gerçekleşir. (Şekil 1)



Şekil 1 QST sürecinin ve ısı akışının şematik gösterimi.

QST süreci çeliğin akma dayanımını ve CVN tokluk değerini önemli ölçüde artırır. HISTAR™ markasıyla pazarlanan bu çelik kaliteleri EN 10025-4:2004 kaliteleri ile karşılaştırıldığında tüm ürün kalınlıklarında garanti edilen minimum akma değerleri daha yüksektir. (Şekil 2) Normal yapısal çelik kaliteleri ile karşılaştırıldığında daha düşük karbon eşdeğerliğinden dolayı çeliğin kaynaklanabilirliği ve sünekliği önemli ölçüde gelişmiştir. (ProfilARBED, 1998; Donnay, 2001) Kalın etli kesitlerde bile düşük hidrojenli (< 8 ml/100g) elektrotlar kullanılarak ön ısıtma olmaksızın 0°C üzerindeki sıcaklıklarda kaynaklanabilir. (Şekil 2)



Şekil 2 HISTAR ile yapısal çelik kalitelerinin karşılaştırılması ve kaynaklanabilirliği.

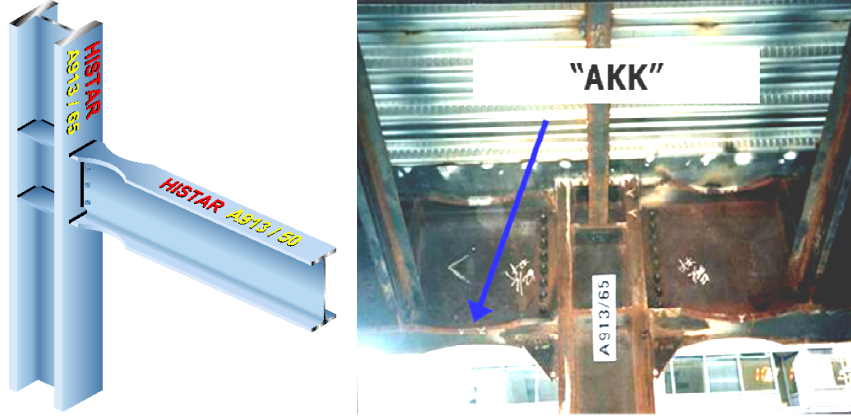
Literatürde ince grenli yüksek akma dayanımına sahip çeliklerin galvanizleme sırasında geleneksel yapısal çeliklerden daha kritik davranış gösterdiği belirtilmektedir. Ancak yapılan son deneyler HISTAR kalitesindeki yapı elemanlarının sıcak daldırma galvanizlemede, alışılmış yapısal çeliklerle karşılaştırıldığında benzer davrandığını göstermiştir. HISTAR kalitelerinin yüksek çentik tokluğu özelliği ile diğer çeliklerden daha iyi davranışa sahip oldukları da söylenebilir. Her halükarda, tüm fabrike yapısal bileşenlerinin galvanizlemeden önce kritik bölgelerde gerilme azaltma uygulanması büyük öneme sahiptir. Aslında, haddelemeden ve fabrikasyondan gelen artık gerilmeler sonrası sıcak çinko banyosuna daldırma sırasında kiriş kısımlarının farklı uzamasından kaynaklanan ek iç gerilmeler oluşabilir ve çeliğin mekanik özelliklerini aşan bir seviyeye ulaşabilir.

Yüksek Dayanımlı Çeliklerin Deprem Bölgelerinde Kullanımı

HISTAR çelik kalitesinde üretilen çelik profiller, geniş açıklıklı uzay çatıların çelik elemanları, yüksek binaların ağır yük taşıyan “jumbo” kesit çelik kolonları, kompozit köprülerin derin çelik kirişleri, derin temellerin çelik zemin kazıkları gibi özellikli uygulamalarda ülkemizde ve tüm Dünya’da ilk gününden itibaren büyük bir başarı ile kullanılmaktadır.

Deprem yönetmeliklerinde tavsiye edilen minimum tokluk değerlerini rahatlıkla sağlayan HISTAR kaliteleri günümüzde yüksek binaların tasarımında en ekonomik biçimde “güçlü kolon – zayıf kiriş” elde etmek için kullanılmaktadır. Bu, kolonlarda yüksek dayanımlı, kirişlerde daha düşük dayanımlı çelik kullanarak ve/veya sıklıkla moment aktaran çerçeve birleşimindeki plastik mafsalların kiriş-kolon düğüm noktasından uzakta, tasarlanan yerde, oluşmasını garanti etmek için geliştirilmiş “Azaltılmış Kiriş Kesiti” (AKK) ile birlikte kullanılarak da sağlanmaktadır. (Şekil 3)

AKK, kiriş kesit ataletini azaltmak için kiriş başlık malzemesinin tasarıma göre kesilmesi prensibine dayanır. Yoğun araştırmalar ve testler sonucu performansları belirlenmiştir. Bu şekilde kolon yüzeyine aktarılan momentin ve dolayısıyla kolonda göçme olasılığının azalması, kolon-kiriş bağlantılarında H-kolon kesiti için çift berkitme levhası gereksiniminin azalması, kolonla karşılaştırıldığında kirişin daha yüksek akma dayanımına sahip olması halinde bile daha güçlü kolonlar elde edilmesi, maliyet açısından birleşim detayının daha hesaplı olması sağlanmış olur.



Şekil 3 Azaltılmış kiriş kesiti (AKK) ile birlikte “güçlü kolon-zayıf kiriş” kavramı.

Deprem yükleri altında moment aktaran kaynaklı birleşimlerde özellikle ağır jumbo H-kolon kalın etli başlıklarının kalınlık yönünde davranışı, önemle dikkat edilmesi gereken konulardan biridir. HISTAR 460 kalitesindeki ağır jumbo H-kolonların başlık kalınlığı yönünde test edilen birleşim örneklerinin hiçbirinde lamelar yırtılma meydana gelmemiş ve kaynaklı kolon-kiriş birleşimlerinin sismik tasarımında güvenle kullanılabilceği sonucuna varılmıştır.

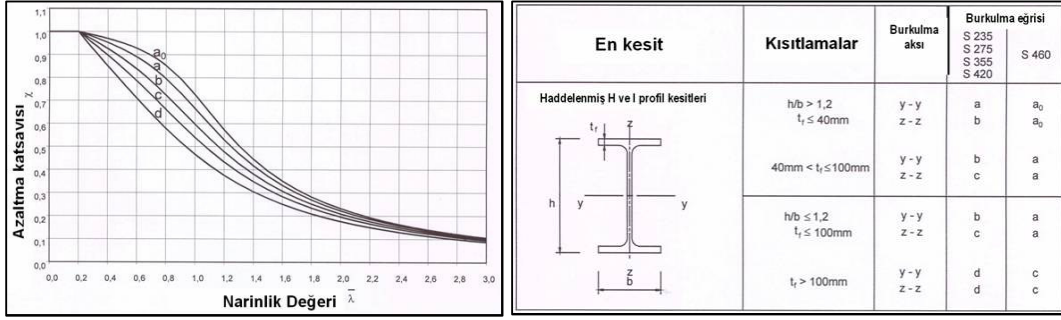
Yüksek Dayanımlı Çelikler ile Tasarım

Yapılan akademik araştırmalar sonucunda HISTAR kaliteleri, EN 10025-4:2004, ASTM A913-01 ve DIN 18800-7:2002 gibi Avrupa ve Amerika ulusal standartlarında konvansiyonel yapısal çelikler arasında yüksek dayanımlı çelik olarak tanımlanmış ve performansları tamamen kabul edilmiştir.

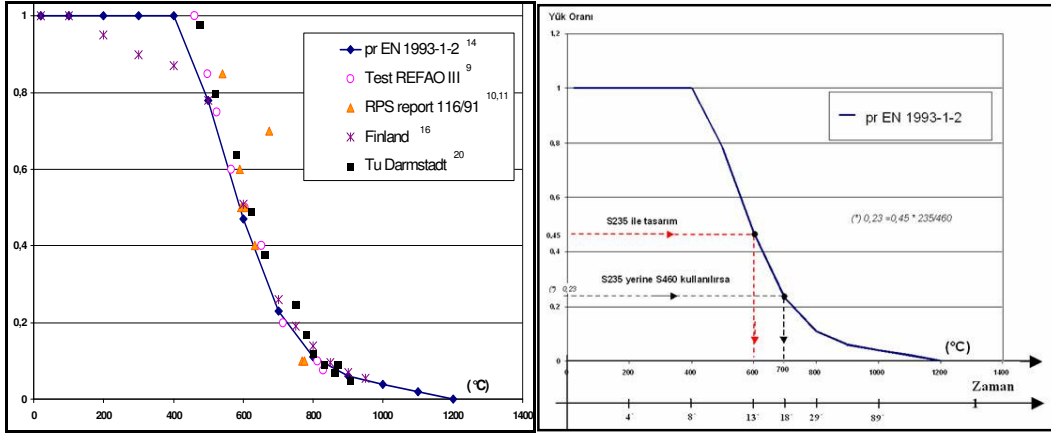
Yüksek dayanımlı çelik kaliteleri S460, Eurocode 3 ve 4'te (EN 1993-1-1, 2005; EN 1994-1-1, 2004) yer almaktadır. Akma noktası ile karşılaştırıldığında nispeten daha düşük artık gerilmelerinden dolayı burkulma davranışı iyileşir ve daha avantajlı burkulma eğrileri kullanılabilir. (Şekil 4) Örneğin a_0 burkulma eğrisi, özellikle S460 çelik kalitesi için geliştirilmiştir.

Yangın tasarımı ile ilgili Eurocode 3 ve 4 (EN 1993-1-2, 2005; EN 1994-1-2, 2005) EN10025'e göre S235, S355 ve S460 çelik kalitelerini kapsar ve çelik sıcaklığının fonksiyonu olan $f_{y,\theta}$ etkin akma dayanımına bağlı tasarım hesaplamaları yöntemini verir. Bu eğri (Şekil 5) çeşitli deneylerden sonra çıkartılmıştır. (Chantrain, 1991; Cajot, 1992; Outinen, 2001; Wohlfeil, 2004)

Örneğin S235 kalitesi seçildiğinde, oda sıcaklığında Yönetmelikler tarafından istenen emniyetli taşıma yükü oranı yaklaşık 0,5'tir. Sehim kriterlerinin çoğunlukla etkili olduğu ve tasarımcının belirli bir takım profiller arasından seçim yapmak zorunda olduğu dikkate alındığında, bu yük oranı 0,45 gibi bir değer olabilir. Bu, 600°C'lik kritik sıcaklığa karşılık gelir. S235 çeliği S460'la değiştirilirse kritik sıcaklık yaklaşık 100°C kadar artar, bu da tasarımın daha güvenli tarafta kalmasını sağlar. Bir başka deyişle tasarım yangını altında yapının ısınma eğrisinin doruğu 600 ve 700 °C arasındayken S235 yerine S460 kullanıldığı zaman yapı bu yangına dayanacaktır. (Şekil 5)



Şekil 4 Eurocode'a göre burkulma eğrileri.

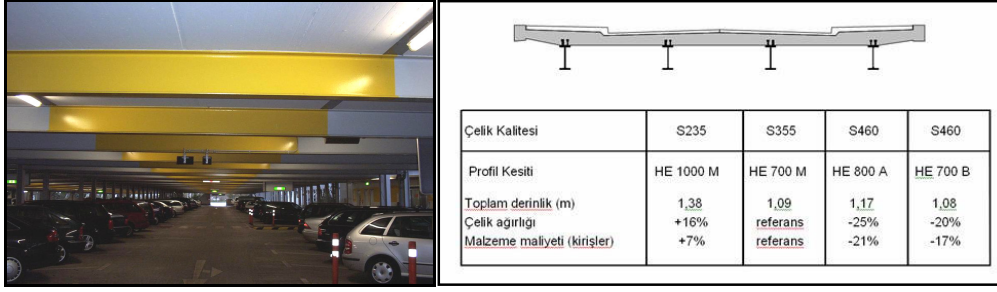


Şekil 5 Sıcaklığın fonksiyonu olarak etkin akma dayanım azalımı.

Yüksek Dayanımlı Çelikler ile Ekonomik Kazançlar

HISTAR kirişleri binalarda kolon, derin kirişlerde veya çatı makaslarında çekme elemanı olarak kullanıldıklarında yapısal ağırlıkları; malzeme, üretim taşıma ve montaj maliyetlerini ve dolaylı olarak temel maliyetlerini azaltarak önemli kazançlar sağlar.

Tipik olarak, S355 kalitesi ile karşılaştırıldığında HISTAR 460'ın maliyet farkı sadece +%5 kadardır. Yüksek akma dayanımından tam olarak faydalandığı takdirde HISTAR 460 kalitesinde kiriş, S355 kalitesinde eşdeğeri bir kirişten %25 daha hafiftir ve sadece malzeme olarak ekonomik avantaj yaklaşık %15-20 civarındadır. HISTAR 460 S235 yerine kullanılabilirliği takdirde kazançlar çok daha fazla olacaktır. (Şekil 6) Bu yüzden Almanya'daki çok katlı otoparkların çoğunda 15-17 metre açıklıklar için HISTAR 460 kalitesinde kirişler 2-2,5 m aralıklarla dizilerek kompozit olarak kullanılmaktadır.



Şekil 6 Yüksek dayanımlı çeliklerin otopark ve köprü uygulamalarında kullanımı.

Çelik-Beton Kompozit Köprüler

Karayolu ve demiryolu uygulamalarında çelik-beton kompozit köprüler temel olarak ekonomik, sağlam, uzun ömürlü ve bakımı kolay köprülerdir. Kısa ve orta açıklıklı bu köprü tiplerini optimize etmek için, H-kirişinin gövdesinin ortasından belirli bir biçimde kesilmiş iki adet T parçasından oluşan prefabrike elemanlar (Şekil 7) üst beton parçasıyla kompozit olarak kolay ve hızlı montaj için tek bir parça olarak dökülürler. HISTAR çelik ve beton içindeki T parçaları arasında kesme kuvvetlerinin güvenli aktarımını doğrulamak için yapılan deneyler olumlu sonuç vermiştir.



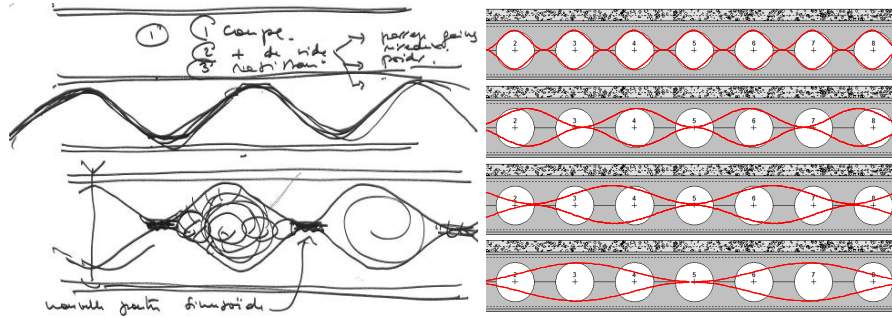
Şekil 7 Çelik-beton kompozit prefabrik köprü elemanı.

Dairesel ve Sinüs Gözlü Petek Kirişler

Bu kirişler oksijenle kesilip açılarak gövde derinliğini yükselterek üretilirler. Kesilen iki yarım parça daha sonra kaydırılarak üst üste bindirilir ve karşılayan gövde kısımları birbirine kaynaklanır. Altıgen, sekizgen ve dairesel gözlü petek kiriş uygulamaları günümüzde yaygındır. Ünlü Mimar Claude Vasconi'nin katkısıyla göz şeklinde daha geniş kiriş gövde açıklığı sağlayacak sinüs gözlü petek kiriş fikri bu alanda yaratıcı tasarım ödülü kazanarak bir yenilik getirmiştir. (Şekil 8) Bu tip petek kirişler boyuna tek kesim ve daha az kaynak gerektirdiği için daha verimli imalat sürecine sahiptir. Göz şeklindeki boşluklar servis kanallarının profil gövdesi içinden rahatça geçerek düzenlenmelerine olanak verirken kirişlerin hafifliği, şeffaflığı ve estetiği mimarlar tarafından tercih edilmektedir. (Şekil 9) ArcelorMittal tarafından Angelina™ kirişi olarak patentlenen bu kiriş ile tasarlanan binalar döşeme içi servis kanalları çözümleriyle kat yüksekliklerinin optimizasyonunda büyük rol oynar. (Vassart, 2008)

Petek kirişlerin alt ve üst yarısı iki farklı kesitte ana profilden ve iki farklı çelik kalitesinden üretilir. Bu tür petek kirişli "kompozit" kesitler özellikle üst başlığın

beton döşemeye bağlandığı kompozit yapılarda hassas optimizasyona olanak verir. Normalde yüksek dayanımlı kaliteler sehim kriterlerinin söz konusu olduğu yerlerde herhangi bir fayda sağlamazlar. Ancak yapılan araştırmalara (Demarco, 2003) göre kesitlerin “kompozit” karakterinden dolayı S460 çelik gerçekten faydalı olabileceği yerlerde kullanılırken, kesidin kalan kısmında normal dayanımlı çelik kullanılabilir. Kompozit kirişi oluştururken kirişe zati ağırlıktan dolayı oluşacak sehim kadar ters sehim verilerek veya inşaat aşamasında tabliye betonu kürünü alıncaya kadar kirişler alttan desteklenerek sehim kriteri sağlanabiliyorsa kalite yeniden tasarımda belirleyici olur.



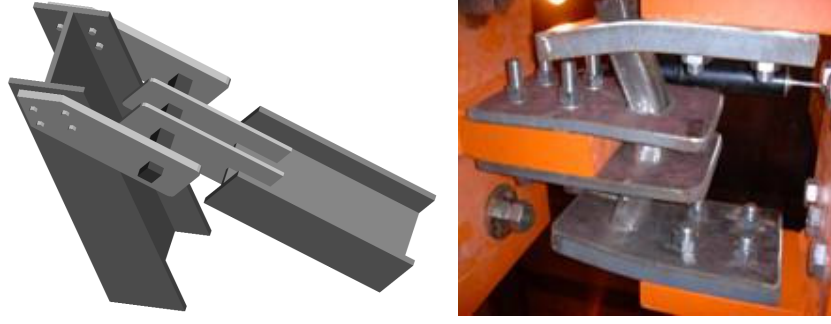
Şekil 8 Dairesel gözlü petek kirişten Sinüs gözlü petek kirişe geçiş.



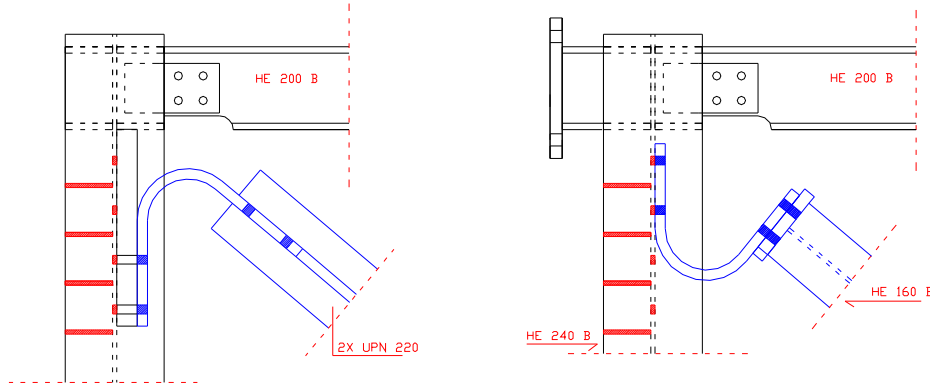
Şekil 9 Dairesel ve Sinüs gözlü petek kirişlerde servis bütünlüğü.

Enerji Tüketen Merkezi Çaprazlı Çerçeveseler

2001 yılında ArcelorMittal'in katkısıyla Avrupa'daki beş üniversiteden oluşan bir takım ile başlatılan INERD projesi (Vayas ve diğ., 2005) kapsamında merkezi çaprazlı çerçeveselerin sismik tasarımında kısmi dayanım güçlü birleşimlerin enerji tüketme potansiyeli üzerine yapılan araştırma, 'pim' birleşim (Şekil 10) ve 'U form' birleşim (Şekil 11) adıyla iki tasarımın gelişmesiyle sonuçlandı. 'Pim' birleşimlerde pim elastik olmayan eğilme ile enerjiyi tüketirken 'U form' birleşimlerde enerji tüketimi bükülmüş levha(lar)da olmaktadır. Yapılan birçok test ve sayısal modelleme sonrasında her iki birleşim, enerji tüketici çaprazların uzama kapasitesine benzer, birleşim başına 50 mm, yani bir diagonal başına kopmadan toplam 100 mm'den fazla uzama kapasitesi sağlayarak süneklik yönünden potansiyellerini kanıtlamıştır. Pim birleşim ayrıca dayanma gücü ve rijitliği bakımından gösterdiği potansiyel ile pratik piyasa kullanımına kolayca sunulabilir. Merkezi çaprazlı ve kısmi dayanım güçlü birleşimlerden oluşan bu çerçeveselerin daha iyi global plastik mekanizma kontrolü olduğu için davranış katsayısı ($q = 6$) 'klasik' tasarıma ($q = 2 - 4$) göre daha yüksektir.



Şekil 10 İki iç parçalı dikdörtgen pim birleşimi (3D görünüş ve test sırasında).



Şekil 11 U form birleşim ile iki farklı tasarım.

İçine Çelik Profil Yerleştirilen Betonarme Kolonlar

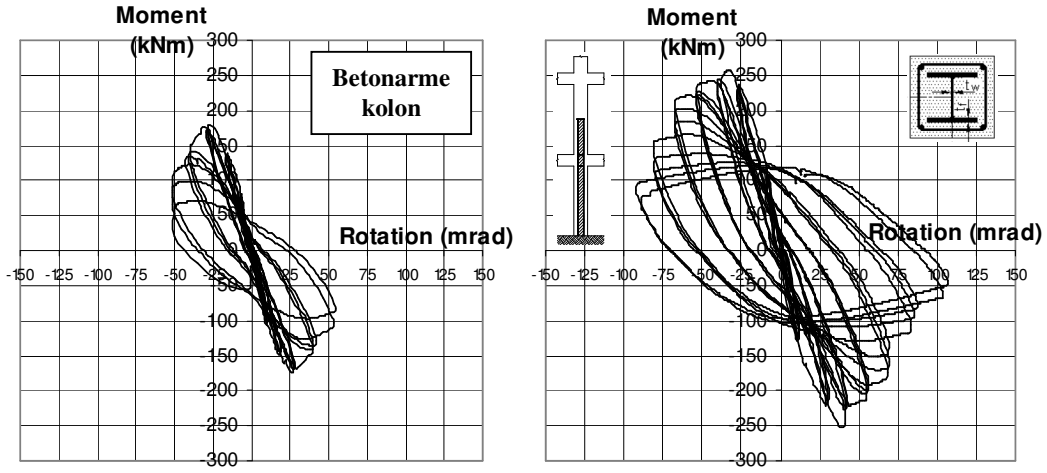
1999 Marmara Depremlerinde betonarme moment aktaran çerçevesel binalarda en sık görülen “yumuşak kat” göçme moduna karşı önlem geliştirmek üzerine yapılan yine INERD projesi kapsamında alt katlarında geniş açıklıklar istenilen betonarme binaların alt kat betonarme kolonlarının içine yerleştirilen çelik profillerin bina performansına etkisi araştırıldı. Sabit basınçla birlikte tekrarlı eğilme yüklemesi altında test edilen kolonların moment-dönme grafiği incelendiğinde içine çelik profil yerleştirilen kolonların, orijinal betonarme kolonlara kıyasla daha fazla dayanım ve süneklik sağladığı gösterilmiştir. (Şekil 12)

Çelik I-Kirişin Kutu Kolona T-Elementi ile Bulonlu Birleşimi

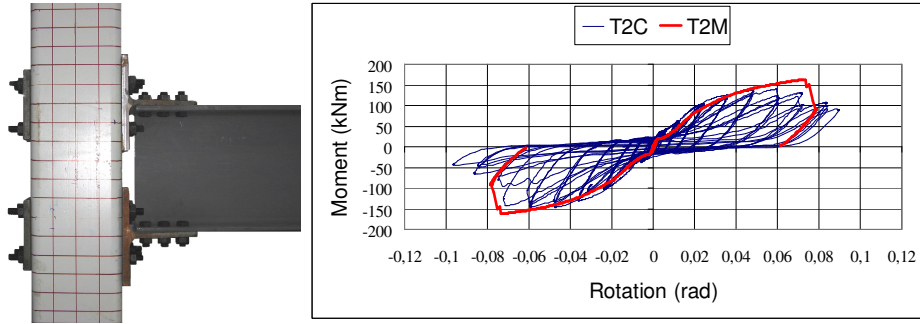
Istanbul Bogaziçi Üniversitesi'nde (Yemez, 2007) yapılan deneysel çalışmada önerilen bulonlu birleşim detayında şantiye ortamında kolay ve ekonomik uygulama ve hasarsız nakledebilmek için kolon dışına uzanan bağlantı elemanları olmaması koşulları değerlendirilerek t-bağlantı elemanları uzun kısmen yivli saplamalar ile kutu profilin içinden geçerek arka yüzeyine bulonlanmaktadır.(Şekil 13)

Yapılan deneyler sonucu yeterli dayanım seviyesinde yüksek plastik dönme ve kabul edilebilir enerji yutma kapasitesini sağlayan birleşimler yarı-rijit kısmen güçlü birleşimler olarak deprenselliği düşük olan bölgelerde moment aktaran çelik

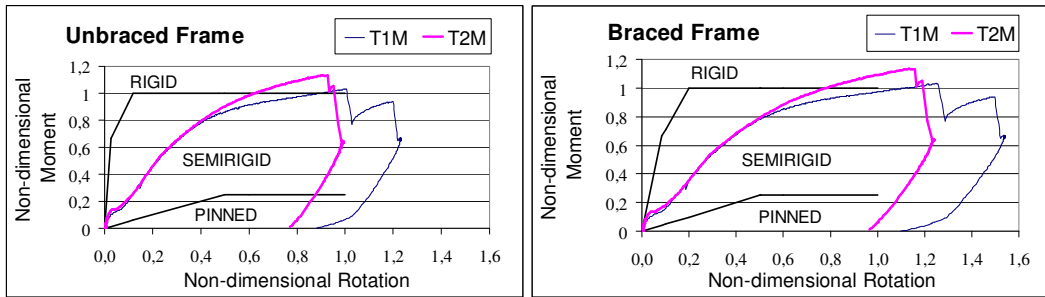
çerçevesinde veya yüksek depremsel bölgelerde çaprazlı çerçeveler ile takviyeli çelik çerçevelerde kullanılabileceği gösterilmiştir. (Şekil 14)



Şekil 12 Çiine çelik profil yerleştirilen betonaarme kolonun moment-dönme grafiği.



Şekil 13 I-kirişin kutu kolona bulonlu birleşim detayı ve moment-dönme grafiği.



Şekil 14 Eurocode 3'e göre birleşim sınıflandırması.

Teşekkür Bu çalışmaya kaynak araştırmasında verdikleri destekten dolayı ArcelorMittal Commercial Sections S.A teknik departmanına ve ArcelorMittal Distribution Solutions – Rozak firmasına teşekkürlerimi sunarım.

Kaynaklar

Cajot, L.G., et al (1992) REFAO-III, Practical Design Tools for Unprotected Steel Columns Submitted to ISO-Fire. C.E.C. Research 7210-SA/505, Final Report Eur 14348 EN, RPS Report N° 11/1991, Luxembourg.

Chantrain, Ph., et al (1991) Behaviour of HISTAR hot-rolled profiles in the steel construction – Tests. PRF Report N°116/1991.

Demarco, T. (2003) Optimisation des performances des poutres cellulaires ACB. ProfilARBED-Recherches. 24èmes Journées Sidérurgiques Internationales 2003, Paris

Donnay, B., Grober, H.,(2001) Niobium in high strength weldable beams and other structurals. Proceedings of the International Symposium “Niobium 2001”, Orlando FL USA.

EN 1993-1-1: 2005, Design of steel structures. General rules and rules for buildings.

EN 1993-1-2: 2005, Design of steel structures. General rules. Structural fire design.

EN 1994-1-1: 2004, Design of composite steel and concrete structures. General rules and rules for buildings.

EN 1994-1-2: 2005, Design of composite steel and concrete structures. General rules. Structural fire design.

Outinen J., et al (2001) High-temperature testing of structural Steel and Modelling of structures at fire temperatures. Research report TKK-TER-23, Helsinki University of technology Laboratory of Steel structures Publications 23 / 2001, Espoo, FINLAND

ProfilARBED (1998) HISTAR A new generation of rolled sections for an economical steel construction. Luxembourg

Vassart O., Cajot, L. G. and Muzeau, J. P. (2008). Development of a New Composite Cellular Beam, Proc., 5th European Conference on Steel and Composite Structures, Graz, pp. 345-350.

Vayas, I., Calado, L., Castiglioni, C., Plumier, A. and Thanopoulos, P. (2005) Behaviour of Seismic Resistant Braced Frames with Innovative Dissipative (INERD) Connections, EUROSTEEL, ISBN 3-86130-812-6.

Wohlfeil, N., et al (2004) Internal report on high temperature transient state tests on S460. Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik, TU Darmstadt.

Yemez, K. (2007) Experimental Study on the Behaviour of an I-Beam to SHS-Column by T-Stub Bolted Connection, Ph.D. Thesis, Bogazici University, Istanbul.