

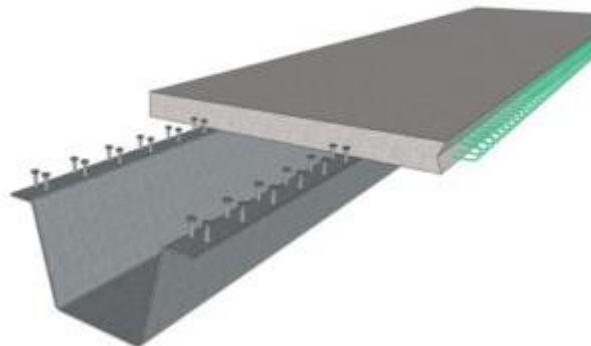
## شکلی جدید از پل‌های فولادی با دهانه کوتاه

جنبش طراحی پل‌های فلزی با دهانه کوتاه در سال ۲۰۰۹ با چالشی از سوی اداره فدرال بزرگراه‌ها (FHWA) آغاز شد. اداره فدرال بزرگراه‌ها، صنعت فولاد در آمریکای شمالی را به منظور توسعه یک پل فلزی کوتاه مقرون به صرفه با قطعات مدولار که می‌تواند در مسیرهای اصلی قرار گیرد و پاسخگوی نیازهای صاحبان امروزی پل‌ها از جمله تسریع ساخت و ساز پل (ABC) باشد، به چالش کشید. این چالش برای کمک به مقابله با بحران ایالات متحده در زمینه زیرسازیه در پل‌هایی که از لحاظ سازه‌ای ناکارآمد و از منظر عملکرد منسوخ بودند، صادر شد. نزدیک به نیمی از این پل‌ها در دسته پل‌های کوتاه قرار داشتند. (پل‌های کوتاه پل‌هایی با دهانه‌ای کمتر از ۱۴۰ فوت تعریف می‌شوند).

برای توسعه ایده جهت برآوردن نیازهای این چالش، اتحادیه پل‌های فولادی دهانه کوتاه (SSSBA) کار گروه پل‌های فلزی مدولار را سازمان داد. این کارگروه متشکل از ۳۰ سازمان به نمایندگی از SSSBA، موسسه توسعه بازار فولاد، اتحادیه ملی پل‌های فولادی، انجمن ملی مهندسان شهرستان، سازندگان پل فولادی، اعضای هیئت علمی دانشگاه‌ها، تولید کنندگان فولاد، سازمان‌های دولتی و صاحبان پل‌ها بود. گروه گزینه‌های بسیاری را در نظر گرفت و در اکتبر سال ۲۰۱۱ تصمیم بر آن شد که از تکنولوژی تیر لوله‌ای تولید شده از فولاد کم عمق (که با دستگاه خم کاری *press brake* شکل گرفته است) که همچنین با عنوان تیر ورق تاشو (*folded plate*) شناخته شده است، استفاده شود چرا که بهترین فرصت برای رسیدن به اهداف FHWA به لحاظ اقتصادی، نوآوری و شیوه‌های ABC محسوب می‌شد.

## در مورد این فن آوری

سیستم تیر لوله‌ای تولید شده از فولاد کم عمق که با دستگاه خم کاری *press brake* شکل گرفته متشکل از جعبه‌های دوزنقه‌ای کم عمق مدولاری است که از تیر ورق سازه‌ای فولادی سرد نورد شده، ساخته شده است (شکل ۱). شکل‌های متفاوت فولاد در هر دو مورد فولاد گالوانیزه شده با روش غوطه‌وری گرم یا فولاد خود حفاظ در دسترس هستند. هنگامی که ورق شکل گرفت، گل میخ‌های برشی به بال بالایی آن جوش داده می‌شوند. سپس در کارگاه ساخت یک دال بتن مسلح بر روی تیر اجرا و عمل آوری می‌گردد تا به یک واحد مدولار کامپوزیت تبدیل گردد. پس از آن ماژول‌ها به صورت طولی با استفاده از بتن فوق توانمند (UHPC) که یک رده نسبتاً جدیدی از مواد کامپوزیت سیمانی پیشرفته است، به هم متصل می‌گردند.



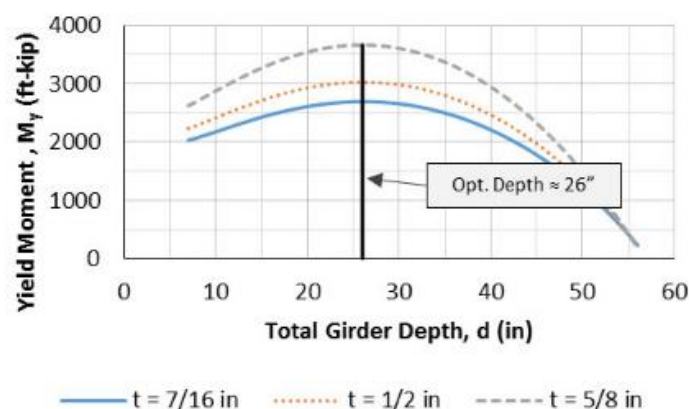
شکل ۱. شکل نمادین از سیستم مدولار تیر لوله‌ای تولید شده از فولاد *press brake*

این سیستم مزایای متعددی نسبت به راه‌حل‌های سنتی پل‌های فلزی با دهانه کوتاه ارائه می‌دهد. تیر به خودی خود فوق‌العاده ساده تولید می‌شود و نیاز به حداقل جوش ممکن دارد. به دلیل طراحی کامپوزیت-مدولار سیستم، نیاز سیستم به استفاده از جزئیات بیشتر مانند سخت کننده‌ها و یا قاب‌های عرضی کاهش می‌یابد. همچنین، به علت طبیعت مدولار سیستم، واحد کامپوزیت می‌تواند به راحتی به محل مورد نظر پل حمل شود، این کار به ساخت و ساز سرعت بخشیده و منجر به کاهش وقفه ترافیکی می‌گردد. در عین حال که عرشه‌های بتن پیش ساخته مدولار توصیه می‌شوند، اما گزینه‌های متعدد دیگری برای عرشه وجود دارد. بعضی از این عرشه‌ها عبارت‌اند از: استفاده از پانل‌های عرشه بتن پیش ساخته با عمق کامل یا جزئی، عرشه بتن درجا و یا عرشه‌های کامپوزیتی پیشرفته‌تر مانند سیستم صفحات ساندویچی (مصالح کامپوزیت سازه‌ای متشکل از دو صفحه فلزی که به وسیله یک هسته الاستومر پلی اورتان به هم متصل شده‌اند).

### تحقیق و توسعه

بر خلاف برش و جوشکاری مورد نیاز برای تیرهای لوله‌ای، این سیستم از نورد سرد برای عرض و ضخامت استاندارد ورقه‌ای کارخانه‌ای برای تیرهای لوله‌ای، کاهش هزینه‌های ساخت و عملکرد اقتصادی فولاد مورد استفاده در این سیستم بهره می‌گیرد. برای هر ورق کارخانه‌ای استاندارد، یک مطالعه طراحی با تکرار نسبت تیر در دستیابی به حداکثر ظرفیت خمشی آن انجام گرفت (در ابتدا به صورت ظرفیت خمشی تسلیم کامپوزیت تخمین زده شد). در این مطالعه، شیب جان به صورت ثابت و برابر با ۱ به ۴ در نظر گرفته شد. شعاع خم داخل تیرها نیز برابر با مقدار ثابت پنج برابر ضخامت ورق حفظ شد و عرض بال بالا به مقدار ثابت ۶ اینچ داشته شد. عرشه بتنی کامپوزیت دارای عرض ۷٫۵ فوت و ضخامت ۸ اینچ بود. بتن با وزن طبیعی با نسبت‌های مدولار ۸ و مقاومت فشاری ۴KSI فرض شد. در طراحی، همه ورق‌ها با تنش تسلیم ۵۰KSI در نظر گرفته شدند.

شکل ۲ نتایج حاصل از این ارزیابی را برای یک نمونه ورق کارخانه‌ای استاندارد که برای طراحی انتخاب شده نشان می‌دهد. از این نمودارها مشخص می‌شود که برای هر عرض و ضخامت از ورق، یک عمق بهینه در نقطه ماکسیمم لنگر وجود دارد؛ افزایش یا کاهش عمق از این نقطه، منجر به کاهش مدول مقطع و در نتیجه کاهش لنگر تسلیم می‌گردد. به جای انتخاب یک عمق مطلوب برای هر ورق، صفحات با عرض کارخانه‌ای استاندارد مشترک با هم گروه بندی شدند و عمقی مطلوب برای هر گروه انتخاب شد. برای افزایش ظرفیت خمشی و دهانه‌های بزرگ‌تر می‌توان از ورقه‌های کارخانه‌ای استاندارد عریض‌تر استفاده نمود.



شکل ۲. مقایسه طراحی برای ورقه‌های کارخانه‌ای استاندارد. ۹۶ اینچی.

تست خمشی فیزیکی نمونه‌های انتخابی به منظور بررسی عملکرد و ظرفیت سیستم پیشنهادی در دانشگاه غرب ویرجینیا انجام شد. در اوایل تابستان سال ۲۰۱۳، آزمایش‌هایی بر روی نمونه‌های تیرهای فولادی *press brake* در هر دو حالت کامپوزیت و غیر کامپوزیت انجام گرفت.

فولاد به کار رفته برای نمونه ورقه‌ای کارخانه‌ای مطابق با استاندارد ASTM A572 GR ۵۰ و دارای ابعاد  $۸۴ \times ۱۶ / ۷ \times ۴۸۰$  اینچی بودند. عرشه کامپوزیت از بتنی با وزن طبیعی ساخته شده بود. مقاومت فشاری متوسط ۶ نمونه استوانه‌ای به اندازه ۴,۱ KSI بود.

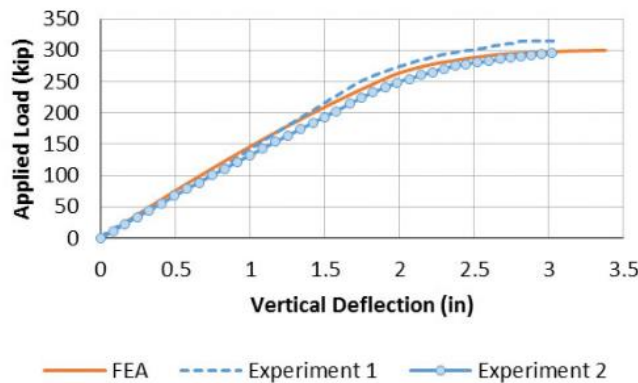


شکل ۳. راه اندازی آزمایش تجربی (نمونه کامپوزیت).

علاوه بر آزمایش فیزیکی تیرهای فولادی ساخته شده به روش *press-brake*، ارزیابی سه بعدی با مدل سازی المان محدود با استفاده از نرم افزار آباکوس انجام شد. تیرهای فولادی در این مطالعه با استفاده از قانون سه خطی الاستیک و پلاستیک که شامل اثرات کرنش و سخت شدگی فولاد است، مدل شده‌اند. اطلاعات تنش-کرنش برای تیرها از تست کوپن که در مرکز پژوهشی راه FHWA Turner-Fairbank's انجام شد به دست آمد. بتن نیز با استفاده از مدل بتن پلاستیسیته آسیب دیده موجود در آباکوس مدل شد.

در شکل ۴ یک مقایسه از اطلاعات به دست آمده از تست خمشی دو نمونه کامپوزیت و نتایج حاصل از آنالیز المان محدود ارائه شده است. همان‌طور که نشان داده شده، دقت مدل سازی، رفتار سیستم پیشنهادی را به دست می‌دهد. همچنین میزان نیروی نشان داده شده کاملاً قابل توجه است؛ یک تیر تک مدولار قادر به تحمل نیرویی چهار برابر بیش از بارهای طراحی کامیون (با وزن ۷۲ KIPS) مربوط به استاندارد AASHTO HL-۹۳ می‌باشد.





شکل ۴. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی (FEA).

ارزیابی طراحی و امکان سنجی سیستم پیشنهادی مطابق با ضوابط AASHTO LRFD انجام شد. برای هر تیر، اثرات بارهای مرده و زنده (به عنوان مثال خمش، برش و تغییر شکل) محاسبه و با محدودیت‌های AASHTO مقایسه شد. در این سیستم تأکید بر استفاده از ورق کارخانه‌ای استاندارد برای ساخت تیر فولادی از واحدهای مدولار بود؛ بنابراین، در هنگام ارائه راه حل به مهندسان و سازمان‌های مالک، ورق‌هایی که به طور منظم تولید شده بودند در اولویت قرار گرفتند. نتایج این مطالعات امکان سنجی، گزینه‌های طراحی زیر را به همراه داشت. لازم به ذکر است که در حالی که سیستم برای دهانه‌های تک با طولی تا ۶۰ فوت توصیه می‌شود (با توجه به در دسترس بودن صفحه و طول‌های مرسوم *press brake*)، اما به راحتی می‌توان از آن برای تیرهایی با دهانه‌هایی تا ۸۰ فوت نیز استفاده کرد:

- تیرهای ساخته شده از صفحات کارخانه‌ای استاندارد  $۷۲ \times ۱/۲$  اینچ (قابل استفاده برای دهانه‌هایی تا ۴۰ فوت).
- تیرهای ساخته شده از صفحات کارخانه‌ای استاندارد  $۹۶ \times ۱/۲$  اینچ (قابل استفاده برای دهانه‌هایی تا ۶۰ فوت).
- تیرهای ساخته شده از صفحات کارخانه‌ای استاندارد  $۱۲۰ \times ۸/۵$  اینچ (قابل استفاده برای دهانه‌هایی تا ۸۰ فوت).

همچنین، در مواردی که ضوابط بازشوهای هیدرولیکی و فاصله آزاد، استفاده از یک مقطع کم عمق را تأکید کند، از آنجایی که طراحی تیر بهینه تنها عمقی برابر با ۱۲ اینچ را ارائه می‌دهد، انتخاب صفحات کارخانه‌ای استاندارد با ابعاد  $۶۰ \times ۱/۲$  مفیدتر خواهد بود. همچنین، طراحی بهینه یک تیر ورق ساخته شده از ورق‌های استاندارد کارخانه‌ای با ابعاد  $۶۰ \times ۱/۲$  اینچ منجر به عرض خارجی کمتر از نیمی از عرشه بتنی ۷٫۵ فوتی (یک حد بالایی مشترک برای ملاحظات حمل و نقلی) شد، به این معنی که دو تیر ورق می‌تواند روی یک عرشه بتنی تک قرار گیرد. تیر کامپوزیتی «تیر دوقلو» برای دهانه‌هایی تا ۶۵ فوت قابل استفاده است.

#### از آزمایشگاه به محل ساخت و ساز

برایان کیلبر، (P.E.)، یک کمک مالی از برنامه تحقیق و توسعه نوآورانه پل‌ها (IBRD) از FHWA دریافت نمود تا پل Amish Sawmill در خیابان دیلون ۱۳۵۸ در شهر فرینک ایالت آیووا را جایگزین نمایند. کمک مالی ۳۵۰ هزار دلاری IBRD زمینه را برای تکمیل نصب این سیستم پیشنهادی تیر لوله‌ای ساخته شده با فولاد *press-brake* مدولار برای اولین بار در ایالات متحده آماده نمود.

ساخت و ساز پل Amish Sawmill در اواخر تابستان ۲۰۱۵ آغاز شد و در دسامبر ۲۰۱۵ (شکل ۵) به پایان رسید، تکمیل پروژه از نظریه تا پیاده سازی در کمتر از سه سال، یک شاهکار قابل توجه در زمینه ساخت پل بود. گزینه‌های مختلف عرشه کامپوزیت به پیمانکاران محلی ارائه شد که استفاده از بتن درجا به عنوان گزینه نهایی انتخاب شد. این پل توسط یک گروه محلی ساخته نشد چرا که بودجه آن توسط فدرال تأمین شده بود. از آن جا که ساخت و ساز پل استاندارد بود و هیچ تخصص ویژه‌ای مورد نیاز نبود، پیمانکاران محلی هم می‌توانستند این پروژه را انجام دهند. این پل در تاریخ ۸ ژانویه ۲۰۱۶ با یک مراسم بریدن ربان همراه با چند تن از مقامات دولتی سازمان حمل و نقل افتتاح شد. محققان دانشگاه ویرجینیا غربی، دانشگاه مارشال و دانشگاه وایومینگ در حال ادامه نظارت محلی بر عملکرد پل هستند.



شکل ۵. پل تکمیل شده Amish Sawmill (شهر یوکانان در ایالت اوهایو).

#### دگرگون شدن طراحی پل‌های فلزی با دهانه کوتاه

دپارتمان‌های ایالتی حمل و نقل متعددی به ساخت و ساز پل‌ها با تیرهای فولادی تولید شده با فرآیند press brake ابراز تمایل کرده‌اند. در حال حاضر، ساخت دو پل با تیرهای فولادی تولید شده با فرآیند press brake در ویرجینیای غربی برای سال آینده برنامه ریزی شده است.

این تکنولوژی از آنجایی جذاب است که صرفه جویی قابل توجهی از نظر مالی، سهولت حمل و نقل و ساخت، ساخت و ساز سریع، تطبیق پذیری و تنوع در طراحی و پایداری به همراه دارد. فولاد بازیافتی‌ترین مواد در جهان محسوب می‌شود، به طوری که می‌توان در پایان عمر پل، آن را تبدیل به محصولات فولادی دیگر نمود.

مترجم: مریم گلستانی

منبع:

<http://www.structuremag.org/?p=11167>