



استفاده از فولادهای پر استحکام در صنعت ساختمان ظرفیت‌ها، فرصت‌ها و چالش‌های در پیش رو

احسان نصری^۱، حمیدرضا رضایی^۲، محمد کاظم تدین^۳، فخرالدین اشرفی‌زاده^۴

۱ و ۲ - پژوهشکده فولاد، ساختمان مرکزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳ - مدیریت پشتیبانی فنی مشتریان، مجتمع فولاد مبارکه اصفهان

آدرس پست الکترونیکی مولف رابط: ehsan.nasri@cv.iut.ac.ir

خلاصه

در این مقاله توجیه‌پذیری استفاده از فولادهای پر استحکام کم آلیاژ از دیدگاه‌های مهندسی و اقتصادی مورد بحث قرار گرفته است. از دیدگاه مهندسی، استحکام بالای این گونه فولادها سبب کاهش قابل توجه وزن فولاد مصرفی شده و اگر چه قیمت تمام شده واحد وزن فولادهای پر استحکام کمی بیشتر از فولادهای معمول است، لیکن از نظر اقتصادی قابل قبول می‌باشد. ارزش اقتصادی بالاتر این محصولات سبب ایجاد رقابت بسیار سازنده با تولیدکنندگان فولادهای نرمه معمولی خواهد شد. با تأمین احتیاجات صنعت با میزان فولاد کمتر و ارزش افزوده بالاتر، اقتصاد ملی قوت گرفته و علاوه بر افزایش تولید و رشد اقتصادی، در نهایت توسعه چشم‌گیر صنعت فولاد را به همراه خواهد داشت.

کلمات کلیدی: فولاد پر استحکام، فولاد کم آلیاژ پر استحکام، توجیه فنی - اقتصادی.

مقدمه

در چهار دهه اخیر و در سطح جهانی، فرآوری و به کارگیری فولادهای پر استحکام کم آلیاژ^۵ مورد توجه خاصی قرار گرفته است، به نحوی که طی این مدت این گونه فولادها به خوبی جای خود را در کاربردهای متنوع صنعتی باز کرده و در زمان کنونی در موارد خاص استفاده از آنها غیر قابل چشم‌پوشی است. مقاومت تسلیم بالا و رفتار بسیار مناسب این فولادها سبب جایگزینی آنها با فولادهای معمول شده و پیشرفت‌های فنی حاصل شده در سال‌های اخیر در زمینه فولادسازی و نورد گرم سبب کاهش قیمت و افزایش میزان رقابت فولادهای پر استحکام کم آلیاژ با دیگر انواع فولادها شده است [۱]. علی‌رغم تمام این پیشرفت‌ها، میزان مصرف سالیانه فولادهای میکروآلیاژی در حدود ۱۵ درصد کل فولاد تولید شده در سطح جهان است. از این رو فضای بسیار مناسبی جهت رشد و توسعه فولادهای پر استحکام در جهان وجود دارد. هدف اصلی از تهیه این مقاله، همان‌طور که از نام آن نیز استنباط می‌شود، بررسی مزیت‌های استفاده از فولادهای پر استحکام کم آلیاژ در ساخت سازه‌های عمرانی در سطح کشور و ارائه راهکارهای مناسب جهت ترویج تولید، توزیع و استفاده از فولادهای پر استحکام در صنعت ساختمان می‌باشد. در ابتدای این مقاله، به صورت خلاصه توضیحاتی راجع به انواع فولادهای ساختمانی و مقایسه خواص فولادهای پر استحکام کم آلیاژ با فولادهای معمول داده شده و سپس تاثیر افزایش استحکام فولاد با در نظر گرفتن معیارهای طراحی و نوع باربری اعضا در سازه‌های فولادی مورد بحث قرار گرفته است. با ارائه نتایج آنالیز و طراحی برای ده سازه ساختمانی مختلف، توجیه‌پذیری استفاده از فولادهای پر استحکام در حالات واقعی بررسی و در نهایت با مقایسه خواص محصولات فولادی پر استحکام موجود در کشور با ضوابط و مقررات فنی موجود، امکان دستیابی به فولادهای پر استحکام در سطح کشور و راهکارهای مناسب در جهت نزدیک‌تر کردن هرچه بیشتر منافع دست‌اندرکاران تولید، عرضه و مصرف محصولات فولادی جهت ترویج استفاده از فولادهای پر استحکام در سطح کشور مطرح خواهد شد.

^۱ کارشناس ارشد مهندسی عمران، محقق پژوهشکده فولاد، دانشگاه صنعتی اصفهان.

^۲ کارشناس ارشد مهندسی مواد، محقق پژوهشکده فولاد، دانشگاه صنعتی اصفهان.

^۳ کارشناس و مدیر پشتیبانی-فنی مشتریان، مجتمع فولاد مبارکه اصفهان.

^۴ استاد دانشکده مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان.

^۵ High Strength Low Alloy Steels (HSLA)



لزوم به کارگیری مصالح ساختمانی جدید، استفاده از فولادهای پراستحکام

مزیت‌های استفاده از فولادهای پراستحکام نسبت به فولادهای معمول در صنعت ساختمان می‌تواند از دو دیدگاه متفاوت که به یکدیگر به صورت یک حلقه مرتبط هستند مورد بررسی قرار گیرد. نخستین و مهم‌ترین دیدگاه که تقریباً در ذهن هر مهندس طراح تداعی می‌گردد، کاهش وزن فولاد مصرفی به دلیل افزایش مقاومت آن و ظریف‌تر شدن ابعاد مقاطع سازه و نتیجتاً کاهش قیمت تمام شده سازه می‌باشد. دیدگاه دوم که به صورت زنجیره‌وار با دیدگاه نخست وابسته است، بهبود لرزه‌ای رفتار سازه در برابر بارهای دینامیکی مانند زلزله و دیگر بارهای ارتعاشی به دلیل کاهش جرم و ظریف‌تر شدن ابعاد اجزای باربر می‌باشد [۲]. استفاده از مصالح سبک به‌جای مصالح سنگین یکی از مطرح‌ترین مباحث روز در سطح کشور است. مصالح سنگین بخش عمده‌ای از تلفات را به هنگام زلزله به بار می‌آورند. روشن است که هر قدر جرم ساختمان کاهش یابد، نیروی اینرسی که به ساختمان وارد می‌شود کاهش یافته و استفاده از اجزای سازه‌ای ظریف‌تر برای تحمل نیروهای ناشی از زلزله به خوبی کفایت خواهد کرد. به طور کلی در ساختمان‌ها دو نوع اعضا به کار گرفته می‌شوند. گروه اول اعضای سازه‌ای و حساس هستند که این اعضا وظیفه تحمل نیروهای ناشی از زلزله و بارهای قائم را بر عهده دارند و گروه دیگر اعضای غیرسازه‌ای مانند دیوارهای جداکننده می‌باشند. در حال حاضر با توجه به کثرت مصالح ساختمانی سبک که در سال‌های اخیر در کشور تولید شده‌اند، امکان ساخت و اجرای اجزای غیرسازه‌ای با مصالح ساختمانی سبک فراهم شده است. لیکن تا کنون مصالح ساختمانی سبک مناسبی برای به کارگیری در اجزای سازه‌ای معرفی نشده است. به نظر می‌رسد استفاده از فولادهای پرمقاومت در صنعت ساختمان تحول‌شگرفی در کاهش وزن، اقتصادی‌تر شدن ساخت و افزایش کارایی اجزای سازه‌ای ایجاد نماید.

توجه به معیارهای طراحی اثر گذار در بکارگیری فولادهای پراستحکام

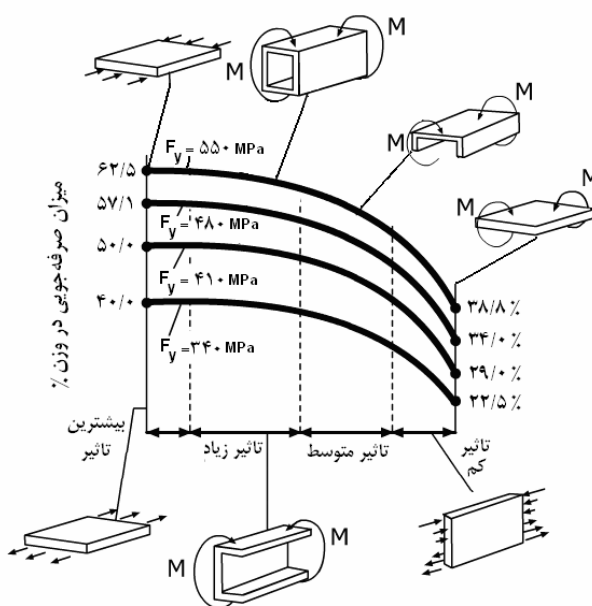
با توجه به انتظاراتی که از لحاظ عملکردی از سازه‌ها می‌رود، معیارهای متفاوتی در طراحی سازه‌ها و علی‌الخصوص سازه‌های فولادی به کار گرفته می‌شوند. اعمال یا عدم اعمال این معیارها در طراحی بستگی به وظایف و اهمیت نوع رفتاری است که سازه یا عضو سازه‌ای در شرایط خاص یا در حالت کلی از خود می‌بایست نشان دهد. اعمال بعضی از معیارهای طراحی در طراحی سازه‌ها یا عضوهای خاص باعث عدم توجیه‌پذیری جایگزینی فولادهای پراستحکام با فولادهای معمولی در این سازه‌ها یا اعضا می‌شود. یکی از معیارهایی که در طراحی سازه‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد، معیار تغییر مکان است. در سازه‌های فولادی به علت بالا بودن مقاومت فولاد عموماً با مقاطع ظریف که حاصل آن کاهش چشم‌گیر در ممان اینرسی مقاطع است روبرو هستیم. در سازه‌های با مقاطع ظریف و دارای ممان اینرسی کم هنگامی که بارهای جانبی ناشی از زلزله و یا باد اعمال می‌شوند، تغییر مکان‌های جانبی نسبتاً زیادی در سازه پدید می‌آید که خود ممکن است باعث ایجاد ناپایداری جانبی و یا عدم احساس آرامش برای استفاده‌کنندگان شود. این در حالی است که استفاده از فولاد پراستحکام منجر به طراحی اعضای با مقاطع باز هم ظریف‌تر می‌شود. از آنجایی که بعضاً در طراحی چنین اعضایی با استفاده از فولادهای معمول، مواجه با حالاتی هستیم که مقطع عضو فولادی از نقطه نظر استحکام جواب‌گو بوده، لیکن نیاز به استفاده از مقطع فولادی به ابعاد بزرگ‌تر جهت کنترل تغییر مکان‌ها می‌باشد، از این‌رو به نظر می‌رسد که در توجیه استفاده از فولادهای پراستحکام در طراحی اعضای فولادی، معیار تغییر مکان، باید مورد توجه خاص قرار گیرد.

پدیده دیگری که در فولادهای با درصد کربن زیاد و استحکام بالا پدید می‌آید پدیده تردشکنندگی است. اگرچه در فولادهای پراستحکام مورد بحث، میزان کربن بسیار کم و درصد ازدیاد طول در نقطه شکست به ۲۵ درصد می‌رسد، لیکن کنترل معیار تردشکنندگی در سازه‌های فولادی که با مصالح پراستحکام بالا ساخته شوند ضروری است.

تاثیر نوع اعضای باربر و سیستم‌های انتقال بار در انتخاب فولاد با استحکام مناسب

سازه‌های فولادی مشتمل بر تعدادی تیر و ستون به شکل قاب و نیز شامل تعدادی تقویت‌کننده، به منظور ایستایی بیشتر هستند. به منظور تفهیم و بررسی هرچه بهتر مزایا و معایب احتمالی استفاده از فولادهای پراستحکام، لازم است که اثرات مثبت و یا منفی احتمالی استفاده از فولادهای پرمقاومت در طراحی اعضای مختلف باربر و تاثیر نوع باربری عضو در انتخاب فولاد مناسب با در نظر گرفتن معیارهای طراحی تبیین گردد.

اعضای کششی در سازه‌های متعددی مانند ساختمان‌های چند طبقه، پل‌های معلق و کابلی ایستا، خراباها و منابع هوایی به عنوان اعضای اصلی تحمل‌کننده بار و اعضای فرعی مهارکننده جانبی به کار می‌روند تا با مقید کردن درجات آزادی، پایداری سیستم را تامین کنند. به دلیل این‌که در اعضای کششی ناپایداری به دو صورت کماتش کلی و موضعی در عضو پدید نمی‌آید، انتقال نیرو در یک سازه فولادی به صورت کششی، بهترین نوع انتقال نیرو است. این مزیت در طراحی و ساخت سازه‌ها سبب استفاده از فولادهای پراستحکام در اقصی نقاط جهان شده است. در طراحی اعضای کششی معیار مقاومت به عنوان ضابطه اصلی طراحی مطرح است و تنش مجاز در آیین‌نامه‌ها برای اعضای کششی به صورت درصدی از تنش تسلیم و تنش کشش نهایی تعیین شده است [۳]. در اعضای کششی که بر اساس لاغری حداکثر مجاز اعضای کششی طراحی نشده‌اند، انتخاب فولاد پراستحکام بسیار مقرون به صرفه است. همانطور که در شکل ۱ نیز نشان داده شده است، با افزایش تنش تسلیم در یک عضو تحت کشش خالص میزان فولاد مصرفی بیش از بقیه حالات باربری کاهش می‌یابد. اگر چه در حالات دیگر که عضو تحت خمش یا پیچش قرار دارد نیز استفاده از فولادهای پراستحکام سبب کاهش میزان صرفه جویی در وزن -نسبت به اعضای کششی- می‌شود، با این وجود میزان کاهش وزن و به تبع آن کاهش هزینه‌ها هنوز قابل توجه است [۴].



شکل ۱- میزان صرفه جویی در وزن فولاد مصرفی با افزایش استحکام فولاد در انواع حالات باربری [۵]

در اعضای باریک، لاغر و ظریف که تحت تاثیر نیروی محوری فشاری هستند ممکن است انهدام در سازه قبل از آنکه تنش‌ها در مقطع به حد تنش تسلیم برسند اتفاق بیفتد، در این حال گفته می‌شود که عضو تحت فشار ناپایدار شده یا کمانش کرده است. ناپایداری یا کمانش در عضو تحت فشار به صورت کلی و موضعی یا ترکیبی از هر دو ممکن است به وجود آید. امکان ناپایداری عضو فشاری اضافه بر شرایط تکیه‌گاهی و طول عضو به ممان اینرسی مقطع و مدول الاستیسیته فولاد نیز بستگی دارد و تنش مجاز، برابر با درصدی از تنش حد تسلیم است که عضو فشاری قبل از رسیدن به حالت ناپایداری توانایی رسیدن به آن را داشته باشد [۳]. در طراحی اعضای فشاری، انتخاب فولاد پر استحکام هر چند منجر به کاهش سطح مقطع می‌شود اما در صورت کاهش شعاع ژیراسیون مقطع انتخابی، تنش مجاز نیز کاهش می‌یابد. اضافه بر این در بعضی حالات با افزایش استحکام فولاد و همچنین ظریف‌تر شدن مقاطع، امکان ایجاد ناپایداری موضعی بیشتر می‌شود [۳ و ۶].

در طراحی تیرها ترجیح داده می‌شود که ماده تشکیل دهنده اجزای مقطع دارای شرایطی باشد که امکان تحلیل پلاستیک را برای آن‌ها فراهم آورد. این مقصود وقتی حاصل می‌شود که اولاً ماده تشکیل دهنده عضو خاصیت شکل‌پذیری مناسبی داشته باشد که در مورد فولاد معمولی و فولادهای پر استحکام این خاصیت وجود دارد. ثانیاً عضو و مقطع آن بتواند کرنش‌های بزرگتر از حد تسلیم را تجربه نموده بدون آنکه هیچ‌گونه ناپایداری کلی و موضعی در آن پدید آید. به عنوان مثال، با توجه به رابطه حاکم در تعیین حداکثر نسبت مجاز عرض به ضخامت (مانند رابطه $545/\sqrt{F_y}$ در تعیین نسبت عرض به

ضخامت بال تیرهای فشرده I شکل) افزایش تنش تسلیم (F_y) سبب کاهش نسبت مجاز مذکور شده و در صورت لزوم باید در ابعاد محاسبه شده تجدید نظر گردد. به طور کلی در مواردی که پایداری اجزا به عنوان معیار طراحی مد نظر قرار می‌گیرد، تنش‌های مجاز حاکم می‌باشند و افزایش تنش تسلیم نقش عمده‌ای ایفا نمی‌کند. با توجه به این نکته و اینکه مدول الاستیسیته در این فولادها بیشتر از فولادهای معمولی نیست، به نظر می‌رسد استفاده از فولادهای پر استحکام در چنین مواردی تاثیر چشم‌گیری در کاهش وزن فولاد مصرفی و بالتبع کاهش هزینه‌ها نداشته باشد.

از دیدگاه کلی، استفاده از فولادهای با تنش تسلیم بالاتر در بسیاری از موارد منجر به کاهش وزن فولاد مصرفی گشته و دارای صرفه اقتصادی است. در اعضای که بر اساس معیار مقاومت طرح می‌شوند و مساله ناپایداری در طراحی آنها عملاً بی‌تاثیر است، استفاده از فولاد پر استحکام توجیه و صرفه اقتصادی بسیار خوبی خواهد داشت. لیکن در بعضی از اعضا که تغییر مکان و یا خیز در طراحی آنها تعیین‌کننده است، استفاده از نوع مقاوم‌تر فولاد باعث کاهش هزینه‌ها نخواهد شد. پس به صورت کوتاه و مختصر می‌توان نتیجه‌گیری کرد که نوع سازه و معیارهای حاکم در آن، نسبت قیمت فولاد پر استحکام به فولاد معمولی و امکان تهیه آن در مدت زمان اجرای پروژه از عوامل موثر در انتخاب نوع فولاد مصرفی می‌باشند.

استفاده از فولادهای پر استحکام، کاهش میزان فولاد مصرفی و اقتصادی‌تر شدن سازه

در مبحث قبل از دیدگاه تئوری به این نتیجه رسیدیم که استفاده از مقاطع فولادی پر استحکام به جای مقاطع فولادی با استحکام معمولی، در اغلب مواقع منجر به طراحی اعضای فولادی با سطح مقطع کمتر و ظرافت بیشتر خواهد شد که قادر به تحمل میزان بار مساوی با مقاطع فولادی ساخته شده از فولاد معمولی با سطح مقطع و ابعاد بزرگتر می‌باشند. به عبارت دیگر، به ازای بارهای وارده به سیستم، استفاده از مقاطع ظریف‌تر ساخته شده از



فولادهای پراستحکام سبب کاهش وزن کل فولاد مصرفی که قسمتی از وزن مرده را تشکیل می‌دهد، می‌گردد. با کاهش وزن سیستم، نیروهای ناشی از وزن مرده و زلزله (که به صورت درصدی از کل وزن ساختمان در نظر گرفته می‌شوند) کاهش می‌یابند که کاهش نیروهای وارده بر ساختمان، به صورت زنجیره‌وار مجدداً سبب کاهش بیشتر سطح مقطع مورد نیاز و ظرفیت تر شدن اعضای باربر خواهد شد. با توجه به تفاوت قیمت فولادهای معمولی و فولادهای پراستحکام و این مطلب که هزینه کل ساخت سازه علاوه بر وزن فولاد مصرفی، تابع قیمت واحد وزن فولاد نیز می‌باشد، باید برای سازه‌های مختلف مطالعات و محاسبات دقیقی انجام گرفته و صحت این ادعا که استفاده از فولادهای پراستحکام منجر به کاهش کل هزینه‌ها می‌گردد، مورد بررسی قرار گیرد.

در مراحل انجام این پژوهش طی محاسبات دقیق مهندسی برای ساختمان‌های چند طبقه با سیستم باربر فولادی، ساختمان‌های صنعتی و پل‌ها این مطلب مورد تجزیه و تحلیل دقیق قرار گرفته است. در این راستا از مجموعه آیین نامه‌ها، مقررات و ضوابط بارگذاری، آنالیز و طراحی سازه‌های فولادی مصوب وزارت مسکن و شهرسازی، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن و سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور به همراه تعدادی از منابع خارجی استفاده شده [۷ تا ۱۳] و سعی بر آن بوده است که با در نظر گرفتن طیف گسترده‌ای از سازه‌ها با کاربردهای متفاوت، آنالیزها به صورت مستدل تر ارائه شوند تا نتایج بدست آمده هرچه بیشتر قابل استفاده باشند. به کارگیری نرم‌افزار SAP2000 در مدل‌سازی، آنالیز و طراحی سازه‌های مختلف یک بار با استفاده از فولادهای معمولی ST-37، بار دیگر با به کارگیری فولاد پراستحکام ST-52 و در بعضی موارد با ظرافت خاصی استفاده از ترکیب موزون فولاد ST-37 و ST-52 در اعضای مختلف با نحوه باربری متفاوت سبب شده است که نتایج هرچه عملی‌تر جهت بررسی توجیه‌پذیر بودن جایگزینی فولادهای معمولی با فولادهای پراستحکام در سازه‌ها و یا عضوهای فولادی مختلف به دست آید. در این ارتباط نحوه عملکرد اعضای باربر گوناگون در سازه‌های مختلف به دقت مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است (جدول ۱).

جدول شماره ۱ - مقایسه میزان صرفه‌جویی^۱ با استفاده از فولادهای پراستحکام در ده سازه مختلف [۱]

ردیف	نوع سازه	مشخصات هندسی	میزان صرفه‌جویی نسبت به حالت طراحی با ST-37 (%)	
			طراحی با ST-52	طراحی با ترکیبی از ST-52 و ST-37
۱	ساختمان فولادی مسکونی هشت طبقه	ساختمان داری ابعاد ۱۷/۷ متر در ۱۲/۵ متر در پلان و ارتفاع ۲۴/۴ متر می‌باشد.	۱۳/۹۳	۱۵/۳۴
۲	ساختمان فولادی مسکونی ده طبقه	ساختمان داری ابعاد ۱۷ متر در ۲۱ متر در پلان و ارتفاع ۳۲ متر می‌باشد.	۲۲/۵۵	۲۳/۵۸
۳	ساختمان فولادی مسکونی هفده طبقه	ساختمان داری ابعاد ۲۱ متر در ۲۲ متر در پلان و ارتفاع ۵۴/۴ متر می‌باشد.	۱۹/۱۵	۱۹/۳۳
۴	قاب صنعتی دو دهانه فولادی با اتصالات خمشی	دهانه‌های قاب هر کدام ۱۵ متر و ارتفاع سازه ۷/۵ متر می‌باشد.	۱۰/۶۳	-
۵	قاب صنعتی چهار دهانه فولادی با اتصالات خمشی	دهانه‌های بزرگ قاب هر کدام ۱۸ متر و ارتفاع قاب‌ها برابر با ۱۳/۲ متر و ۸/۷ متر می‌باشد.	۱۳/۹۱	-
۶	سوله صنعتی دو دهانه فولادی	سازه صنعتی با ابعاد ۶۰ در ۲۶/۵ و ارتفاع ۱۳/۴ متر با دهانه‌های قاب‌ها برابر با ۳۰ متر می‌باشد.	۹/۹۵	-
۷	سوله صنعتی تک دهانه فولادی	سازه صنعتی با ابعاد ۹۰ در ۲۵ متر و ارتفاع ۱۱/۲۵ متر با دهانه‌های ۲۵ متر می‌باشد.	۱۰/۴۷	۱۸/۶۷
۸	سوله صنعتی سه دهانه فولادی با فرم غیرمتعارف	سازه صنعتی با ابعاد ۹۳ در ۴۰ متر و حداکثر ارتفاع ۵۸ متر می‌باشد.	۱۳/۹۱	-
۹	پل تیر ورق‌سرسی، چهار دهانه فولادی	این پل دارای دو دهانه ۲۰ متری در طرفین و دو دهانه ۲۵ متری در وسط می‌باشد عرض پل ۱۶/۶ متر و فاصله تیر-ورق‌ها لز یکدیگر برابر با ۸ متر می‌باشد.	۱۶/۴۴	-
۱۰	پل عابرپاده سه دهانه فولادی (پل خرپایی)	پل سه دهانه، دارای دو دهانه ۳۶/۷ متری در طرفین و یک دهانه ۳۴/۴ متری در وسط با عرض برابر با ۳ متر می‌باشد.	۳/۹۶	-

^۱ در این مقایسه نسبت قیمت واحد وزن فولاد پراستحکام ST-52 به فولاد ST-37 با توجه به قیمت های ورق های فولادی تولید شده در مجتمع فولاد مبارکه برابر با ۱/۰۳۷ در نظر گرفته شده است.



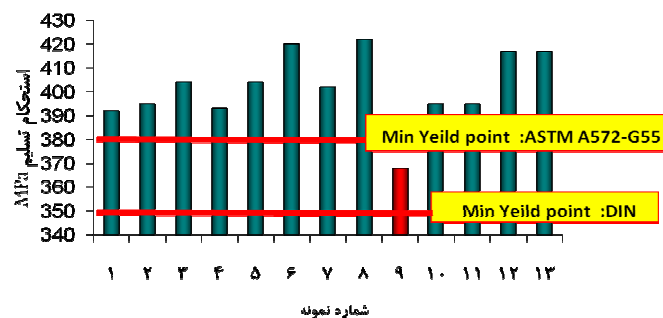
همان طور که در جدول ۱ مشاهده می شود، محاسبات انجام گرفته یافته‌های قبلی را تایید می‌نمایند و نتایج تمامی آنالیزها در سازه‌های گوناگون نشانگر اقتصادی بودن جایگزینی فولادهای پر استحکام به جای فولادهای معمول در سازه‌های عمرانی می‌باشد، لیکن فقط در پل عابر پیاده خرپایی سه دهانه فولادی (سازه شماره ۱۰)، به دلیل فرم خاص سازه و با توجه به میزان کم بارها و نحوه باربری اعضای باربر، جایگزینی فولادهای معمول با فولادهای پر استحکام سودمند بوده، لیکن اثر چشم‌گیری نخواهد داشت.

بررسی فولادهای پر استحکام موجود در کشور از دیدگاه استانداردها و آیین‌نامه‌ها

حال که توجیه‌پذیری استفاده از فولادهای پر استحکام در پروژه‌های عمرانی مورد تایید قرار گرفت، می‌بایست امکان دستیابی به چنین مواد اولیه در کشور با کیفیت مطلوب به دقت مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به اهمیت کیفیت فولاد مصرفی در ساخت سازه‌ها، سازمان‌های زیربند استانداردهای مشخصی جهت اطمینان از کیفیت فولادها با کاربردهای سازه‌ای تدوین و تولیدکنندگان فولاد در سراسر جهان را ملزم به رعایت قوانین و دستورالعمل‌های این استانداردها کرده‌اند. عدم توجه به موضوع کیفیت در تولید فولاد، با در خطر قرار دادن جان ساکنان و استفاده‌کنندگان از سازه مترادف است. بر اساس نتایج تحقیقی که توسط جمعی از پژوهش‌گران دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان بر روی قطعات فولادی به جا مانده از سازه‌های تخریب شده در زلزله بم قرار گرفت، مشخص شد که از دیدگاه مهندسی مواد دو علت عمده در تخریب سازه‌های فولادی نوساز وجود دارد. دلیل اول استفاده از فولاد نامرغوب و نامناسب در ساخت سازه‌های مذکور و دلیل دوم عدم رعایت دستورالعمل‌های جوشکاری حین ساخت می‌باشند.

در حالات معمول، به فرایندهای فولادسازی و فراوری پیچیده‌تری برای دستیابی به فولادهای پر استحکام کم آلیاژ^۱ -در مقایسه با فولادهای معمول- مورد نیاز است. فولادهای پر استحکام کم آلیاژ با مقدار کربن کمتری عرضه می‌شوند و در نتیجه نیاز به عملیات پیش گرم کردن برای جلوگیری از ترک‌های ناشی از جوشکاری، محدود و یا بطور کلی مرتفع می‌گردد. ضوابط آیین‌نامه AISC^۱ عمدتاً مشخصات فنی استاندارد ASTM^۲ را در تولید و به‌کارگیری فولادهای پر استحکام کم آلیاژ مورد توجه قرار می‌دهد. با توجه به اینکه ضوابط طراحی سازه‌های فولادی در کشور عمدتاً بر پایه اصول مطرح شده در آیین‌نامه AISC تدوین شده‌اند، لیکن پروفیل‌های فولادی وارداتی رایج و فولادهای ساختمانی تولیدی در داخل کشور عمدتاً مطابق با استاندارد DIN می‌باشند. بدین لحاظ، اغلب از مجموع استانداردهای بین‌المللی فولادهای سازه، استانداردهای آمریکایی ASTM و آلمانی DIN، در داخل کشور مورد توجه قرار می‌گیرند [۱۴ تا ۱۸].

بطور کلی در ایران تولید محصولات فولادی در هشت واحد تولیدی صورت می‌گیرد. این در حالی است که مجتمع فولاد مبارکه با دارا بودن سهمی معادل ۴۳ درصد از کل تولید محصولات فولادی کشور مقام نخست را به خود اختصاص داده است. مجتمع فولاد مبارکه، همچنین از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین واحدهای تولید فولاد در ایران و خاورمیانه محسوب می‌شود که در سال‌های اخیر توانسته است سهم عمده صادرات فولاد را به خود اختصاص دهد. در راستای مقایسه محصولات فولادی پر استحکام کم آلیاژ ST-52 این مجتمع با استانداردهای مربوطه و تعیین پتانسیل استفاده از این فولادها جهت مصرف داخلی فعالیت‌های عمرانی و یا به منظور صادرات، توسط محققین دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان نمونه‌هایی از کلاف‌های مختلف که در زمان‌های متفاوت تولید شده‌اند از واحد آزمایشگاه محصول مجتمع فولاد مبارکه جمع‌آوری شد. طی آزمایش‌های متعدد بر روی این نمونه‌ها، ترکیبات شیمیایی و خواص مکانیکی نمونه‌ها اندازه‌گیری و با استانداردهای DIN17100 و ASTM مورد مقایسه قرار گرفتند که نتایج این آزمایشات به صورت نمودارهایی در شکل‌های ۲، ۳ و ۴ قابل مشاهده می‌باشند [۱].

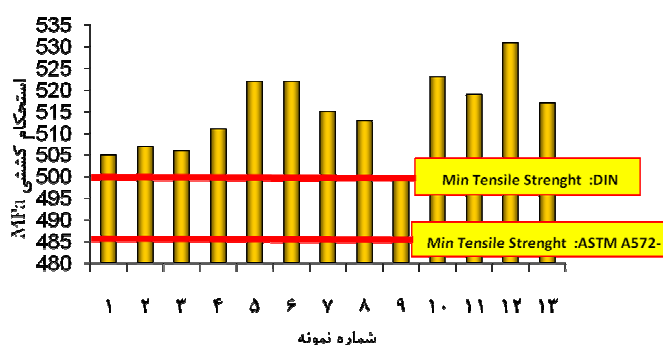


شکل ۲- استحکام تسلیم فولاد ST-52-3 تولیدی

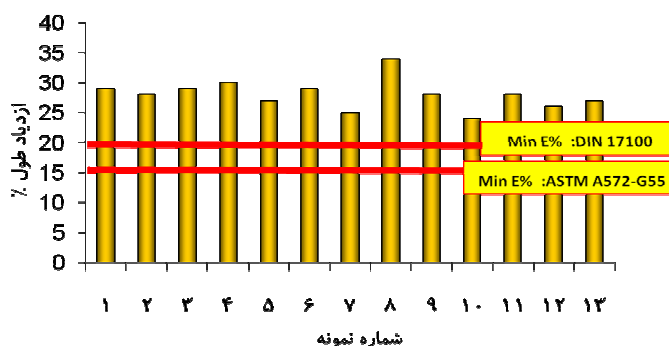
مجتمع فولاد مبارکه و مقایسه آن با استانداردها [۱].

^۱ American Institute of Steel Construction (AISC)

^۲ American Society for Testing and Materials (ASTM)



شکل ۳- استحکام کششی فولاد ST-52-3 تولیدی مجتمع فولاد مبارکه و مقایسه آن با استانداردها [۱].



شکل ۴- درصد ازدیاد طول نمونه های کششی فولاد ST-52-3 تولیدی مجتمع فولاد مبارکه و مقایسه آن با استانداردها [۱].

همان گونه که در شکل ۲ مشاهده می شود، استحکام تسلیم نمونه های انتخابی از کلاف های تولید شده در مجتمع فولاد مبارکه به خوبی از استاندارد DIN-17100 تبعیت می کنند. با مقایسه مقادیر استحکام تسلیم و استاندارد ASTM A572/55 مشخص است کلاف شماره ۸ با اختلاف بسیار جزئی ۱۰ مگاپاسکال توانسته است حداقل استحکام تسلیم مورد نظر در این استاندارد را کسب نماید. نکته ای باید به آن توجه داشت این است که در مجتمع فولاد مبارکه فولاد ST-52 مطابق استاندارد DIN تولید می شود که از نظر خواص می تواند با دو گرید 50 و 55 استاندارد ASTM A572 معادل شود. اگر گرید ASTM A572/50 در نظر گرفته شود می توان دید که نمونه شماره ۸ نیز شرایط پذیرش استاندارد ASTM را به دست آورده است. شکل ۳ مقادیر استحکام نهایی نمونه های انتخاب شده را نشان می دهد. نتایج گویای آن است که استحکام نهایی فولادهای تولیدی به خوبی از استانداردهای مذکور تبعیت می کنند. شکل ۴ نیز درصد ازدیاد طول نمونه های مورد نظر را در مقایسه با شرایط حداقل استانداردهای ASTM A572/55 و DIN-17100 نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، تطابق کامل بین نتایج موجود و استانداردها وجود دارد. به منظور اطمینان از امکان ایجاد تغییر شکل های غیرخطی و غیرارتجاعی در سازه ها و به منظور مستهلک نمودن انرژی ایجاد شده در زمان زلزله نسبت تنش تسلیم به مقاومت نهایی پایین به عنوان یک خصوصیت اصلی در تولید فولادهای پر استحکام سازه ای به دقت مد نظر قرار می گیرد که این نکته با مقایسه نتایج نشان داده شده در شکل های ۲ و ۳ به وضوح دیده می شود.

راهکارهای مناسب در جهت توسعه تولید، عرضه و مصرف محصولات فولادی پر استحکام با ارزش افزوده بالاتر

حال که توجیه پذیری استفاده از فولادهای پر استحکام و همچنین امکان دستیابی به چنین فولادهای در سطح کشور مورد بحث قرار گرفت، می بایست راهکارهایی جهت ترغیب و تشویق مصرف کنندگان و دست اندرکاران تولید، عرضه و مصرف محصولات فولادی مورد بررسی قرار گیرد. استحکام بیشتر این فولادها نسبت به فولادهای کربنی، سبب کاهش وزن ۱۵ تا ۲۵ درصدی تقاضای مصرف فولاد از سوی مصرف کنندگان می شود که این برای مصرف کننده بسیار مطلوب است. از طرف دیگر با توجه به بیشتر بودن ارزش افزوده فولادهای پر استحکام کم آلیاژ سود بیشتری نصیب تولید کننده می گردد. از دیدگاه اقتصادی، تولید بیشتر فولادهای پر استحکام با ارزش اقتصادی بالاتر سبب ایجاد رقابت بسیار مناسب با تولید کنندگان فولادهای نرمه معمولی خواهد شد. همچنین با تأمین احتیاجات کل صنعت ساختمان سازی با مقدار قابل توجهی فولاد کمتر، اقتصاد ملی نیز قوت



خواهد گرفت. در کل می‌توان گفت که توسعه فناوری تولید فولادهای پراستحکام کم آلیاژ دارای توجیه فنی و اقتصادی مناسبی در سطح کشور و حتی منطقه‌ای و جهانی بوده و گسترش تولید آن می‌تواند به عنوان یک برنامه استراتژیک اقتصادی مطرح گردد. در این راستا، ایجاد یک مرکز تحقیقاتی دانشگاهی-صنعتی مشتمل بر گروه‌ها و زیرگروه‌های کاری زیر که نیازهای تحقیق، توسعه و بررسی مطالبات فنی و اقتصادی را در بخش‌های مختلف صنعت فولاد شناسایی و بررسی کند یک ضرورت استراتژیک محسوب می‌شود.

(۱) گروه فنی-مهندسی:

۱- الف) زیرگروه تخصصی مهندسی عمران: از برنامه‌های این زیرگروه می‌توان به ارائه راهکارهای مناسب در جهت ترویج استفاده از فولادهای پراستحکام در طراحی و اجرای سازه‌های عمرانی، اعم از سازه‌های صنعتی، ساختمانی و پل‌ها، اشاره کرد. همچنین این زیرگروه با تدوین دستورالعمل‌ها و ضوابط فنی مورد نیاز جامعه مهندسی، راه را برای طراحی و اجرای سازه‌ها با استفاده از فولاد پرمقاومت هموار خواهد کرد.

۱- ب) زیرگروه تخصصی مکانیک: از برنامه‌های این زیرگروه می‌توان به مطالعه و تهیه طرح‌ها و ضوابطی برای استفاده از فولادهای پراستحکام در جهت کاهش وزن خودروها، کشتی‌ها و دیگر موارد ذیربط با استفاده از فولادهای جایگزین در بدنه، شاسی و قطعات جانبی اشاره کرد.

۱- ج) زیرگروه تخصصی مواد: تدوین و طراحی روش‌های مدرن جهت دستیابی به محصولات مرغوب‌تر با قابلیت رقابت در سطح داخلی و بین‌المللی از جمله وظایف این زیرگروه می‌باشد. شایان ذکر است که فولادهای پراستحکام ST-52 در بسیاری از کشورهای صنعتی تحت عنوان فولاد رایج مورد استفاده قرار می‌گیرند و بالتبع فولادهای پراستحکام از دیدگاه کشورهای صنعتی دارای مقاومت بالاتری نسبت به ST-52 می‌باشند. همچنین زیرگروه مهندسی مواد با کمک زیرگروه‌های دیگر مهندسی، نسبت به ارائه دستورالعمل‌ها و ضوابط خاص جهت استفاده از فولادهای پراستحکام در صنعت (مانند دستورالعمل جوشکاری) اهتمام خواهد ورزید.

(۲) گروه مدیریت، صنایع و اقتصاد:

۲- الف) زیرگروه تخصصی مهندسی صنایع-مدیریت: از برنامه‌های این گروه می‌توان به تدوین و طراحی روش‌های مدرن جهت افزایش کارایی، افزایش تولید، بهبود کیفیت و کاهش مصرف انرژی در تولید فولادهای پراستحکام اشاره کرد.

۲- ب) زیرگروه تخصصی بازار، عرضه و تقاضا: شرکت‌های تولید فولاد داخلی نه تنها قادر به ارضای کامل بازار داخلی محصولات تخت می‌باشند، بلکه حتی می‌توانند سهم نسبتاً عمده‌ای نیز در بازارهای فولاد بعضی از کشورهای منطقه و جهان را به خود اختصاص دهند. اضافه بر این، تک‌محصولی بودن صادرات ایران، ضرورت توجه به صادرات غیرنفتی را بسیار مورد توجه صادرکنندگان و مدیران اقتصادی کشور قرار داده است. تحقیقات عمیق و اساسی درباره بازار صنعت فولاد در ایران اندک بوده و ضرورت به کارگیری و استفاده از دانش‌های نوین مطالعه بازار در ترویج استفاده از فولادها با استحکام بیشتر، بیش از پیش محسوس است. از برنامه‌های این زیرگروه می‌توان به ارائه راهکارهای مناسب در جهت شناسایی موارد کاربرد، مشتریان بالقوه، شناخت اجزا و تصمیم‌سازان مرتبط در راستای ایجاد فرصت‌های جدید، بررسی بازارهای داخلی و خارجی و شناسایی راه‌های ترغیب شرکت‌ها، کارخانه‌ها و صنایع وابسته جهت رشد و توسعه استفاده از فولادهای پراستحکام و راهکارهایی جهت حمایت از محصولات داخلی در برابر کالاهای عرضه شده توسط رقبای خارجی اشاره کرد.

۳) گروه منابع انسانی و آمار: از برنامه‌های این گروه می‌توان به بررسی و جمع‌آوری دستاوردهای دو گروه دیگر، برگزاری سمینارها و کارگاه‌ها و کمک به رشد و آموزش نیروی انسانی متخصص با همکاری در طراحی برنامه‌های درسی دانشگاه‌ها در گرایش‌های مهندسی مواد، عمران و مکانیک متناسب با نیازهای صنعت به فولادهای پراستحکام اشاره کرد. انجام فعالیت‌های آماری و تهیه گزارش‌های مستند از میزان افزایش استفاده از فولادهای پراستحکام در صنعت در نتیجه فعالیت‌های دو گروه دیگر از جمله وظایف این گروه خواهد بود.

ایجاد مرکز تحقیقاتی دانشگاهی-صنعتی مذکور قطعاً راهکاری بسیار مناسب در جهت هر چه نزدیک‌تر کردن منافع تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان و دیگر عوامل عرضه و تقاضا در سطح کشور می‌باشد. کشوری که در ناحیه خاورمیانه و خلیج‌فارس به عنوان بزرگ‌ترین تولیدکننده فولاد در بین کشورهای اسلامی و همسایگان حوزه دریای خزر رده دوم را در بین تولیدکنندگان عمده فولاد شناخته شده است [۱۹].

بحث و نتیجه‌گیری

هدف اصلی در این طرح پژوهشی، مطالعه چگونگی جایگزینی فولادهای پراستحکام به جای فولادهای معمولی در سازه‌های عمرانی و بررسی نکات مثبت و منفی احتمالی آن و تعیین حداکثر میزان نقش آن‌ها در کاهش قیمت کل فولاد مصرفی و تقلیل هزینه‌های ساخت قطعات و حمل آنها بوده است. گسترش استفاده از فولادهای پراستحکام با کارایی بیشتر، وزن و قیمت تمام‌شده کمتر و بالتبع اجرای سریع‌تر، به سهولت خواهد توانست تحولی در صنعت ساختمان در کشور ایجاد نموده و حتی نتایج آن در کشورهای در حال توسعه دیگر که شرایط فرهنگی، اقلیمی و فنی مشابه با ایران دارند نیز به کار گرفته شود. استحکام بالای فولادهای ذکر شده در این مقاله در مقایسه با فولادهای معمولی گرم نوردیده سبب کاهش قابل توجه وزن فولاد مصرفی شده و اگر چه قیمت واحد تمام شده فولادهای پراستحکام کمی بیشتر از فولادهای معمول است، لیکن از نظر اقتصادی دارای مزیت‌های قابل قبولی می‌باشد.

از دیدگاه اقتصادی، اگر چه نقطه شروع تولید و ترویج استفاده از فولادهای پراستحکام، تولید کنندگان فولاد می‌باشند اما روابط نسبتاً پیچیده‌ای در بازار محصولات فولادی وجود دارد که شناسایی، بررسی و مطالعه آن‌ها راه را برای رسیدن به هدف هموارتر خواهد کرد. دامنه زیادی از تصمیم‌سازان و



دستاندرکاران توزیع محصولات فولادی در کشور در رشد و یا زوال تولید و مصرف محصولات خاص فولادی مشارکت دارند. بررسی تصمیم‌سازان کلیدی و شناخت کامل روابط حاکم در بازار مصرف فولادهای پراستحکام، به ترویج استفاده از این‌گونه محصولات در داخل کشور و همچنین در بهبود صادرات آنها کمک شایانی خواهد کرد، زیرا در صورتی که هر کدام از تصمیم‌سازان ذیربط، با توجه به منافع شخصی و گروهی خود، متعهد به برنامه نشوند ممکن است نسبت به پذیرش آن بی‌میل بوده و در عمل از اجرای آن سر باز زنند. در راستای ترویج استفاده از فولادهای پراستحکام در سطح کشور، می‌بایست راه‌حلهایی پیشنهاد شوند که منافع اقتصادی همه گروه‌های مذکور را تامین نموده و گسترش سریع تولید و استفاده از این‌گونه فولادها را در آینده نزدیک در کشور به ثمر آورد. از دیدگاه اقتصادی، استفاده از فولادهای پراستحکام هم برای تولیدکننده و هم مصرف‌کننده صرفه اقتصادی قابل ملاحظه‌ای را در بر خواهد داشت. تولیدکننده با افزایش قیمت واحد وزن فولاد تولیدی و مصرف‌کننده با خرید وزن کمتری از فولاد، سهولت ساخت و افزایش کیفیت و خواصی مانند چقرمگی، شکل پذیری و عمر مفید سازه ساخته شده از این میان سود خواهند برد. در کل می‌توان گفت که توسعه صنعت فولاد و صنایع وابسته مستلزم حضوری فعال و رقابتی در عرصه تولید و تجارت داخلی و جهانی است. این صنعت در دنیای صنعتی و روبه پیشرفت جهانی از جایگاه استراتژیکی برخوردار بوده و ایران به عنوان یکی از کشورهای مطرح در حال توسعه که در ابتدای صنعتی شدن قرار دارند، می‌بایست با توجه بیشتری به توسعه صنعت فولاد در میان سایر صنایع داخلی بپردازد. در این راستا و برای حفظ و توسعه سهم ایران در بازار جهانی فولاد، تنوع بخشیدن به محصولات فولادی و تولید محصولات جدید، و پرداختن به تحقیق و توسعه از دیدگاههای مختلف مهندسی، مدیریتی و اقتصادی ضروری بنظر می‌رسد تا شرایط لازم برای عملی کردن دستاوردهای پژوهشی و توسعه بیشتر صنعت فولاد مهیا شود.

تشکر و قدردانی

پروژه تحقیقاتی-کاربردی "فولادهای پر استحکام" با مشارکت اساتید و محققین دانشگاه صنعتی اصفهان و کارشناسان مجتمع فولاد مبارکه طی یک پروسه زمانی چندین ماهه انجام شده است. در این راستا از حمایت‌های مالی و فنی مجتمع فولاد مبارکه تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

1. Bjorhovde, R. (2004) Development and Use of High Performance Steel, *Journal of Constructional Steel Research* **60**, 393-400.
2. اشرفی زاده، ف، ازهری، م، نصری، ا، رضایی، ح ر، میرآقایی، ش (۱۳۸۶) گزارش فاز اول پروژه فولادهای پراستحکام، مجتمع فولاد مبارکه.
3. ازهری، م، میرقادری، ر (۱۳۸۲) طراحی سازه‌های فولادی، جلد اول، انتشارات ارکان.
4. Ricker, D. T. (2000) Value Engineering for Steel Construction, *AISC J. of Modern Steel Construction*.
5. Hulka, K., High Strength Steel for Construction Engineering, <http://www.cbmm.com.br/portug/sources/techlib/info/hsconstr/hsconstr.htm>.
6. Fukumoto, Y. (1996) "New Const. Steels Structural Stability", *J. of Eng. Structures*, **18** (10), 786-791.
7. Mikia, C. (2002) High Strength and High Performance Steels and Their Use in Bridge Structures, *Journal of Constructional Steel Research* **58**, 3-20.
8. Wright, W. (1997) High-Performance Steel: Research to Practice, *US DOT - FHA*, **60** (4).
9. US DOT (2002) *High Performance Steel, Designers' Guide*, 2nd Ed., FHA, Western Resource Center, USA.
10. وزارت مسکن و شهرسازی، (۱۳۸۴) طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی، مبحث دهم از مقررات ملی ساختمان.
11. وزارت مسکن و شهرسازی، (۱۳۸۵) بارهای وارده بر ساختمان، مبحث ششم از مقررات ملی ساختمان.
12. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، (۱۳۸۵) آیین‌نامه طرح ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)، ویرایش سوم.
13. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، (۱۳۷۹) آیین‌نامه بارگذاری پل‌ها (نشریه شماره ۱۳۹)، تجدید نظر اول.
14. DIN (1998) Steels for General Structural Purposes, Quality Standard, DIN17100.
15. ASTM (2000) *Standard Specification for General Requirements for Rolled Structural Steel Bars, Plates, Shapes, and Sheet Piling*, ASTM A 6/ A 6 M-01b.
16. ASTM (2000) *Standard Specification for Low and Intermediate Tensile Strength of Carbon Steel Plates, Shapes, and Bars*, ASTM A 283 / A 283 M-01, 2000.
17. ASTM (2000) *Standard Specification for Structural Carbon Steel Plates of Improved Toughness*, ASTM A573/ A573 M-00A.
18. ASTM (2000) *Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Niobium-Vanadium Steels of Structural Quality*, ASTM A 572/ A 572 M-01
19. آقایی، ک، احمد زاده، ا، رضایی، م (۱۳۸۴) بررسی پتانسیل صادر آتی مجتمع فولاد مبارکه، سمپوزیوم فولاد ۸۴، دانشگاه صنعتی اصفهان.