

## پل های عابر پیاده فولادی GFRP بادوام و سبک

## خلاصه

از مواد پیشرفته برای سبک سازی، دوام و زیبایی شناسی پل های عابر پیاده استفاده می شود. فولاد ضد زنگ و GFRP (شیشه ای تقویت شده با پلیمرهای فیبری) مواد با دوام بالا هستند که به جهت خواص برجسته مکانیکی و زیباشناختی با شکوه استفاده می شوند. می توان هزینه ساخت و ساز زیاد را به لطف کاهش هزینه نگه داری به جهت استفاده از این مصالح کنترل کرد. استفاده از ترکیب فولاد و GFRP جهت ساخت سازه های ترکیبی باعث سبک سازی و افزایش دوام و سختی این سازه ها می شود. در این مطالعه ۴ پل با ساختار ترکیبی فولاد و GFRP ارائه شده است. همه این پل ها در اسپانیا واقع شده اند.

## ۱. مقدمه

مصالح پیشرفته مانند فولاد ضد زنگ و GFRP (شیشه ای تقویت شده با پلیمرهای فیبری) مواد با دوام بالا هستند که به جهت خواص برجسته مکانیکی و زیباشناختی با شکوه استفاده می شوند. افزایش استفاده از این مواد پیشرفته در طراحی سازه می تواند تا حدی به افزایش آگاهی از مدیریت عمومی در مورد استفاده از مصالح مصرفی شود و نیاز به نگهداری آنها را کاهش می دهد.

علاوه بر داشتن مقاومت مکانیکی بیشتر، دارای ظرفیت مورد استفاده مجدد بیشتر، و غیره می باشند. با وجود تاثیری که مواد کامپوزیت و فولاد ضد زنگ در هواپیما و نیروی دریایی داشت، ورود آن به ساخت و ساز، معماری صنعتی و یا بسیاری از محصولات مصرفی برای بیش از ۵۰ سال، اخیر است. در دو دهه گذشته برخی از سازه های جالب، عمدتاً پل های عابر پیاده، ساخته شده است. حتی با وجود اینکه هزینه استفاده از این مواد بیش از مواد معمولی (فولاد و بتن) است، ولی با استفاده از مصالح کامپوزیت و یا فولاد ضد زنگ به صرفه جویی قابل توجهی در نگهداری آن اتفاق می افتد.

GFRP خواص مکانیکی را افزایش و وزن سازه را کاهش می دهد اما با توجه به مدول نسبتاً پایین GFRP سازه انعطاف پذیرتر و حساستر به اثرات دینامیکی می باشد. ترکیبی از GFRP و فولاد باعث افزایش سختی سازه و کاهش وزن آن می شود. پل عابر پیاده زومایا، ساخته شده در سال ۲۰۰۸، اولین پل با ساختار هیبرید فولاد ضد زنگ-GFRP، بر اساس این مفهوم بود.

## ۲. پل عابر پیاده در سانت فرویتس د باخس (بارسلونا، اسپانیا)

سنت Fruitós یک شهر کوچک با بیش از ده قرن تاریخ است. واقع در ۵۹ کیلومتری از بارسلونا، نزدیک به مانرسا، که یک موقعیت استراتژیک برای ارتباطات جاده ای در کاتالونیا به شمار میرود. قرن بیستم با افزایش رشد اقتصادی و رشد جمعیت، مجبور به ایجاد مناطق مسکونی جدید در اطراف مناطق دارای هسته تاریخی، و در نتیجه ایجاد زیرساخت های عمومی جدید شد.

محله روسالدا، یک منطقه مسکونی جدید از سنت Fruitós که میزبان بیش از ۶٪ جمعیت آن در یک منطقه تجاری و بقیه شهر توسط C۱۴۱N، به وسیله جاده ملی از هم جدا شده اند. عبور از این جاده باعث بسیاری از حوادث و سوانح شده است، که برخی از آنها با تلفاتی در چند سال گذشته همراه بوده است، شهرداری تصمیم برای از بین بردن این خطر به ایجاد یک پل عابر پیاده

پرداخته است. پل باید علاوه بر عملکرد اصلی، نقطه عطفی در ماهیت پویا و نوآورانه شهر را به نمایش بگذارد. محل پل توسط مالک برای دسترسی مستقیم به یک ایستگاه اتوبوس ثابت شد. پل برای عبور از جاده و عبور از موانع آن با ارتفاع تقریبی ۵,۵ متر با اختلاف ارتفاعی برابر با ۶ متر ساخته شد. برای ایجاد حالت دروازه ای برای شهر از یک قوس کج برای اتصال یک منطقه تجاری به مسکونی استفاده شد. (یک سطح شیب دار برای حفظ حریم خصوصی و کاهش دید در خانه های مجاور اعمال شد).



Fig. 1 Sant Fruitos Footbridge.

### شکل ۱. پل عابر پیاده سنت فرویتوس

#### ۲,۱ توصیف و شرح سازه

استفاده از سازه های کلاسیک به عنوان اعضای اصلی و فولاد ضد زنگ و GFRP (الیاف شیشه تقویت شده با پلیمر) با سطح عملکردی بالا و ساختاری نوآورانه مصالح مفهیمی کلیدی هستند. ایجاد قوس باعث بالارفتن تحمل تنش و اتصالات و بالا رفتن بهره وری آن می شود. سازه هوشیار، بسیار شفاف و ساده است، و در عین حال از اعضای بسیار بلند و باریک و قوسی شکل استفاده شده است. در حال حاضر برای عبور افراد معلول و دوچرخه، راه پله بتنی بلند و باریک و بلند و پانوراما در سمت مسکونی، و خاکریزی پله / رمپ و در طرف دیگر در دسترس می باشد. ساختار، دارای طول کلی ۵۵ متر، با یک قوس گره خورده با عرشه میانی می باشد. اعضای اصلی از فولاد زنگ نزن ساخته شده است. دهانه ۴۰ متری قوس دارای یک بخش مثلثی تقریباً متساوی الاضلاع با ارتفاع ۰,۴۵ متر که دارای زاویه ۳۰ درجه با اعضای عمودی است، می باشد. مقطع قوسی شکل با صفحات فولادی ۲۰ میلی متری ساخته شده اند. ۳ متر از طول عرشه شامل یک عرشه دوزنقه طولی شکل با ریب می باشد. سطح مقطع جعبه ها از ورقی ۱۰ میلی متری ساخته شده است. شکل آن تقریباً مثلثی با پهنای ۱,۶ متر با عمق پیوسته ۰,۶ متر می باشد. که در ارتفاع ۰,۱۵ و ۰,۶ متری قرار دارند. ۱,۴ متر از طول ریب ها دارای عمقی متغیر بین ۰,۰۹ تا ۰,۱۵ می باشند. عرشه به قوس در یکی از نقاط پایان (سمت آسانسور) و در یک حد وسط بخش اتصال (۳۶ متر از سمت آسانسور) بهم می رسند. میل گردهای فولادی ضد زنگ، دارای قطر ۲۸ میلیمتر، در فواصل ۳ متری، به عرشه و قوس متصل می شوند.

قوس در سمت آسانسور گیردار و در سمت دیگر به پایه پل کوچک متصل می شود. برای اینکه هیچ نیروی افقی به پایه های پل و به المان های مایل که در انتهای قوس به آن متصل شده اند، وارد نشود ۵ متر پایین تر از سطح عرشه یک عرشه V شکل ایجاد می شود. قوس سبک و اتصال آن به عرشه از جمله ویژگیهای این سازه است که باعث ایجاد جلوه های بصری و سبک سازی آن میشود.

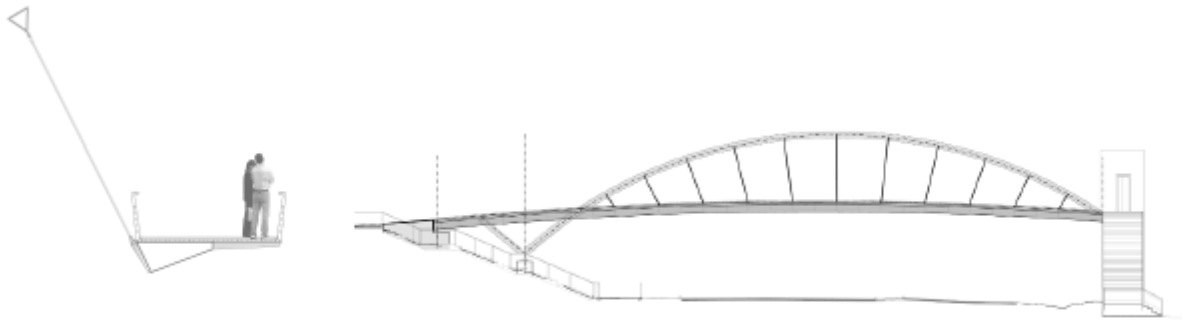


Fig. 2 Sant Fruits Footbridge. Typical cross-section and elevation.

## شکل ۲. نما و برش کلی پل عابر پیاده سنت فرویتوس

فولاد زنگ نزن دوبلکس ۱،۴۱۶۲ استفاده شده در پایه پل دارای میزان نیکل کمتری از دیگر انواع دوبلکس فولاد زنگ نزن می باشد. در نتیجه از لحاظ قیمت در نهایت نیز کمتر از انواع دیگر دوبلکس های زنگ نزن می شود. که برای محیط های با میزان ارتعاش متوسط با تنش تسلیم ۴۸۰ مگا پاسکال مناسب است. عرشه شامل پنل های GFRP با پهنای ۰،۵ متر با عمق ۴ سانتی متر به صورت تکیه گاه های ساده روی ریب ها یا به وسیله شاهیهای جعبه ای حمایت می شوند. برای جلوگیری از لغزش این پنل، یک پوشش سطحی از شن و ماسه کوارتز روی آن را می پوشانند.

## ۲،۲ ساخت و ساز

فرآیندهای ساخت و ساز با فولاد ضد زنگ مشابه به ساخت و ساز با فولاد کربن، اما نه، یکسان می باشد. تکنیک های خاص از برش، خم، جوش و یا پایان اتخاذ شده اند. جعبه به دو بخش تقسیم می شود، که به وسیله تکیه گاه های موقتی حمایت می شوند. پس از نصب و راه اندازی جعبه و اتصال آن به سازه بالابر، قوس قرار داده شد و متصل به عرشه باقی می ماند. در طول ساخت و ساز ترافیک برای تنها چند ساعت در دو شب مختلف ایجاد شد، (شکل ۳).





Fig. 3 Sant Fruitos Footbridge. Assembly of the arch.

### شکل ۳. عملیات مونتاژ قوس پل عابر پیاده سنت فرویتوس

#### ۲.۳ رفتار سازه

در یک سازه عابر پیاده با اعضای بلند و باریک آن اطمینان از عملکرد خوب استاتیکی و دینامیکی به منظور حصول اطمینان از سطح مناسب از ایمنی و آسایش برای کاربران اساسی است. برای رسیدن به این هدف، آزمایش بار استاتیک و دینامیک انجام شده است. آزمون بار استاتیک توسط قرار دادن یک پالت، و با وارد کردن یک بار با توزیع یکنواخت تا ۲ و ۴ کیلونیوتن بر مترمربع انجام می شود. تغییر شکل استاتیکی به دست آمده در این آزمون کمی بالاتر از انتظار بود. بازیابی تغییر شکل (۹۵٪) بسیار خوب بود. آزمون دینامیکی با راه رفتن مردم، دویدن و یا پریدن (۱ تا ۹ نفر) با در نظر گرفتن موارد بار خارج از مرکز انجام شد. ۲۱ مورد بار مختلف برای پوشش طیف گسترده ای از شرایط محتمل تعریف شد. پاسخ پل به این بارهای دینامیکی مطابق مقررات، بسیار به نتایج حاصل از محاسبه دینامیکی شبیه بود. نسبت میرایی بحرانی برابر ۰,۰۱۲۷ محاسبه شده است.

#### ۳. دو پل عابر پیاده روی راه آهن سرعت بالا در Vilafant (اسپانیا)

خط راه آهن با سرعت بالا، بارسلونا و مرز فرانسه را در ۶ متر زیر سطح زمین در عبور از شهر Vilafant متصل کرده است. برای این راه آهن دو پل عابر پیاده تعبیه شده است. سازه، با دهانه‌های با طول ۴۶ متر، به طور یکنواخت با زمین مجاور خود اتصال دارد. استفاده از اشکال هندسی غیر معمول ساخته شده با استفاده از فولاد ضد زنگ و GFRP در طرحی نوآورانه، باعث ظهور یک راه حل زیبا می شود.

این دو پل دارای طول اصلی ۴۵,۲ متر و عرض عرشه ۴ متری است. سطح مقطع شامل دو خرپای تکیه گاهی Vierendeel همراه با دو ورق GFRP به عنوان شبکه سازه ای می باشد. ارتفاع خرپاها از ۳,۴ متر در تکیه گاه ها به ارتفاع ۱,۲ متر در میانه دهانه می

رسد. پایین خرپا در کاری نوآورانه به صورت برجسته به سمت بیرون می باشد. وتر به ارتفاع ثابت از ۳۵۰ میلی متر و عرض ثابت ۳۷۶ میلی متر است ضخامت پایین وتر با توجه به نوع نیاز سازه ای متفاوت است. بالای وتر است مثلثی شکل با ارتفاع و عرض ۳۵۰ میلی متر ثابت است. ضخامت وتر ثابت و برابر با ۲۰ میلی متر در طول کل پل است. خرپا واقع در هر دو انتها پل به همان شکل مثلثی بالای وتر که قبلاً ذکر شده ، می باشد.

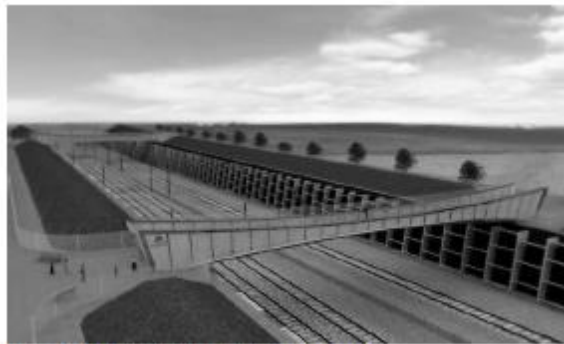


Fig. 4 Vilafant footbridges. Render.

شکل ۴. رندر پل های عابر پیاده ویلافت

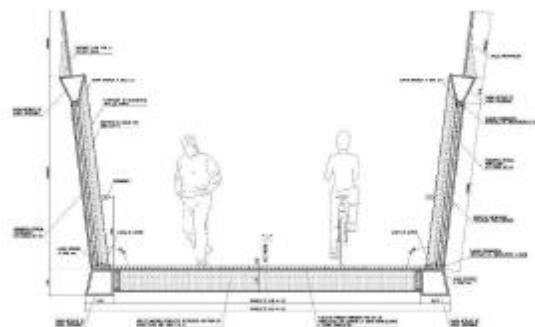


Fig. 5 Vilafant footbridges. Typical cross-section.

شکل ۵. برش و مقطع کلی پل های عابر پیاده ویلافت

عرض مقطع ۴٫۶ متر است و عرض راهرو حدود ۴٫۳ متر (شکل ۵) است. عرشه با استفاده از پنل های GFRP ساخته شده است. دو تیر مختلف عرضی استفاده می شود، نوع اول،  $۱۵ \times ۱۵ \times ۳۰۰$  میلی متر ساخته شده از GFRP و فولاد ضد زنگ می باشد. تیرهای فولادی مستطیلی شکل به ابعاد  $۲۰ \times ۳۰ \times ۳۵۰$  میلی متر می باشد. فاصله بین GFRP برابر ۱٫۰۲ متر و تیرهای فلزی بین آنها هستند. در هر دو انتها از تیرهای دوبلکس زنگ نزن استفاده می شود. تیرهای فولاد ضد زنگ به وتر پایین در همه طرف ها برای پایدار ماندن جوش داده شده است.

اتصال بین پایین وتر و تیرهای عرضی GFRP به صورت اتصال پیچی است. پنل های GFRP بین خرپاهای Vierendeel از دو صفحه با ضخامت ۴ میلیمتر تشکیل شده است. پنل های GFRP به هر دو وتر به وسیله پیچ های ضد زنگ متصل می شود. پنل

های کف GFRP به سادگی توسط تیرهای کف تحمل شده و اتصال با پیچ و مهره استاندارد که به طور خاص برای این نوع از پانل های تهیه شده، برقرار می شود.

اطراف پل با بتن مسلح ساخته شده است. ارتفاع آن حدود ۹٫۶ متر و در دو مرحله ساخته شده است. در مرحله اول، کل ارتفاع ۸٫۱ متر و یک ورق از فولاد در سمت چپ تعبیه شده است. بتن ریزی نهایی انجام شده و پس از آن پل عابر پیاده واقع شده است انجام شده و پایه های آن به صفحه بلبرینگ فولاد جوش داده می شود. عرض منطقه مجاور ۵٫۶ متر است. دیوارهای سبز رنگ برای ادغام پل پیاده رو با محیط اطراف به صورت ردیفی قرار گرفته است.

انتظار می رود ساخت دو پل Vilafant تا پایان سال ۲۰۱۱ به پایان برسند. ساختار فلزی که به دو بخش قابل حمل و نقل و مونتاژ در محل تقسیم می شوند، کامل می شوند.



Figs.6 and 7 Stainless-steel structure at the steel yard.

شکل ۶ و ۷. سازه ی فولاد ضدزنگ در کارگاه ساختمانی

#### ۴. پل عابر پیاده روی رودخانه SEGRE در Lleida

این پل جدید روی رودخانه SEGRE تا اکتبر ۲۰۱۰ کامل و مورد بهره برداری قرار می گیرد. پل مرکز شهر را به پردیس دانشگاه متصل می کند. سازه در منطقه متراکم شهری با ساختاری قوی و نه مسلط بر محیط زیست ساخته شده است.

۴٫۱ شرح ساختار



این پل از یک تیر کامپوزیت آهن و بتن پیوسته با چهار دهانه ۳۶٫۳ و ۴۹ و ۴۴٫۳ و ۳۳ متری تشکیل شده است. سه پایه بتن مسلح با اتصالات صلب به عرشه متصل شده است. ازین طریق پایه های پل سازه ای ظریف و انعطاف پذیر را فراهم می کند. قسمت اصلی عرشه شامل شاه تیر جعبه ای با پهنای ۵ متر، یک کنسول با پهنای ۲٫۷ متر در یک طرف و استفاده از ترکیب فولاد و تخته GFRP شفاف برای پلتفرم می شود. مرزها به صورت دیوارهای موجود یا جدید به طور پیوسته در اطراف شهر ساخته میشود. عرشه شامل شاهتیرهای کامپوزیتی جعبه ای با دابل کامپوزیت های روی پایه پل با کنسول در هر دو طرف می باشد.



*Figs. 8 and 9 Footbridge over Segre River. General views.*

### شکل های ۸ و ۹. منظره کلی پل های عابر پیاده روی رودخانه Segre

در بالادست تخته های GFRP کنسولی برای پیاده رو سازه استفاده می شود. پانل های شفاف در برخی از قسمت از نرده (شکل ۱۱) استفاده شده است. برای عملکرد بالا داشتن مصالح نیاز به کمی نگه داری از طریق یخ زدایی با نمک و سبک سازی و طراحی نور در پس زمینه می باشد.



*Fig. 10 Typical Cross Section.*

### شکل ۱۰. برش مقطع متداول



Fig. 11. Railings with GFRP panels.

### شکل ۱۱. نرده گذاری با پنل های GFRP

عرشه های کامپوزیتی فولاد-بتن یا فولاد-GFRP میتوانند به صورت پیش ساخته استفاده شوند که باعث کاهش زمان ساخت و اثرات زیست محیطی و کاهش بارمرده می شود.

شب اول پل عابرپیاده که توسط یک مسیر روشن شده توسط لامپ های LED کنترل شده با کامپیوتر مشخص شده بود. سیستم نوری پیشرفته اجازه یک پالت رنگ کامل با عملکرد دینامیکی را می دهد. رنگ هایی که کم کم تغییر میکنند مطابق با فصل ها تنظیم شده و برای جشن ها و تعطیلات UPSهایی طراحی شده اند. در شب، پل پیاده رو تبدیل به یک گرم شب تاب معلق در هوا بر روی رودخانه می شود که شهروندان برای قدم زدن و احساس تعامل با این فضای عمومی در آن حضور پیدا می کنند.

مواد کامپوزیت شفاف (GFRP) در قالب پنل های کف سازه و پنل های دیوار، هم برای نرده و هم کف پوش استفاده شده است. عملکرد استاتیکی و دینامیکی نگرانی اصلی در طراحی بود. مردم بسیار حساس به لرزش و جزئیات به پایان رساندن بودند. هر دو تست استاتیکی و دینامیکی، انجام شد و پاسخ به دست آمده سازه بسیار شبیه به پیش بینی مرجع آئین نامه شده بود.

### ۴,۲ ساخت و ساز

روند ساخت و ساز توالی معمول غالب برای پل های فولادی و بتن کامپوزیت بدون تکیه گاه موقت است. سازه فلزی به بخش ها و اعضای نصب شده در محل به وسیله تکیه گاه موقت تقسیم می شود. پس از نصب و اتصال جعبه ها به پایه های پل دال هی بتنی ریخته می شوند. زیر تخته GFRP و پایان کار به سرعت انجام شد.

### ۵. پنج پل های عابر پیاده فولادی GFRP روی بزرگراه T-۱۱ در تاراگونا

پل T-۱۱ شامل ۵ پایه پلی مشابه در موقعیت های مختلف در سراسر بزرگراه T-۱۱ و دو دهانه پیوسته خرپایی Vierendeel با طول دهانه متفاوت بین ۱۹,۵ و ۲۹ متر است. مقطع عرضی دارای پهنای ۲,۸۵ متر با یک راهروی آزاد ۲,۱۲ متری می باشد. پل پیاده رو، هر دو طرح منحنی و ارتفاع را دارد.





Fig. 12 Visualization of the T-11 footbridge.

شکل ۱۲. نماسازی و تجسم پل عابرپاده T-۱۱

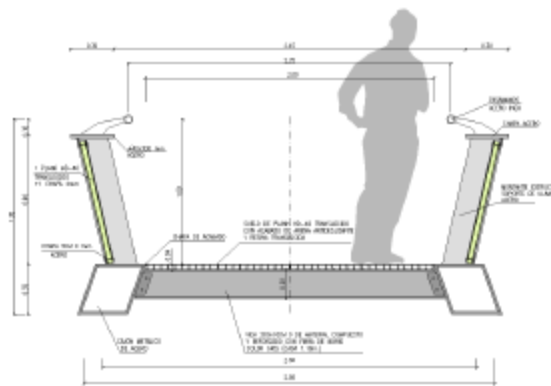


Fig. 13. Typical cross-section

شکل ۱۳. برش مقطع متداول و معمول

وتر پایین دارای شکل دوزنقه با شبکه تمایل به افزایش انعکاس نور خورشید می باشد. ضخامت وتر پایین در میان پایه های پل ها بسته به دهانه های مختلف متفاوت است و همیشه ضخامت آن برای داشتن لنگرهای منفی قویتر بیش از شمع است. حداکثر ضخامت ۱۸ و حداقل آن ۱۲ میلی متر است. وتر بالایی به عنوان عضوی در نظر گرفته میشود که در فشار و کشش کار میکند. وتر بالایی ورقی با ابعاد ۳۵X۳۰۰ میلی متر است. نرده ها از فولاد زنگ نزن ساخته شده و روی وتر بالا قرار میگیرد.

عرشه نیز با دو نوع مختلف شاهتیر عرضی ساخته می شود. تیرهای کف های معمولی، تیرهای GFRP ۱۰x۱۰x۱۲۰۰ در فواصل ۱،۱ متری میباشند. ارتباط بین وتر و تیرهای GFRP از طریق پیچ و مهره فولاد ضد زنگ که باعث یک اتصال دوخته می شود، ایجاد می شود. تیرهای فولادی کف با شکل مستطیل در هر ۴،۴ متر برای افزایش پایداری جانبی سیستم طبقه قرار داده شده است.

دو انتهای تیرهای عرضی از فولاد اما باشکلی متفاوت با دیگر سمت پل ساخته شده است. این تیرهای فولادی به وتر پایین در همه طرف های جوش داده شده اند.

پنل های GRFP واقع بین خرپاها از یک تک پنل با ضخامت لمینت ۴ میلی متر تشکیل شده است. تخته GRFP با ضخامت ۴ میلی متر است که به وسیله چسب اپوکسی شفاف به تخته قبل خود متصل شده است. پانل های کف GRFP بیش از تیرهای نصب شده و این اتصال با پیچ و مهره استاندارد ساخته شده است.

سیستم روشنایی داخل خرپاها یک مینیمالیست و راهنمایی برای راهنمایی افراد در امتداد پل عابر پیاده می باشد. دسترسی به پل پیاده رو با ساخت رمپ بتنی در هر دو طرف بزرگراه برای بهبود عملکرد منطقه شهری که مورد نیاز است به انجام می رسد.

ستون انتهایی هم رمپ و هم کنسول برای پل پیاده رو را نگه داری می کنند. پایه های پل دایروی با قطر ۰,۴۵ متر و ارتفاع تقریبی ۶ متر است. پایه مرکزی در ممرکز بزرگراه قرار دارد و به شکل Y می باشد.

الزامات ULS تمام اعضای سازه ای پل پیاده رو، مانند وتر، تیرهای عرضی و خرپای Vierendeel مورد بررسی قرار داده شده است. موضوع اصلی برای تایید همکاری پانل کامپوزیت GRFP و اعضای فلزی است. مشکل اصلی در استفاده از این ترکیب عدم رفتار انعطاف پذیر پنل ها در مقایسه با شکل پذیری فولاد است. اطلاعات در دسترس در این زمینه برای محققان ناکافی است. با توجه به آن، تأیید ULS در خرپاها بدون در نظر گرفتن همکاری GRFP انجام شده است.

همکاری بین خرپا و تخته GRFP برای همه تاییدیه های SLS مانند انحراف و یا لرزش در نظر گرفته شده است. اعضای GRFP در مقایسه با فولاد میرایی بیشتری ایجاد می کنند و این رفتار برای رفتار دینامیکی سازه های سبک بسیار مناسب است.

پژوهش تجربی زیادی در ساخت و ساز پل عابر پیاده دیگر واقع در زوماییا (باسک، اسپانیا)، انجام شد. هدف اصلی از این پژوهش، به منظور بهبود دانش فعل درباره این مواد نوآورانه است. همانطور که قبلاً ذکر شد، عدم قطعیت در رفتار این مواد زمانی که در سازه استفاده می شود، هنوز هم وجود دارد.

آزمون ها بر روی تعیین بارهای نهایی مواد تحت نیروهای فشاری و کششی تمرکز کرده است. علاوه بر این، استفاده از اتصال پیچ و مهره فولادی یا چسب مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱۴ برخی از تست های انجام گرفته برای بررسی ظرفیت اتصالات پیچ را نشان می دهد. مکانیزم شکست به دلیل برشی کردن شکست و یا تحمل شکست، به بار و فاصله پیچ از لبه پنل بستگی دارد. کتابچه راهنمای طراحی ارائه شده توسط منبع GRFP ابزار عالی برای طراحی اتصالات و پیش بینی بارهای شکست با فرمول ساده شده که تطابق خوبی با بارهای شکست به دست آمده در آزمون تجربی دارد، است. پنل های در معرض بارهای محوری یک رفتار الاستیک دارند و در اثر کمانش، ناپایدار می شود که می توان آن را توسط بار بحرانی اوپلر (شکل ۱۵) پیش بینی کرد.



Fig. 14 Experimental research on GFRP. Bolted connections. Fig. 15. Axial load test on GFRP pannels

شکل ۱۴. پژوهش آزمایشگاهی بر GFRP. اتصالات پیچی شکل ۱۵. آزمایش نیروی محوری بر پنل های GFRP