

## مطالعه فنی و تحلیلی طراحی و اجرای پل بعثت

سجاد صادقی دزکی<sup>۱</sup>؛ علی اکبر پوری رحیم<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۰

**چکیده:** رزمندگان اسلام در عملیاتی در سال ۱۳۶۴ شمسی موفق به تصرف شهر ساحلی فاو و قطع ارتباط رژیم بعث عراق با آبهای خلیج فارس شدند. مهمترین مسئله پس از فتح فاو، پشتیبانی پایدار و مؤثر برای حفظ مواضع در ناحیه جنوبی عراق بود. از نظر نظامی، پشتیبانی نیروها از طریق رودخانه اروند انجام می‌شد. برای این منظور، پل بعثت که حدود یک کیلومتر طول و ۱۲ متر عرض دارد و یکی از شاهکارهای مهندسی دفاعی کشور است، روی این رودخانه احداث شد. با توجه به اهمیت طراحی و اجرای این سازه در دوران دفاع مقدس، بررسی تحلیلی و طراحی دوباره این پل، گامی مؤثر در شناخت ابعاد فنی پل بعثت و به‌کارگیری آن در آینده است. افزون بر این، باعث شناخت بهتر برای کاربرد در آینده می‌شود. در این مقاله، طراحی پل بعثت از دیدگاه فنی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، سازه پل براساس آیین‌نامه‌های بارگذاری و طراحی با استفاده از الگوسازی هندسه پل در نرم‌افزارهای اجزای محدود سب و آباکوس مطالعه شده است. نتایج تحلیل نشان می‌دهد، این پل براساس آیین‌نامه‌ها و استانداردهای کنونی، تنها با تغییر جزئیاتی در اتصالات اجزای آن پاسخگوی بارهای وارد شده است و رفتار سازه‌ای مطلوبی دارد.

**واژگان اصلی:** پل بعثت، تحلیل عددی پل بعثت، سب، آباکوس، مهندسی دفاع مقدس.

## مقدمه

اقدامات مهندسی، باعث شکل‌گیری کالبد ساختمانها، تأسیسات و زیرساختهای کشور می‌شود و متناسب با کیفیت آن، تأثیرات مطلوب یا نامطلوب بر عرصه‌های مختلف جامعه می‌گذارد؛ بنابراین، مهندسی در تأمین ایمنی و پایداری کشور در برابر تهدیدهای ناشی از جنگ نقشی راهبردی دارد.

یکی از دلایل موفقیت ایران در دوران دفاع مقدس وجود مهندسان متعهد و متدین در جنگ بود. حضرت آیت‌الله خامنه‌ای مدظله‌العالی در دیدار اعضای ستاد بزرگداشت روز ملی مهندس با اشاره به دامنه گسترده اقدامات مهندسی و نقش مؤثر مجموعه‌های مهندسی می‌فرماید: «مهندسان ما در دفاع مقدس سربازان فداکاری بودند که تمام نیرو، هنر و نبوغ خود را به کار گرفتند و روزانه نگاه نوینی از این جوانهای با استعداد بروز می‌یافت» (امام خامنه‌ای ۱۳۹۳، بیانات در روز ملی مهندس).

یکی از مهمترین و بزرگترین خدماتی که جهادگران مهندس در دفاع مقدس به کشور عزیزمان عرضه کردند، احداث پل عظیم بعثت بود. براساس اظهارات شاهدان و متخصصان، طراحی و اجرای پل بعثت یکی از شگفتی‌های دوران دفاع مقدس است. تاکنون پژوهشهای توصیفی بسیاری درباره احداث این پل انجام شده است که از شاخصترین آنها می‌توان به کتاب خاطراتی از هشت سال دفاع مقدس (بنی‌هاشمی، ۱۳۸۹) اشاره کرد که در آن، اجرای پل بعثت و نقش آن در مهندسی دفاعی ارزیابی شده است؛ اما در تمامی این پژوهشها، پل بعثت از دید فنی و تحلیلی ارزیابی نشده است.

- انطباق طراحی پل بعثت با آیین‌نامه‌های بارگذاری و طراحی مهندسی پل

- کفایت هندسه و مقطع گوشواره اتصال میان لوله‌ها در پل بعثت در برابر تلاشهای وارد

بر آن

- اجرای پل موقت نظامی مانند پل بعثت در دفاع آینده

پاسخ به این پرسش‌ها، ضمن کشف عظمت طرح پل بعثت، باعث شناخت بهتر مزایای استفاده در آینده و یا موارد مشابه می‌شود. باتوجه به این موارد در این مقاله اجرای پل بعثت از دیدگاه فنی و به‌صورت کیفی مطالعه شده است. در مرحله بعدی به کمک نرم‌افزار اجرای

محدود مهندسی سپ<sup>۱</sup>، هندسه پل تحت اثر بارهای وارد بر آن (ثقلی، جریان آب، موج و لرزه‌ای) شبیه‌سازی و تحلیل می‌شود. سپس با کمک آیین‌نامه‌های بارگذاری، تحلیل و طراحی موجود مورد ارزیابی قرار گرفته و در مرحله آخر تحلیل پل و محاسبه نیروهای داخلی یکی از اتصالهای لوله‌ای پل در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس<sup>۲</sup> ارزیابی شده است.

## چارچوب نظری

### مهندسی دفاعی

اهمیت مهندسی از دید دفاعی در دو حوزه کلان، قابل طبقه‌بندی است: نخست، حجم گسترده و تأثیر غیرمستقیمی بر دفاع دارد و می‌تواند باعث کاهش آسیب‌پذیری و ایمنی ساختمانها، تأسیسات و زیرساختهای کشور در برابر حوادث طبیعی و غیرطبیعی شود.

دوم، نیازهای مهندسی بخش دفاع است که باعث تقویت آمادگی دفاعی کشور در برابر تهاجمات نظامی دشمن می‌شود (جلایی‌فراهانی، ۱۳۹۵: ۵۶).

مهندسی دفاعی یعنی در کمترین زمان و با حداقل تجهیزات به بهترین بهره‌وری از منابع و عالیترین راهکار مهندسی دست یافت (شمسایی، ۱۳۹۰: ۱۰۱). هم‌چنین، می‌توان فعالیتها و اقدامات مهندسی بخش دفاع را به دو بخش «مهندسی پدافند» و «مهندسی آفند» تقسیم کرد. مهندسی پدافند، نقش تأمین شرایط لازم و پشتیبانی‌های لازم را در موقعیت‌های دفاعی جبهه‌های نبرد از طریق ایجاد دسترس‌های مناسب و ساخت استحکامات لازم برعهده دارد.

از دیدگاهی دیگر، مهندسی جنگ به سه بخش قابل تقسیم است:

- نخست، پیش از عملیات یا مهندسی آماده‌سازی است. این بخش، شامل احداث و ترمیم جاده‌های پشتیبانی، ساخت مواضع و سکوها، آتش، احداث استحکامات، ساخت بیمارستانهای صحرائی، قرارگاه‌های عملیاتی، زاغه‌های مهمات و پیش‌بینی آینده عملیات است.

- دوم، اقدام هنگام عملیات یا مهندسی رزمی است. این بخش را اقداماتی همانند احداث معابر در میدانهای مین، ایجاد موانع در حرکت نیروها، جاده‌های موقت پشت خطوط مقدم

1. SAP 2000
2. Abaqus

جبهه و احداث استحکامات در خط تشکیل می‌دهد.

- سوم، اقدامات بعد از عملیات یا مهندسی پشتیبانی رزمی است که اقداماتی همانند تحکیم مواضع دفاعی، جاده‌ها، استحکامات و یا ایجاد موانع جدید به‌شمار می‌آید.

مباحث مهندسی دفاعی از نظر رهبری مدظله‌العالی از اهمیت بسیاری برخوردار است به‌گونه‌ای که ایشان در بازدید از صنایع وابسته به نیروهای مسلح اشاره می‌کنند، دانشمندان و نیروهای برخوردار از قدرت علمی در بخش دفاعی کشور باید خلاقیت به خرج دهند (امام خامنه‌ای، ۱۳۷۳، بیانات در بازدید از صنایع وابسته به نیروهای مسلح). هم‌چنین ایشان در سخنرانی می‌فرمایند: «بنده یک کلمه عرض کنم در شرایط فعلی تهدیدات و آنچه ممکن است برای شما پیش بیاید، یکی از مهمترین مسائل ارتباطات است» (امام خامنه‌ای، ۱۳۸۶).

ویژگیهای مهندسی در دفاع مقدس عبارت است از:

- خلاقیت، اولین ویژگی مهندسی در دفاع مقدس است. احداث پل شناور خیبر در هورالعظیم، احداث پل بعثت در اروندرود در عملیات والفجر ۸ و ده‌ها ابتکار بزرگ دیگر، نمونه‌هایی از تفکر مهندسی در دفاع مقدس بود.

- پویایی و انعطاف‌پذیری سریع، دومین ویژگی مهندسی در دفاع مقدس بود. اجرای سه مأموریت آماده‌سازی، مهندسی رزمی، مهندسی پشتیبانی رزمی هم‌زمان در عملیاتها و کسب توان انعطاف‌پذیری متناسب با فضای نبرد در مناطق مختلف عملیاتی که به برتری رزمندگان اسلام منجر می‌شد.

- فرماندهی واحدهای مهندسی در صحنه از دیگر ویژگیهای مهندسی در دفاع مقدس بود به‌صورتی که سخت‌ترین اقدامات مهندسی در دشوارترین صحنه‌های نبرد با اقدامات معجزه‌گونه در مهندسی جنگ همراه بود.

- ویژگیهای مهم دیگر در مهندسی جنگ، مردمی‌بودن آن بود. سازماندهی بسیجیان در واحدهای مهندسی و حضور جهادگران در عملیات مهندسی آفندی و پدافندی یکی از مزایای منحصربه‌فرد مهندسی جنگ در دوران دفاع مقدس است (قاسمی، ۱۳۹۰: ۵۴).

### پلهای موقت نظامی

یکی از وظایف مهم مهندسی جنگ، ساخت پلهای نظامی برای پشتیبانی پیش و در زمان عملیات است. پلهای موقت نظامی شناور در دنیا از اهمیت بسیاری برخوردار هستند. نخستین

پلهای موقت در تاریخ به دولت رُم تعلق دارد که در سال ۵۳۶ پیش از میلاد توسط کیریس<sup>۱</sup> ساخته شد. پس از آن، ارتش خشایارشا در زمان جنگ با یونان برای عبور از تنگه داردانل ترکیه پلی ساختند. مهندسان این دوره، لنگر انتهایی پل را توسط دو کشتی بزرگ و نیروهای میانی پل را توسط کشتی‌های کوچکتر طراحی کردند. در ساخت این پل، تعدادی شناور و یا کرجی متصل به یکدیگر قرار می‌گرفتند و قسمت رویه آنها، مسیر جاده را تشکیل می‌داد. با پیشرفت فناوری، کرجی از لاستیک و بوم پنبه ساخته شد. در سال ۱۹۴۱ میلادی، امریکا از شناور لاستیکی استفاده کرد که جاده آن به صورت رشته‌های فولادی بود (جلالی فراهانی، ۱۳۹۵: ۹۸).

پلهای موقت نظامی باتوجه به استفاده و نصب آنها به دو نوع هجومی و پشتیبانی تقسیم می‌شود. امروزه با پیشرفت فناوری، انواع جدیدی از پلهای نظامی طراحی و ساخته شده است که می‌توان به پل هجومی AVLB MK8 انگلستان، پل هجومی MTU20 کانتیلور روسیه، پل پشتیبانی آبی GSP، پل پشتیبانی آبی PMP، پل پشتیبانی قیچی سوار بر کامیون TMM، پل پشتیبانی خشکی SAS، انواع پلهای پشتیبانی معلق، پل تراده‌ای، پل نظامی TATRA T-813، پل نظامی SR 520 و پل موبایل بریج نسخه چهار اشاره کرد (Pinnacleadmin, 2016).

### پل سازی در دفاع مقدس

پل‌سازی از مهمترین اقدامات مهندسی ستاد پشتیبانی و مهندسی جهاد سازندگی در دوران دفاع مقدس بود. از شاخصترین پلهایی که توسط رزمندگان دفاع مقدس ساخته شده است، می‌توان به پلهای بعثت، خضر و خیبر اشاره کرد.

#### پل خیبر

نیروهای پشتیبانی و مهندسی جنگ در بهمن ۱۳۶۲ شمسی، پل شناور ۱۴ کیلومتری با نام خیبر روی هورالعظیم ساختند که راه مهم عقبه جبهه با خط مقدم جزایر مجنون بود. برای ساخت این پل تمامی تجربه‌های فنی مهندسان جهاد سازندگی به کار گرفته شد. عمده مشکلات طرحهای قبلی، هزینه زیاد ساخت، آسیب‌پذیری فراوان پل در مقابل ترکش، سختی مونتاژ و حمل پل بود که همگی در طراحی جدید برای پل خیبر برطرف شد. پل خیبر، روی آب شناور بود و پایه نداشت. این پل از اتصال ۲۵۰۰ قطعه شناور تشکیل شده بود. هر قطعه

برای توان شناوری بهتر و امکان تحمل وزن بیشتر، چهار باله شناور در دو طرف داشت. شاسی هر قطعه از پل، شامل چهار تیر آهن ۱۴ بود که روی آنها یک ورق ۴ میلیمتری قرار گرفته، و چهار باله اطراف آن با لولا و پین به این شاسی وصل بود. در زیر شاسی، باله‌ها به بلوکهای پلی استایرنی متصل شده بود که باعث شناور شدن پل روی آب می‌شد. توان شناوری هر قطعه، ۶ تن بود.

باتوجه به تجربه پلهای بشکه‌ای شهید «هزاردستان»، طرحها و نمونه‌های اولیه‌ای برای استفاده در آنها با حداکثر سرعت دو متر بر ثانیه تهیه شد که مشخصات ویژه‌ای داشت. ابتکار تلفیق فوم و فایبرگلاس در پل خیبر، مزیت مهمی برای این پل بود؛ زیرا پس از اصابت ترکش به پل غرق نمی‌شد و شناور ضدترکش به‌شمار می‌آمد. قطعات نمونه پل در یکی از کارگاه‌های کمیته فنی دفتر مرکزی جهاد سازندگی ساخته شد.

قطعات ساخته‌شده برای آزمایش به دریاچه ورزشگاه آزادی تهران منتقل شد و در حضور فرمانده وقت نیروی زمینی ارتش و معاون صنایع خودکفایی سپاه، آزمایش شد. پس از موفقیت‌آمیز بودن آزمایش، فرماندهی سپاه، سفارش ساخت ۳۰ کیلومتر از این پل را به جهاد سازندگی داد و ۷۵ روز برای ساخت آن تعیین شد.



تصویر ۱. پل خیبر در میان نزارهای هورالهویزه به همراه پارکینگ اضطراری

## پل خضر

پس از عملیات والفجر ۸، نیروهای مستقر در منطقه فاو نیازمند پشتیبانی و تدارکات بودند. در اثر بمبارانهای مکرر شیمیایی، آب سالم در فاو پیدا نمی‌شد و به جبهه سختی تبدیل شده بود. پشت خط مقدم، رودخانه خروشان اروند قرار داشت و پشتیبانی تدارکات سنگین با قایق، بسیار سخت و کند بود. مهندسان پشتیبانی و مهندسی جنگ جهاد، چند پل روی اروند پیش‌بینی و نصب کردند؛ اما هواپیماهای رژیم بعث عراق و شدت جریان آب باعث تخریب این پلها می‌شد. نیاز به تدارکات سنگین، باعث فشار به فرماندهان می‌شد. در چنین حالت سختی، راهی برای برقراری ارتباط نمی‌ماند. در نهایت، مهندسان جهاد برای حل این مشکل، پل خضر را طراحی و اجرا کردند. این پل از یک صفحه بزرگ شناور در حدود ۹۰ تن تشکیل می‌شد. در دو سوی پل، سیم بکسل‌هایی به موازات یکدیگر در امتداد عرض رودخانه کشیده و به شمع‌های از پیش نصب شده در ساحل، محکم شده بود. سیم بکسل دیگری هم به چرخ تراکتوری می‌پیچیدند. در نهایت با استفاده از پل خضر، امکان انتقال ماشین‌آلات و تدارکات سنگین فراهم شد.



تصویر ۲. پل شناور و متحرک خضر در حال عبور از رودخانه عظیم اروند

پیش از بهره‌برداری خضر، پلهای دوبه‌ای و خیبری روی رودخانه نصب شد؛ اما سرعت حرکت آب، آنها را نابود کرد. به همین دلیل، طرحی برای پوشش پلی شناور استفاده شد.

براساس این طرح، پمپهایی درون بدنه پل کار گذاشته شد تا در زمان نیاز به زیر آب می‌رفت و از دید دشمن مخفی می‌ماند؛ اما سرانجام غواصان دشمن، آن پل را شناسایی و منهدم کردند. هزینه کم و سرعت زیاد نصب پل خضر از مزیت‌های آن به‌شمار می‌آید. هواپیماهای رژیم بعث عراق هرگز نتوانستند این پل را شناسایی و نابود کنند. در مجموع، پل خضر در عملیات والفجر ۸ روی رودخانه اروند ساخته شد. با استفاده از خضر، امکان انتقال کامیون‌های مهمات و ماشین‌آلات سنگین همانند لودر و بولدوزر به فاو فراهم شد.

#### پل شهید سلیمی

پل شناور شهید سلیمی برای عبور ماشین‌آلات سنگین طراحی و تولید شد. این پل در منطقه اروند در کنار فاو نصب شد. نصب این پل یکی از مهمترین فعالیت‌های دوران دفاع مقدس بود که نقش اساسی در عبور لجستیک سنگین برای پایداری جبهه فاو داشته است (مرادی، ۱۳۹۲: ۵۴).

#### پل نوح نبی علیه السلام

این پل شامل دو بخش عرشه فلزی و بدنه شناور است. بدنه شناور می‌تواند از حجم شکل داده شده با فوم یا قایق تولید شود. ظرفیت این پل ۱۲ تن بود و در نقاط مختلف عملیاتی مورد استفاده قرار گرفت (مرادی، ۱۳۹۲: ۶۵).

#### پل کوثر

پل شناوری که بسیار سبک و قابل حمل طراحی شده بود و به‌صورت چند منظوره برای عبور از رودها و باتلاق‌ها استفاده می‌شد. این پل از قطعات مدولار طراحی شده و توان گسترش در طول و عرض را دارا بود (مرادی، ۱۳۹۲: ۶۷).

#### پلهای پی. ام. پی

پلهای پی. ام. پی، پلهایی سریع و هجومی است و کاربردهای گوناگونی دارد. در زمان جنگ پلهای دیگری استفاده می‌شد؛ اما این پلها به‌دلیل ویژگیهای برجسته اهمیت بسیاری داشت. این پلها از ویژگی تردد دو طرفه برخوردار بود و محدودیتی از این حیث نداشت. البته این‌گونه پل، نقاط ضعف کوچکی داشت که باربری آنها تا حدود زیادی کاهش می‌یافت.

در عملیات فتح‌المبین در محلی به نام سیدخلف، پلهایی به نام پل ام ۴ نصب شد؛ اما این پلها امکان عبور تجهیزات سنگین همانند تانک و نفربر را نداشت؛ به‌همین دلیل، پلهای پی. ام. پی این امکان را داشت و در زمان کوتاهی قابل نصب بود. در صورت نصب صحیح این



پلها، می‌توان باری در حدود ۶۰ تن را عبور داد. در عملیات بیت‌المقدس عبور از رودخانه کارون تنها با نصب پلهای پی. ام. پی ممکن بود (امیری، ۱۳۹۵: ۵۸).

### پلهای بشکه‌ای

شاید بتوان ریشه پیشرفت ایران در سدسازی و پل‌سازی را تلاش جهادگران در جبهه‌های غرب و جنوب دانست که نمونه آن، پل بشکه‌ای در عملیات ثامن‌الائمه علیه‌السلام است. برای ساخت این پل، بشکه‌های ۲۲۰ لیتری خالی را جمع‌آوری کردند و با اتصال آنها به یکدیگر، انتقال نیروها و امکانات در عملیات شکست حصر آبادان انجام شد.

برخی دیگر از فعالیتهای برجسته مهندسی در زمان دفاع مقدس احداث ۱۲ پل تجهیزاتی در عملیتهای مختلف<sup>۱</sup>، ایجاد معبر و شکاف در موانع و استحکامات دشمن در عملیتهای گوناگون است.

### پل بعثت

در بهمن ۱۳۶۴ شمسی، پس از عملیات والفجر ۸ و فتح فاو، مسیر ارتباطی میان دو طرف اروند و شهر فاو ایجاد شد. به همین دلیل، باید پلی ساخته می‌شد تا تجهیزات و تدارکات را به آن سوی اروند منتقل کند. تا پیش از احداث پل، تردد توسط پلهای شناور موقت انجام می‌شد. هدف از ساخت پل، تردد سریع و امن به آن سوی رودخانه و شهر فاو بود. به همین دلیل، احداث پل روی رودخانه اروند در دستور کار فرماندهان جنگ قرار گرفت. از نظر مهندسی احداث پل روی رودخانه‌ای با شرایط و مشخصات اروند به ماه‌ها وقت و مصالح نیاز دارد؛ اما پل مورد نظر فرماندهان جنگ باید در کمترین زمان در استتار و پوشش کامل ساخته می‌شد.

پل بعثت به طول ۹۰۰ متر و عرض ۱۲ متر روی رودخانه اروند احداث شد. این پل از پنج هزار لوله به طول ۱۲ متر، قطر ۱/۴۲ متر و ضخامت ۱۶ میلیمتر از نوع فولاد ST 60 تشکیل شده است. لوله‌ها در هر ردیف به یکدیگر متصل شد. هر ردیف روی ردیف قبلی قرار می‌گرفت و مشابه شبکه لانه زنبوری می‌شد. پس از تراز کردن سطح فوقانی با قراردادن لوله‌ها، روی آخرین ردیف آسفالت ریخته می‌شد. رزمندگان دو طرف لوله‌ها را بسته بودند که لوله‌ها

۱. پلهایی همانند بیلی‌رمیم، ماکلیه، ابوچلا، هفت‌دهنه، شوشتر، سوسنگرد، یا زهرا سلام‌الله‌علیها، شهید فیروزی، شیلر، کردستان، حاج مسلم و یا زینب سلام‌الله‌علیها است.

در آب غرق نشود. پس از اینکه کار اتصال لوله‌ها انجام می‌شد در لوله‌ها را باز می‌کردند تا آب با فشار از لوله‌ها عبور کند و لوله‌ها به زیر آب برود و غرق شود. بعد روی لوله‌ها را زیرسازی و آسفالت می‌کردند. طراح این اثر، مهندس بهروز پورشریفی از برادران جهاد سازندگی بود (بنی‌هاشمی، ۱۳۸۹: ۲۰).

مراحل اجرای پل بعثت به این شرح بود:

- برای اتصال لوله‌ها به یکدیگر، ردیف اول روی بستر رودخانه و سپس لوله‌های ردیف‌های بعدی روی لوله‌های پایین‌تر قرار گرفت.

- گوشواره‌ها به صورت نرمادگی در دوسو جوشکاری شد. اتصال لوله‌ای به لوله دیگر از طریق قرارگیری نرینه یک لوله در مادگی لوله دیگر است.

- برای بستن سر لوله‌ها و آب‌اندازی آنها از سکوه‌های مناسب استفاده شد.

- برای انتقال لوله‌های شناور از محل آب‌اندازی تا محل نصب از روتورگ استفاده شد.

- برای آب‌اندازی لوله‌ها از روی سکو به داخل آب از جرثقیل استفاده شد.

- بعد از اتصال چند لوله شناور به تعداد متناسب با شدت آب و وضعیت رودخانه، در

تعدادی از لوله‌های شناور باز شد تا غرق شود و در محل پیش‌بینی شده قرار گیرد.

- میزان انحراف محور لوله‌ها از محور پل به وسیله دوربین کنترل می‌شد تا میزان انحراف

جبران شود.

- نقطه شروع هر ردیف از محلی خواهد بود که ردیف قبلی نسبت به نقطه شروع

اختلاف ارتفاعی برابر قطر لوله پیدا کرده باشد.

- پس از پایان نصب لوله‌ها از طریق شناور، نصب ردیف‌های بعدی و رگلاژ بالای لوله‌ها

انجام شد. در نهایت از ساحل اجرای آسفالت در دستور کار قرار گرفت.



تصویر ۳. انتقال لوله‌ها به اروند با استفاده از شناور روتورگ (بنی‌هاشمی، ۱۳۸۹)  
(برگرفته از پایگاه اینترنتی خبرگزاری دفاع مقدس)



تصویر ۴. مراحل پایانی ساخت پل بعثت (بنی‌هاشمی، ۱۳۸۹)  
(برگرفته از پایگاه اینترنتی خبرگزاری دفاع مقدس)

تا زمان پایان طرح ساخت پل بعثت، این پل بارها توسط هواپیماهای رژیم بعث عراق بمباران شد. نقاط آسیب‌دیده بسرعت تعمیر و تعویض می‌شد. قدرت بمبهای پرتابی توسط هواپیماها به قدری بود که دپوی خاک اطراف پل را، که شامل ده‌ها و صدها سرویس خاک و مصالح شنی بود در اطراف پراکنده و صاف می‌کرد. همچنین، قدرت رگبار تیربار هواپیما لوله

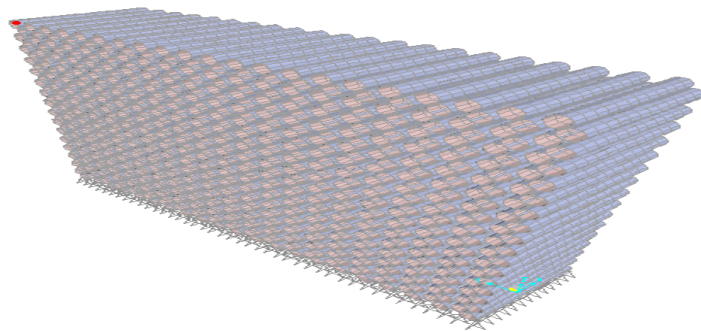
فولادی ۱۶ میلیمتری را سوراخ می‌کرد. این پل در پاییز ۱۳۶۵ شمسی به پایان رسید. در اوایل سال ۱۳۶۷ شمسی، فاو توسط رژیم بعث عراقی پس گرفته، و سرانجام، این پل تخریب شد تا از پیشروی نیروهای نظامی رژیم بعث عراق جلوگیری شود. در ۲۷ تیر ۱۳۶۷ شمسی، قطعنامه ۵۹۸ توسط ایران پذیرفته و آتش‌بس اعلام شد (بنی‌هاشمی، ۱۳۸۹: ۷۶).



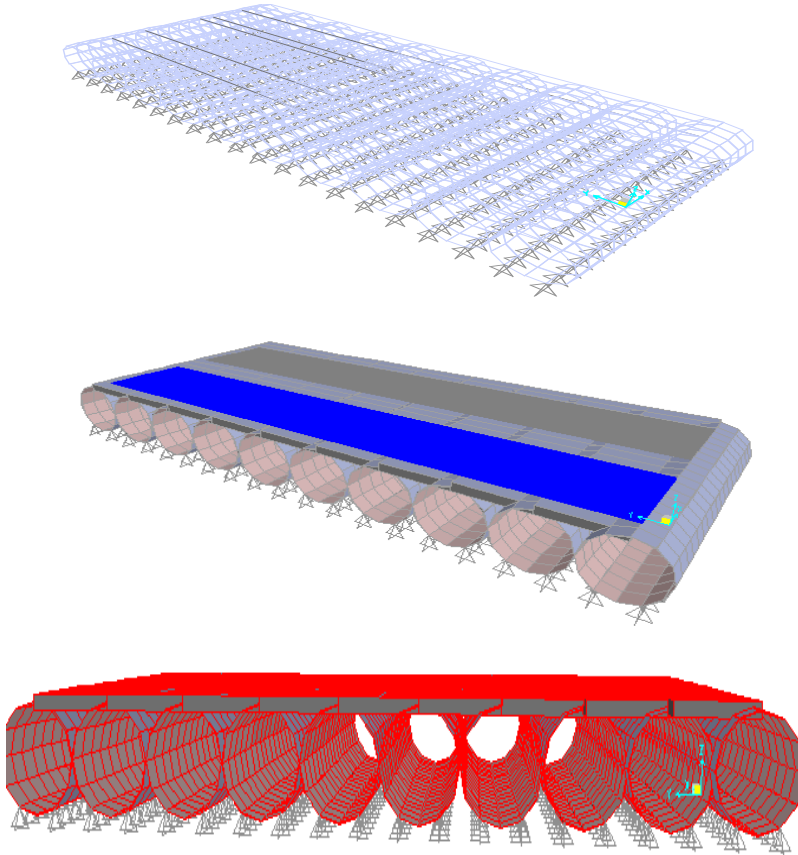
تصویر ۵. بهره‌برداری از پل بعث (بنی‌هاشمی، ۱۳۸۹)  
(برگرفته از پایگاه اینترنتی خبرگزاری دفاع مقدس)

### شبیه‌سازی و تحلیل کلی پل بعث

باتوجه به بزرگی و هندسه پل، الگوسازی اولیه با ۱۷ لوله و طول ۱۶ متر ساخته شد. در تصویر شماره ۶، الگوی اولیه قسمتی از پل بعث در نرم‌افزار سپ ۲۰۰۰ ارائه شد. به دلیل تقارن لوله‌ها در پل بعث و حجم محاسباتی، یک لایه ۱۰ عددی لوله‌ها در پایین‌ترین کد ارتفاعی در الگوسازی نرم‌افزار انجام شد. نتایج محاسباتی در این حالت با الگوسازی اولیه سازگار است.



تصویر ۶. الگوسازی اولیه پل بعث در نرم‌افزار سپ



تصویر ۷. هندسه الگو شده پل بعثت در نرم افزار سپ

### بارگذاری

باتوجه به هندسه پل و محل قرارگیری آن، بارهای وارد شده بر پل بعثت به شرح ذیل است:

- بارهای مرده اول و دوم: باری که ناشی از وزن قطعات سازه‌ای و بار بر عرشه است. برای تأثیر وزن لوله‌های بالایی، سربار مرده بالای لوله‌ها و همچنین بستر راه، ورقی به ضخامت ۴۰ سانتیمتر روی کل لوله‌ها قرار گرفته است. بار مرده مرحله دوم، شامل وزن آسفالت بود و در نرم‌افزار در محل متناظر اعمال می‌شود.

- بار زنده: برای ساختمانهای فنی راه از سه بار فرضی به‌عنوان بار زنده استفاده می‌شود. باتوجه به اینکه عمق رودخانه ۱۳ متر است، بار ناشی از آب در این تراز فشار ۱۳۰۰۰ کیلوگرم

بر مترمربع است. برای تأثیر بار تردد کامیون و تانک، دو خط عبوری اعمال شد. بارگذاری با فرض تردد همزمان یک کامیون به وزن ۴۰۰ کیلوگرم با ضریب افزایش بار ۱/۳ در الگوی نرم‌افزاری دیده شده است.

- بار ترمز: مقدار نیروی ناشی از ترمز وسایل نقلیه روی پل که نیرویی افقی در خطوط عبور است و با رابطه شماره ۱ برای هر دهانه محاسبه می‌شود. در این مقاله این بار با علامت اختصاری BR معرفی می‌شود.  
رابطه شماره ۱:

$$F_{BR} = 20 + 0.7L < 40 \text{ ton}$$

$$F_{BR} = 20 + 0.7 \times 44 = 50.8 > 40 \text{ ton} \rightarrow F_{BR} = 40 \text{ ton}$$

$$F_{BR} = 20 + 0.7 \times 20.6 = 14.4 < 40 \text{ ton} \rightarrow F_{BR} = 14.4 \text{ ton}$$

- بار زلزله: نیروی زلزله در برابر این پدیده برای خاک تپ ۴ و شتاب، ریف شده است. ضریب اهمیت پل ۱/۲ و ضریب رفتار سازه ۳ است.

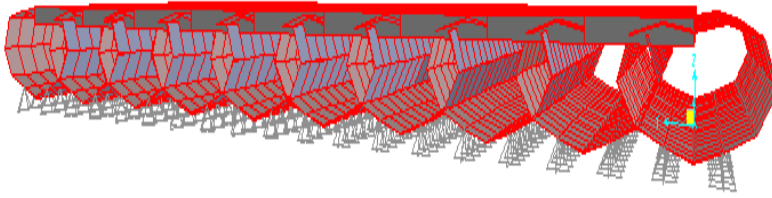
- بار تغییرات حرارتی: این نیرو ناشی از تغییرات دمای یکنواخت در تمامی اجزای پل است.

- برای محاسبه ضریب اثر همزمانی بارها در مورد پلهای عریض، باید یک ضریب کاهش اعمال شود. در این پل ضریب اثر همزمانی بارها، برابر ۱ است.

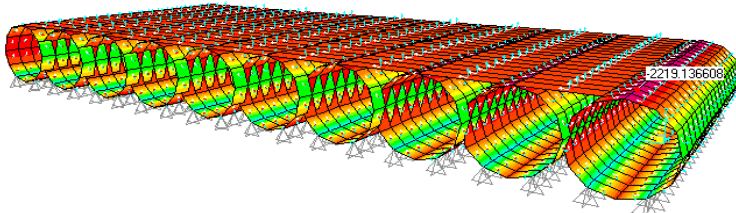
بارگذاریهای غالب در این پل، ترکیبی از بارهای اول (بارهای مرده و فشار هیدرواستاتیک آب)، دوم (ترکیب بار ۱ + بارهای بهره برداری (عبور تانک) همراه با اثر ضربه) و سوم (ترکیب بار ۱ + بار زلزله) است که برای ارزیابی تحلیل خطی پل استفاده شد.

#### تحلیل در نرم‌افزار سپ

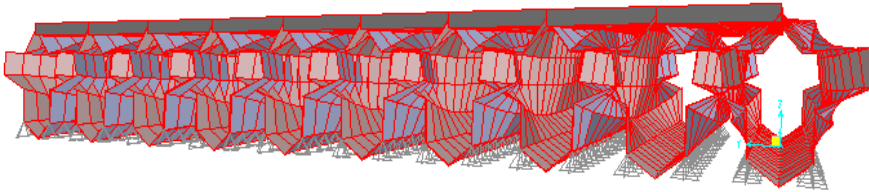
تحلیل و طراحی برای حالت پوش نیروهای متحرک انجام، و تنش‌های ایجاد شده در پل با حالت بحرانی مقایسه و کنترل شد. در تصاویر شماره ۱۳ - ۸، تغییر حالت و کانتور تنش برای هندسه پل تحت تأثیر بارهای متفاوت و آب ارائه شده است.



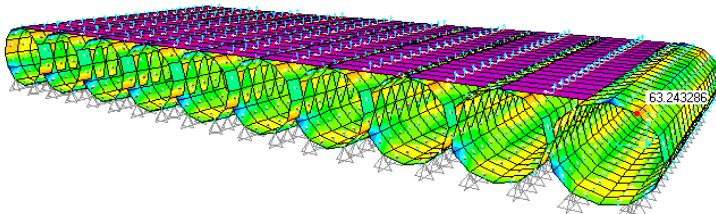
تصویر ۸. تغییر شکل پل تحت تأثیر بارهای ثقلی



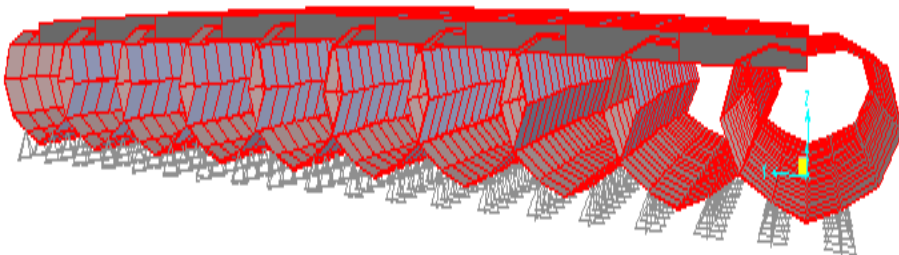
تصویر ۹. کانتور بیشینه تنش لوله‌های پل تحت تأثیر بار ثقلی (بیشینه تنش ۲۲۱۹ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع)



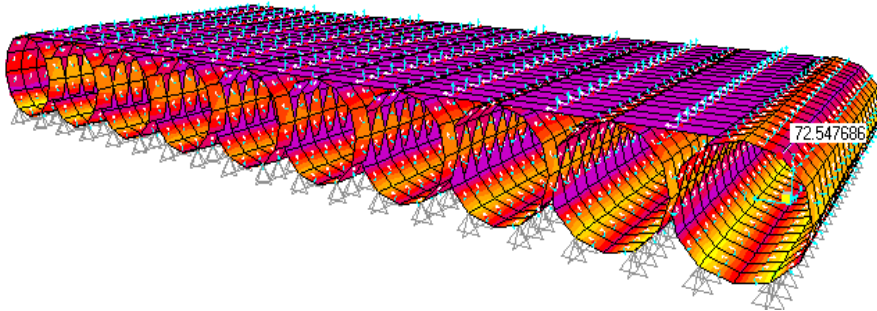
تصویر ۱۰. تغییر شکل پل تحت تأثیر بار آب



تصویر ۱۱. کانتور بیشینه تنش لوله‌های پل تحت بار آب (بیشینه تنش ۶۳ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع)



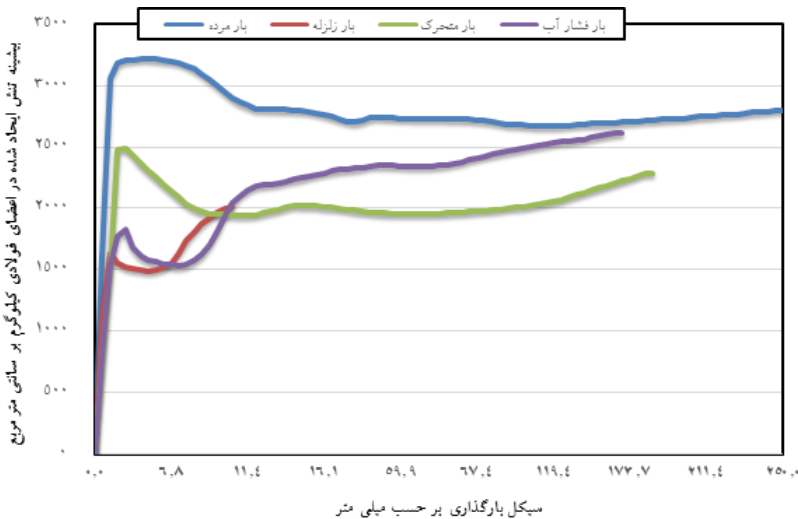
تصویر ۱۲. تغییر شکل پل تحت تأثیر بار متحرک عبور تانک



تصویر ۱۳. کانتور تنش پل تحت تأثیر بار متحرک عبور تانک (بیشینه تنش ۷۲ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع)

براساس نتایج محاسباتی در نرم افزار سپ ۲۰۰۰، تمام تنشهای وارد شده در حالت‌های مختلف بارگذاری کمتر از حد مجاز آیین‌نامه است. بیشترین تنش وارد شده بر لوله‌های تحتانی تحت تأثیر ترکیب بارهای شماره ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۲۲۸۲، ۲۴۲۶ و ۲۷۹۶ است که این مقادیر از تنش تسلیم لوله‌های ST60 با ضخامت ۱۶ میلیمتر کمتر است؛ بنابراین، تنش لوله‌های تحتانی که بحرانی‌ترین وضعیت را دارد، در محدوده خطی باقی می‌ماند.

در تصویر شماره ۱۴، تغییر شکل ایجاد شده در اثر پوش بارهای وارد شده ارائه شده است. براساس این تصویر، سازه پل بعثت در مقابل بارهای قائم و متحرک مقاومت خوبی دارد و تمامی تنشهای ایجاد شده از تنش گسیختگی فولاد ST60 کمتر است. این نشان از عملکرد خوب این پل در مقابل بارهای ثقلی دارد.



تصویر ۱۴. بیشینه تنش ایجاد شده در لوله‌های پل بعثت

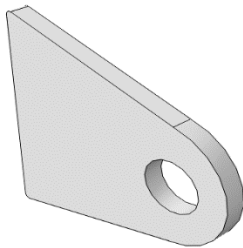


## شبیه‌سازی و تحلیل موضعی پل بعثت

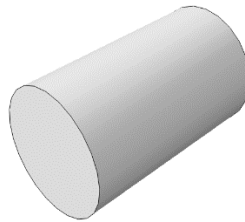
اتصال میان لوله‌ها با گوشواره‌های فلزی ایجاد شده است؛ بنابراین، این عنصر الگوسازی، تحلیل و بررسی می‌شود.

شبیه‌سازی هندسه گوشواره در نرم‌افزار اجزای محدود

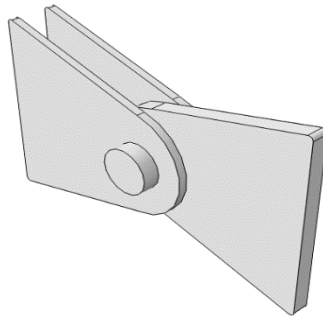
در تصویر شماره ۱۵، اجزای گوشواره‌های کناری، میانی و بین میانی ارائه شده است. دو گوشواره کناری (ضخامت یک سانتیمتری) به لوله‌ای متصل شده و یک عدد گوشواره (ضخامت ۲ سانتیمتری) به لوله‌ای دیگر متصل شده و این اعضا به کمک پینی به یکدیگر متصل است.



ب) گوشواره با ضخامتهای ۱ و ۲ سانتیمتر



الف) پین



ج) الگوی متصل گوشواره

تصویر ۱۵. نمونه‌ای از الگوهای ساخته شده در نرم‌افزار مطابق با الگوی واقعی

## مشخصات مصالح

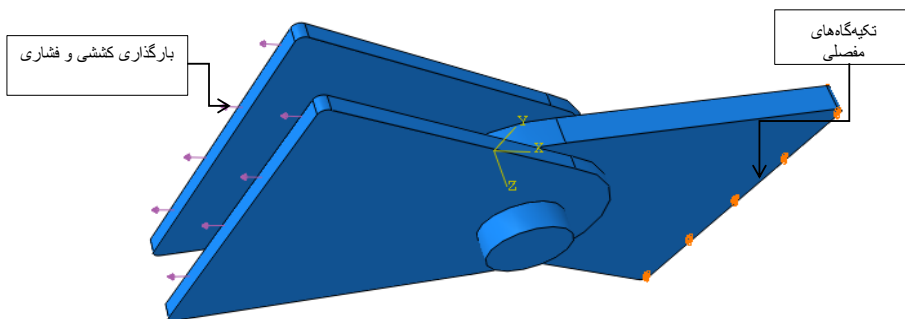
برای الگوسازی ویژگیهای مصالح از نتایج آزمایش کشش تک محوره استفاده شده است. الگوی انتخابی برای رفتار مصالح الگوی سخت شونده پویای غیرخطی<sup>۱</sup> با معیار گسیختگی فون میسنز<sup>۲</sup> است. ویژگی مصالح در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. ابعاد و ویژگی مکانیکی مصالح

افزایش طول (درصد)	تنش نهایی (MPa)	تنش جاری شدگی (MPa)	مدول ارتجاعی (GPa)	اعضا
۰/۱۲	۶۰۰	۳۳۵	۳۴۰	ورق اتصال و پین

## بارگذاری و شرایط مرزی

تحلیل این پژوهش به شیوه شبه استاتیکی است. با توجه به ترکیب بارها و تحلیل نیرویی هندسه کلی پل در نرم افزار سپ ۲۰۰۰، بیشینه نیرو در اتصال گوشواره ناشی از ترکیب بار شماره ۲ برابر با ۱۴۰۰ کیلونیوتن محاسبه شد؛ بنابراین، دامنه بارگذاری معادل ۱۴۰۰ کیلونیوتن استفاده شد. برای شبیه سازی اتصال مفصلی براساس اتصال واقعی گوشواره ها پین درون دو گوشواره و گوشواره میانی قرار گرفته است و تحت فشار و کشش و یک طرف به صورت تکیه گاه ارزیابی شد.



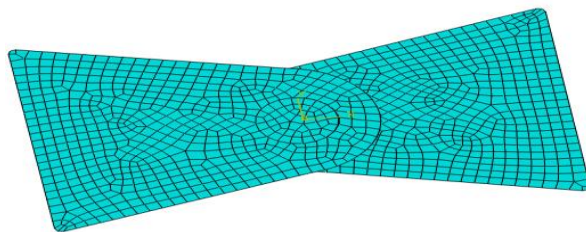
تصویر ۱۶. شرایط مرزی اعمالی در الگوسازی

1. Nonlinear Kinematic Hardening
2. Von Misses

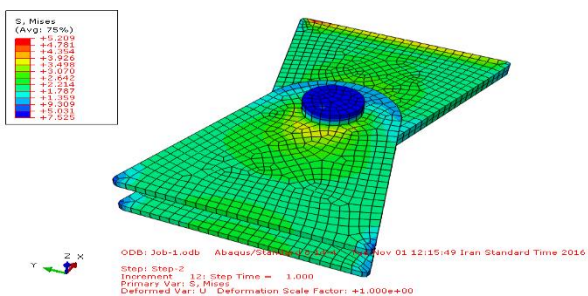
## تحلیل

المانهای کاربردی صلب<sup>۱</sup> با ۱۲ گره برای الگوسازی اعضای قاب استفاده شد که هر گره آن، شش درجه آزادی دارد. تحلیل حساسیتی برای تعیین ابعاد عناصر در قسمت‌هایی که کماتش موضعی و رفتار غیرخطی دارد، انجام شد و بیشینه بعد مش ۱۰ میلیمتر انتخاب شده است. در این پژوهش به منظور تمرکز بر عوامل مؤثر بر عملکرد کششی گوشواره تمامی اتصالها به یکدیگر بسته شده است. برای نشان دادن کماتش و تأثیرات غیرخطی در مصالح از فرمولاسیون غیرخطی هندسی استفاده می‌شود.

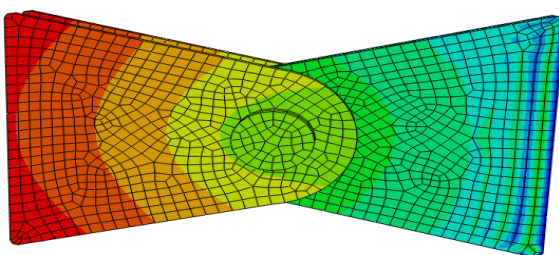
برای داشتن معیاری مناسب و بررسی عملکرد نمونه‌ها و پیش‌بینی عملکرد نهایی از مفهوم تنش فون میسر استفاده شده است. در عناصری که تحت تنشهای ترکیبی عادی و برشی قرار دارد، معیار تنش فون میسر در هر یک از عناصر بررسی می‌شود. پس از تسلیم تغییر شکلهای خمیری و ماندگاری در عناصری که به تنش تسلیم رسیده است، رخ می‌دهد. در نواحی که در معرض تسلیم قرار دارد، اگر اندازه مش‌ها بزرگ باشد، ناحیه تسلیم معیار فون میسر بدرستی شناسایی نمی‌شود و باعث خطا در محاسبات می‌شود. برای حل این کمبود دو راه‌حل وجود دارد: نخست، کاهش اندازه مش‌ها برای هندسه مورد مطالعه و دوم، کاهش اندازه مش‌ها تنها در نواحی در معرض تسلیم است. در این مقاله برای افزایش دقت و سرعت تحلیل از راه دوم استفاده می‌شود؛ بنابراین، اندازه مش‌ها در نواحی متمرکز تغییر شکلهای خمیری به اندازه کافی کوچک انتخاب می‌شود.



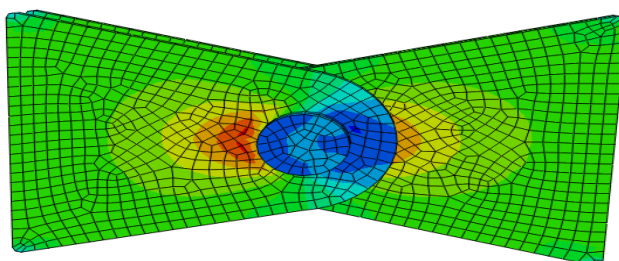
تصویر ۱۷. مش‌بندی عناصر گوشواره



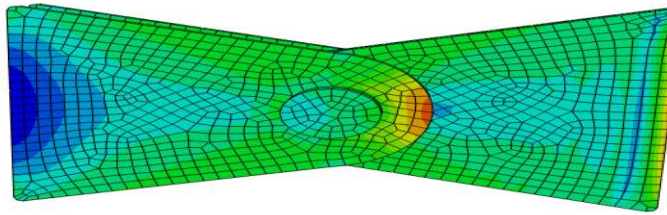
تصویر ۱۸. بیشترین تنش کششی در لبه گوشواره (بیشینه تنش ۵۲۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع)



تصویر ۱۹. بیشینه جابه‌جایی گوشواره (۸ میلیمتر)

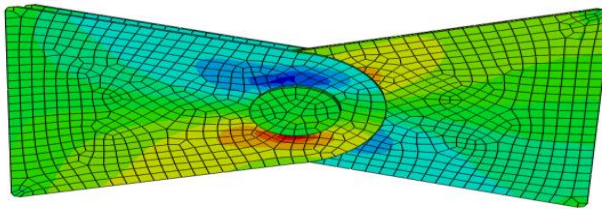


تصویر ۲۰. بیشینه تنش در جهت X (۲۲۳۱ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع)



Abaqus/Standard 6.14-4 Tue Nov 01 12:15:49 Iran Standard Time 2016  
 :: Step Time = 1.000  
 S22  
 U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

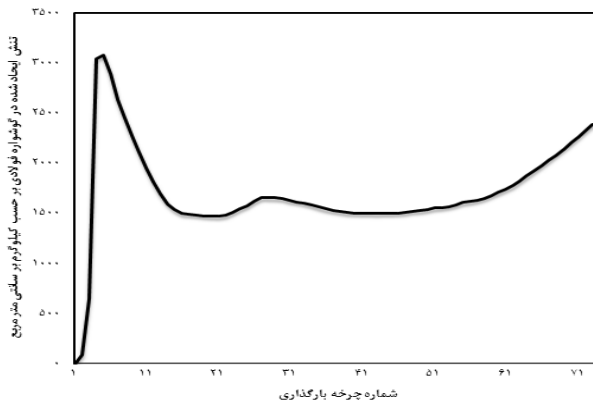
تصویر ۲۱. بیشینه تنش در جهت Y (۵۲۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع)



Abaqus/Standard 6.14-4 Tue Nov 01 12:15:49 Iran Standard Time 2016

تصویر ۲۲. بیشینه تنش در جهت برشی درون صفحه (۶۵۱ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع)

براساس نتایج محاسباتی، تمام تنش‌های بارگذاری شده در حالت‌های مختلف از حد مجاز آیین‌نامه کمتر است. با افزایش تنش بیش از حد تا مرحله شکست در عناصر گوشواره‌ای، کاهش مقاومت و سپس افزایش مقاومت ناشی از سخت‌شدگی مشاهده می‌شود. کاهش مقاومت پس از جاری‌شدن سازه گوشواره به دلیل تأثیرات پارگی در نواحی اتصال لبه‌های گوشواره به لوله است. براساس تصاویر ۲۰ تا ۲۲، بیشینه تنش‌ها در محل اتصال گوشواره رخ می‌دهد. این تنش‌ها به ترتیب در راستاهای X، Y و برشی به ترتیب برابر ۲۲۳۱، ۵۲۰ و ۶۵۱ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع رخ داده است. هم‌چنین با تبدیل و بازنویسی تنش‌ها در راستای تنش‌های اصلی، تنش فون میسر در اتصال گوشواره به ۳۳۵۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع می‌رسد و تسلیم اتفاق می‌افتد. با توجه به کانتورهای تنش در عضو گوشواره و تنش زیاد در ناحیه اتصال بین به گوشواره‌ها اولین ترک و گسیختگی از این ناحیه است.



تصویر ۲۳. بیشینه تنش ایجاد شده در گوشواره فولادی تحت دامنه بارگذاری بیشینه

## نتیجه‌گیری و پیشنهادها

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تاریخچه پل‌سازی و سپس، شیوه اجرای پل بعثت بررسی شد. این پل به دلیل قرارگیری در نزدیکی اروند از پیچیدگیهای تحلیلی بسیاری برخوردار است. در تحلیل این پل، باید به مسائل گوناگونی همانند جنگ، عرض و عمق رودخانه در محل احداث پل، سرعت جریان آب، سازه‌های دریایی و رودخانه‌ای توجه کرد. باتوجه به هندسه پل، این پل از پایداری بسیار خوبی در برابر بارهای وارد شده همانند جریان آب و انفجار برخوردار است. طراحی و اجرای این پل به شکلی انجام شده که تخریب پل برای دشمن غیرممکن بود. لوله‌های نازک در راستای جریان آب باعث کاهش بارهای ناشی از فشار جریان آب بر سازه پل شده است.

موردی که در اتصالات و اجزای پل بعثت مشاهده می‌شود، نسبت تنش‌های بحرانی موجود به تنش مجاز در محدوده اطمینان قرار دارد؛ از این رو، استفاده بی‌وقفه از این پل را امکان‌پذیر می‌ساخت. براساس نتایج محاسباتی، تمام تنش‌های وارد شده در حالت‌های مختلف از حد مجاز آیین‌نامه کمتر است. با افزایش تنش بیش از تنش وارد شده تا مرحله شکست در عناصر گوشواره‌ای پس از جریان در عضو، کاهش مقاومت و سپس افزایش مقاومت ناشی از سخت‌شدگی در گوشواره مشاهده می‌شود. کاهش مقاومت بعد از جریان در گوشواره به دلیل تأثیرات پارگی جوش در نواحی اتصال لبه‌های گوشواره به لوله است.

## پیشنهاها

سازه پل بعثت را می‌توان بهترین گزینه ممکن در زمان خود معرفی کرد؛ اما با توجه به سرعت و قدرت تخریب جنگنده‌های امروزی، استفاده از گزینه‌ای که در کمترین زمان ممکن احداث شود، منطقی‌تر است. به همین دلیل، پلهای شناور نظامی بهترین گزینه به‌شمار می‌آید. براساس نتایج این پژوهش، عنصر لبه اتصال گوشواره به لوله، نقطه ضعیف در تحمل نیروهای وارد شده است. جوش، دارای شکل‌پذیری کمی است و تغییر شکل سازه را در مقابل بارهای آب و زلزله آشکار می‌کند. از طرفی فولاد ST-60 به دلیل مقاومت زیاد، اتصال ضعیف‌تری با جوش دارد. به همین دلیل، پیشنهاد می‌شود برای افزایش شکل‌پذیری لوله‌ها و کاهش هزینه‌ها از لوله‌های با ضخامت بیشتر و مقاومت فولاد کمتر استفاده شود. در علم روز مهندسی نظامی، سرعت عمل در ساخت پل موقت از اهمیت بسیاری برخوردار است. ساخت لوله‌های از جنس فایبر (کربن، آرامید، شیشه و...) به دلیل مقاومت بسیار زیاد نسبت به فولاد بررسی شود.

## فهرست منابع

- امام خامنه‌ای، سید علی (۱۳۹۳). *بیانات در روز ملی مهندس*، قابل‌بازیابی در: [www.farsi.khamenei.ir/speech-content?id=28998](http://www.farsi.khamenei.ir/speech-content?id=28998)
- امیری، سعید (۱۳۹۵). نقش پلهای «پی. ام. پی» در جنگ پل پیروزی، *روزنامه کیهان*.
- بنی‌هاشمی، سیدهاشم (۱۳۸۹). *پل بعثت از دیدگاه مهندسی جنگ*، مشهد: نشر آستان قدس رضوی.
- بی‌نام (۱۳۷۴). *استاندارد بارگذاری پلهای ایران*، تهران: معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری.
- بی‌نام (۱۳۸۶). *دستورالعمل طراحی پلهای فلزی*، تهران: معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری.
- بی‌نام (۱۳۸۷). *آیین‌نامه طرح پلهای شوسه و راه‌آهن در برابر زلزله*، تهران: معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری.
- جلالی فراهانی، غلامرضا (۱۳۹۵). *مدیریت مهندسی دفاعی*، تهران: دانشگاه صنعتی مالک اشتر.

- شمسایی، فتح‌الله (۱۳۹۰). جزوه درسی مدیریت مهندسی دفاعی، تهران: دانشگاه صنعتی مالک اشتر.
- مرادی، بابک (۱۳۹۲). نمونه‌هایی از دستاوردهای دوران دفاع مقدس، قابل بازیابی در پایگاه اینترنتی پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی: <http://www.inio.ac.ir>
- <https://dnws.ir>