

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ



دانشگاه شهید باهنر کرمان

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی عمران

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد عمران گرایش سازه

مقاوم سازی بناهای تاریخی با استفاده از FRP
(مطالعه موردی مناره‌های بنای شاه نعمت الله ولی ماهان)

استاد راهنما:

دکتر محمد جواد فدایی

مؤلف:

سعید علیزاده تقی آباد

شهریور ماه ۱۳۸۸



این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط احراز درجه کارشناسی ارشد به

گروه مهندسی عمران
دانشکده فنی و مهندسی
دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی شود.

دانشجو: سعید علیزاده تقی آباد

استاد راهنما ۱: دکتر محمد جواد فدایی

داور ۱: دکتر حامد صفاری

داور ۲: دکتر حسین ابراهیمی

معاونت پژوهشی و نماینده تحصیلات تکمیلی: دکتر حمید بازرگان

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه شهید باهنر کرمان است.

تقدیم به:

تمامی عزیزانی که دوستشان دارم،

و

برگ سبزی به

برترین استادان زندگیم؛

آنان که مرا صادقانه زیستن آموختند،

صبورانه بودن را فدایم کردند،

سوختند تا بسازم،

ساختند تا برافرازم و به پرواز درآیم،

و تمام هستیشان را به هستیم هدیه کردند.

تقدیر و تشکر

شکر ذات مقدس پروردگار را سزااست که شاکرترین بندگانش از حق شکر او عاجز و عابدترین آنان در عبادتش قاصر، شکر را تعلیم داده و بر آن ثواب عظیم مقرر فرمود. اقیانوس رحمتش را ساحلی و نعمتهایش را شماره‌ای نباشد. او که در هنگام رحمت، ارحم الراحمین و در غوغای عقوبت، اشد المعاقبین است.

حال که به لطف پروردگار این کار به انجام رسیده، بایسته می‌دانم از عزیزانی که مرا در این راه یاری نموده‌اند سپاسگزاری نمایم. از آقای دکتر محمد جواد فدایی که با فرزاندگی و روحیه خستگی ناپذیر و رهنمودهای خود، محور حمایت اینجانب در این مسیر بوده‌اند، برای عمری سپاسگزارم. صمیمانه‌ترین سپاس‌ها را به حضور تمامی کسانی که همواره از هیچ کوششی در کمک به اینجانب دریغ ننمودند، تقدیم می‌دارم.

سعید علیزاده تقی آباد

چکیده

بناهای تاریخی ایران به لحاظ فرهنگی، هنری و زیبایی شناسی از اهمیت بالایی برخوردارند. این بناها هویت فرهنگی گذشتگان را در خود حفظ کرده است و عامل تحکیم وحدت ملی نیز می‌باشند. علاوه بر این، بناهای تاریخی عامل مهمی در جهت جذب توریست و گسترش این صنعت در کشور نیز می‌باشند.

از جمله بناهای تاریخی با ارزش کشورمان بنای باشکوه شاه نعمت الله ولی ماهان در استان کرمان است، که از گنبد و دو مناره با ارتفاع ۴۱/۶ متر تشکیل شده است. استان کرمان یکی از استان‌های لرزه خیز ایران می‌باشد و زلزله‌هایی نظیر زلزله سال ۱۳۶۰ گلباف و زلزله سال ۱۳۸۲ بم را تجربه نموده است. از این جهت، با توجه به وجود گسل‌های متعدد در این منطقه و همچنین اهمیت این بنا از لحاظ تاریخی، فرهنگی و گردشگری، مقاوم‌سازی این بنا یکی از مسائل مهم و قابل توجه می‌باشد.

برای بررسی روش مقاوم‌سازی مذکور، تحلیل‌هایی بر روی مدل اجزاء محدود سازه مناره که در نرم افزار ANSYS ساخته شده است، قبل و بعد از افزودن المان کامپوزیت FRP جهت مقاوم‌سازی، انجام شده است. نتایج حاصل از این تحلیل‌ها و نیز راهکارها و پیشنهادها جهت تحقیق‌های بعدی روی این بنا در ادامه آورده شده است.

کلید واژه: بناهای تاریخی، کامپوزیت FRP، مقاوم‌سازی و مناره

و	چکیده
ز	فهرست مطالب
ک	فهرست اشکال
ن	فهرست جداول
۱	فصل اول
۲	۱-۱- اهمیت ساختمان‌های بنایی و انواع آن‌ها
۲	۱-۱-۱- انواع ساختمان‌های بنایی
۲	۱-۲- توزیع نیروی زلزله در ساختمان‌های بنایی
۳	۲-۱- انگیزه تحقیق
۳	۳-۱- اهداف و حدود پروژه
۳	۴-۱- بخش‌های مختلف پایان‌نامه
۵	فصل دوم
۶	۱-۲- مواد کامپوزیتی
۶	۱-۱-۲- تاریخچه استفاده از مواد کامپوزیتی
۷	۲-۱-۲- انواع الیاف
۷	۱-۲-۱-۲- الیاف شیشه
۱۰	۲-۲-۱-۲- الیاف کربن
۱۲	۳-۲-۱-۲- الیاف آرامید
۱۵	۳-۱-۲- ماتریس‌های مورد استفاده در مواد مرکب
۱۸	۴-۱-۲- آماده‌سازی سطح کار و نصب پلیمرهای الیافی
۱۹	۲-۲- مصالح بنایی
۱۹	۱-۲-۲- مقاومت فشاری مصالح بنایی (f_{me})
۲۴	۲-۲-۲- مدول الاستیسیته مصالح بنایی در فشار (E_{me})
۲۶	۳-۲-۲- مقاومت کششی مصالح بنایی (f_{te})
۲۹	۴-۲-۲- مقاومت برشی مصالح بنایی (v_{me})
۳۰	۵-۲-۲- مدول برشی مصالح بنایی (G_{me})
۳۰	۶-۲-۲- حداقل تعداد آزمایش‌ها
۳۱	۷-۲-۲- آزمایش‌های تکمیلی
۳۳	فصل سوم

۳۴	۱-۳- آثار تاریخی و توریسم
۳۴	۲-۳- عوامل تهدید کننده بناهای تاریخی
۳۵	۳-۳- بررسی خطرپذیری ابنیه تاریخی ایران در برابر زلزله
۳۶	۴-۳- عناصر تشکیل دهنده معماری در بناهای
۳۸	۵-۳- ساختمان تاریخی شاه نعمت ا... ولی
۳۸	۱-۵-۳- مشخصات بنای تاریخی شاه نعمت ا... ولی
۴۰	۲-۵-۳- جزئیات معماری بنای تاریخی شاه نعمت ا... ولی
۴۰	۳-۵-۳- معضلات اجرایی ساختمان بنایی شاه نعمت ا... ولی
۴۱	۴-۵-۳- اثر زمین لرزه بر ساختمان بنایی شاه نعمت ا... ولی
۴۳	فصل چهارم
۴۴	۱-۴- نرم افزار ANSYS
۴۴	۲-۴- کاربری نرم افزار المان محدود
۴۵	۳-۴- دستگاههای مختصات در نرم افزار ANSYS
۴۵	۱-۳-۴- انواع دستگاههای مختصات
۴۵	۴-۴- بارگذاری در نرم افزار ANSYS
۴۵	۱-۴-۴- گامهای بار و معادلات تکراری
۴۶	۵-۴- بررسی انواع مسائل غیرخطی در نرم افزار ANSYS
۴۷	۱-۵-۴- بررسی رفتار غیرخطی سازه‌ای ناشی از خصوصیات غیرخطی مصالح
۴۸	۲-۵-۴- بررسی رفتار غیرخطی سازه‌ای ناشی از خصوصیات غیرخطی هندسی
۴۸	۳-۵-۴- بررسی رفتار غیرخطی سازه‌ای ناشی از خصوصیت تغییر وضعیت
۴۹	۶-۴- روش حل معادلات غیرخطی در نرم افزار ANSYS
۵۰	۷-۴- روشهای حل در برنامه ANSYS
۵۱	۸-۴- مفهوم تحلیل دینامیکی
۵۱	۹-۴- تحلیل تاریخچه زمانی
۵۳	فصل پنجم
۵۴	۵- مراحل مدل سازی در نرم افزار ANSYS
۵۴	۱-۵- انتخاب سیستم آحاد مناسب
۵۴	۲-۵- انتخاب نوع المان

۵۴	المان Solid65	۱-۲-۵-
۵۶	المان Solid46	۲-۲-۵-
۵۷	تعیین ثوابت حقیقی	۳-۵-
۵۷	تعریف خصوصیات و رفتار مکانیکی مواد	۴-۵-
۵۸	مدل رفتاری مصالح بنایی	۱-۴-۵-
۵۹	داده‌های ورودی مدل اجزاء محدود برای مصالح بنایی	۱-۱-۴-۵-
۶۰	معیار گسیختگی مصالح بنایی	۲-۱-۴-۵-
۶۱	مدل رفتاری FRP	۲-۴-۵-
۶۱	داده‌های ورودی مدل اجزاء محدود برای مصالح FRP	۱-۲-۴-۵-
۶۱	اختصاص دادن معیار شکست FRP	۲-۲-۴-۵-
۶۲	ایجاد هندسه سازه	۵-۵-
۶۳	مش‌بندی احجام موجود	۶-۵-
۶۴	آنالیز (تحلیل)	۷-۵-
۶۴	آنالیز تاریخچه زمانی	۱-۷-۵-
۶۷	فصل ششم	
۶۸	نتایج تحلیل تاریخچه زمانی زلزله بم	۱-۶-
۶۸	زلزله بم	۱-۱-۶-
۶۹	تنش اصلی در جهت یک در ثانیه ۱۱/۵ زلزله بم	۲-۱-۶-
۷۰	تنش برشی در جهت یک در ثانیه ۱۱/۵ زلزله بم	۳-۱-۶-
۷۱	تنش قائم در جهت یک در ثانیه ۱۱/۵ زلزله بم	۴-۱-۶-
۷۲	ترک خوردگی مناره در ثانیه ۱۱/۵ زلزله بم	۵-۱-۶-
۷۴	نتایج تحلیل تاریخچه زمانی زلزله طبس	۲-۶-
۷۴	زلزله طبس	۱-۲-۶-
۷۵	تنش اصلی در جهت یک در ثانیه ۴/۸ زلزله طبس	۲-۲-۶-
۷۶	تنش برشی در ثانیه ۴/۸ زلزله طبس	۳-۲-۶-
۷۸	تنش قائم در ثانیه ۴/۸ زلزله طبس	۴-۲-۶-
۷۹	ترک خوردگی مناره در ثانیه ۴/۸ زلزله طبس	۵-۲-۶-
۸۲	نتایج تحلیل تاریخچه زمانی زلزله زرنند	۳-۶-

۸۲	زلزله زرند	۱-۳-۶
۸۳	تنش اصلی در جهت یک در ثانیه ۱ زلزله زرند	۲-۳-۶
۸۴	تنش برشی در ثانیه ۱ زلزله زرند	۳-۳-۶
۸۵	تنش قائم در ثانیه ۱ زلزله زرند	۴-۳-۶
۸۶	ترک خوردگی در ثانیه ۱ زلزله زرند	۵-۳-۶
۸۸	تحلیل پایداری مناره تحت زلزله طبس	۴-۶
۹۰	فصل هفتم	
۹۱	۱-۷ نتیجه گیری	
۹۱	۲-۷ پیشنهادهایی برای کارهای آینده	
۹۲	مراجع	
۹۵	پیوست	

فصل دوم

- شکل (۱-۲): منحنی‌های تنش - کرنش برخی از الیاف‌های تقویت کننده ۸
- شکل (۲-۲): اثر قطر الیاف روی استحکام ۹
- شکل (۳-۲): رفتار تنش - کرنش الیاف آرامید در حالت‌های کششی و فشاری ۱۴
- شکل (۴-۲): آزمایش تنش فشاری مصالح بر روی نمونه ۲۱
- شکل (۵-۲): نحوه ایجاد شکاف دایروی و مستطیلی ۲۲
- شکل (۶-۲): نمایی از یک جک مسطح ۲۲
- شکل (۷-۲): نحوه نصب جک و وسایل اندازه‌گیری ۲۵
- شکل (۸-۲): نمونه تحت آزمایش به روش قید چرخشی ۲۷
- شکل (۹-۲): نحوه بارگذاری نقطه‌ای برای تعیین مقاومت کششی ۲۸
- شکل (۱۰-۲): آزمایش فشار قطری ۳۱

فصل سوم

- شکل (۱-۳): نمای مناره‌های بنای شاه نعمت‌الله ولی ۳۸
- شکل (۲-۳): مناره‌های بنای شاه نعمت‌الله ولی ۳۹

فصل چهارم

- شکل (۱-۴): مفاهیم گام بار، زیرگام و زمان ۴۶
- شکل (۲-۴): روش تقریب طول کمان ۵۰
- شکل (۳-۴): روش نیوتن-رافسون ۵۰

فصل پنجم

- شکل (۱-۵): هندسه، موقعیت گرهها و دستگاه مختصات جزء Solid65 ۵۵
- شکل (۲-۵): هندسه، موقعیت گرهها و دستگاه مختصات جزء Solid46 ۵۷
- شکل (۳-۵): مدل رفتاری مصالح بنایی ۵۸
- شکل (۴-۵): سطوح شکست سه بعدی مصالح بنایی ۶۰
- شکل (۵-۵): مدل هندسی ساخته شده در AutoCAD ۶۲
- شکل (۶-۵): مش بندی سازه مناره ۶۳
- شکل (۷-۵): مش بندی المان FRP ۶۴
- شکل (۸-۵): منحنی زلزله بم بر حسب تغییر مکان-زمان ۶۵
- شکل (۹-۵): منحنی زلزله طیس بر حسب تغییر مکان-زمان ۶۶
- شکل (۱۰-۵): منحنی زلزله زرند بر حسب تغییر مکان-زمان ۶۶

فصل ششم

- شکل (۱-۶): زلزله بم بر حسب تغییر مکان زمان خروجی از SeismoSignal ۶۸
- شکل (۲-۶): زلزله بم اعمال شده به تکیه گاه سازه ۶۸
- شکل (۳-۶): تنش اصلی جهت یک در ثانیه ۱۱/۵ قبل از مقاوم سازی ۶۹
- شکل (۴-۶): تنش اصلی جهت یک در ثانیه ۱۱/۵ بعد از مقاوم سازی ۶۹
- شکل (۵-۶): تنش برشی در ثانیه ۱۱/۵ قبل از مقاوم سازی ۷۰
- شکل (۶-۶): تنش برشی در ثانیه ۱۱/۵ بعد از مقاوم سازی ۷۰
- شکل (۷-۶): تنش قائم در ثانیه ۱۱/۵ قبل از مقاوم سازی ۷۱
- شکل (۸-۶): تنش قائم در ثانیه ۱۱/۵ بعد از مقاوم سازی ۷۱
- شکل (۹-۶): شروع ترک خوردگی مناره در ثانیه ۱۱/۵ قبل از مقاوم سازی ۷۲
- شکل (۱۰-۶): شروع ترک خوردگی مناره در ثانیه ۱۱/۵ بعد از مقاوم سازی ۷۲
- شکل (۱۱-۶): زلزله طبس بر حسب تغییر مکان زمان خروجی از SeismoSignal ۷۴
- شکل (۱۲-۶): زلزله طبس اعمال شده به تکیه گاه سازه ۷۴
- شکل (۱۳-۶): تنش اصلی جهت یک در ثانیه ۴/۸ قبل از مقاوم سازی ۷۵
- شکل (۱۴-۶): تنش اصلی جهت یک در ثانیه ۴/۸ بعد از مقاوم سازی با دو لایه FRP ۷۵
- شکل (۱۵-۶): تنش اصلی جهت یک در ثانیه ۴/۸ بعد از مقاوم سازی با چهار لایه FRP ۷۶
- شکل (۱۶-۶): تنش برشی در ثانیه ۴/۸ قبل از مقاوم سازی ۷۶
- شکل (۱۷-۶): تنش برشی در ثانیه ۴/۸ بعد از مقاوم سازی با دو لایه FRP ۷۷
- شکل (۱۸-۶): تنش برشی در ثانیه ۴/۸ بعد از مقاوم سازی با چهار لایه FRP ۷۷
- شکل (۱۹-۶): تنش قائم در ثانیه ۴/۸ قبل از مقاوم سازی ۷۸
- شکل (۲۰-۶): تنش قائم در ثانیه ۴/۸ بعد از مقاوم سازی با دو لایه FRP ۷۸
- شکل (۲۱-۶): تنش قائم در ثانیه ۴/۸ بعد از مقاوم سازی با چهار لایه FRP ۷۹
- شکل (۲۲-۶): ترک خوردگی مناره در ثانیه ۴/۸ قبل از مقاوم سازی ۷۹
- شکل (۲۳-۶): ترک خوردگی مناره در ثانیه ۴/۸ بعد از مقاوم سازی با دو لایه FRP ۸۰
- شکل (۲۴-۶): ترک خوردگی مناره در ثانیه ۴/۸ بعد از مقاوم سازی با چهار لایه FRP ۸۰
- شکل (۲۵-۶): زلزله زرنند بر حسب تغییر مکان زمان خروجی از SeismoSignal ۸۲
- شکل (۲۶-۶): زلزله زرنند اعمال شده به تکیه گاه سازه ۸۲
- شکل (۲۷-۶): تنش اصلی جهت یک در ثانیه ۱ قبل از مقاوم سازی ۸۳

- شکل (۶-۲۸): تنش اصلی جهت یک در ثانیه ۱ بعد از مقاوم‌سازی ۸۳
- شکل (۶-۲۹): تنش برشی در ثانیه ۱ قبل از مقاوم‌سازی ۸۴
- شکل (۶-۳۰): تنش برشی در ثانیه ۱ بعد از مقاوم‌سازی ۸۴
- شکل (۶-۳۱): تنش قائم در ثانیه ۱ قبل از مقاوم‌سازی ۸۵
- شکل (۶-۳۲): تنش قائم در ثانیه ۱ بعد از مقاوم‌سازی ۸۵
- شکل (۶-۳۳): ترک خوردگی مناره در ثانیه ۱ قبل از مقاوم‌سازی ۸۶
- شکل (۶-۳۴): ترک خوردگی مناره در ثانیه ۱ بعد از مقاوم‌سازی ۸۶
- شکل (۶-۳۵): تغییر مکان نوک مناره تا قبل از واگرایی حل (ثانیه ۴/۸) قبل از مقاوم‌سازی ۸۸
- شکل (۶-۳۶): تغییر مکان نوک مناره تا قبل از واگرایی حل (ثانیه ۸/۲) بعد از مقاوم‌سازی ۸۹

فصل دوم

- ۷ جدول (۱-۲): خواص مکانیکی مهمترین الیاف تقویت کننده و مواد دیگر
- ۱۰ جدول (۲-۲): ترکیب درصد و خواص مکانیکی انواع مختلف الیاف شیشه
- ۱۲ جدول (۳-۲): خواص چند نمونه الیاف کربن تجاری
- ۱۴ جدول (۴-۲): خواص الیاف آرامید
- ۱۹ جدول (۵-۲): ضرایب تبدیل کرانه پایین مشخصات به مشخصات مورد انتظار

فصل پنجم

- ۵۴ جدول (۱-۵): واحدهای سیستم MKS در نرم افزار
- ۵۹ جدول (۲-۵): مشخصات مصالح بنایی در نظر گرفته شده در مدل
- ۶۱ جدول (۳-۵): مشخصات مواد مرکب
- ۶۵ جدول (۴-۵): پارامترهای ضریب زلزله

فصل ششم

- ۷۳ جدول (۱-۶): تنش های قبل و بعد از مقاوم سازی زلزله بم در ثانیه ۱۱/۵
- ۸۱ جدول (۲-۶): تنش های قبل و بعد از مقاوم سازی زلزله طبس در ثانیه ۴/۸
- ۸۷ جدول (۳-۶): تنش های قبل و بعد از مقاوم سازی زلزله زرنند در ثانیه ۱

فصل اول:

دین

۱-۱- اهمیت ساختمان‌های بنایی و انواع آن‌ها

در حال حاضر ساختمان‌های ساخته شده با مصالح بنایی (بخصوص ساختمان‌های آجری)، درصد بالایی از ساختمان‌های موجود یا در حال احداث در کشور ما را تشکیل می‌دهند مهم‌ترین عامل مقبولیت ساختمان‌های بنایی در ایران، بویژه در شهرستان‌ها در دسترس بودن مصالح، ساده بودن تکنولوژی تولید آجر و بلوک بنایی، آشنایی سازندگان با نحوه ساخت و ساز با مصالح بنایی و سرانجام ارزان‌تر بودن قیمت تمام شده این قبیل ساختمان‌ها نسبت به ساختمان‌های با اسکلت فولادی و بتن مسلح می‌باشد.

۱-۱-۱- انواع ساختمان‌های بنایی

۱. ساختمان‌های مصالح بنایی سنتی: ساختمان‌هایی هستند که بدون انجام محاسبات مهندسی ساخته شده‌اند و عناصر مقاوم لرزه‌ای خاصی نداشته و عموماً به واسطه شکل نامناسب سازه‌ای، ضعف مصالح و نحوه اجرای نامناسب در برابر زلزله ضعیف عمل می‌کنند.

۲. ساختمان‌های مصالح بنایی کلاف‌دار: این ساختمان‌ها نیز بدون انجام محاسبات مهندسی ساخته می‌شوند ولی در اجرای آن‌ها برخی اصول طراحی مقاوم لرزه‌ای رعایت می‌شود در نتیجه رفتار آن‌ها در برابر زلزله از ساختمان‌های مصالح بنایی سنتی بهتر است. مبنای اجرای آن‌ها ضوابط آیین نامه ۲۸۰۰ می‌باشد، [۱].

۱-۱-۲- توزیع نیروی زلزله در ساختمان‌های بنایی

نیروهای لختی که در نتیجه شتاب پی (ناشی از حرکت زمین به هنگام زلزله) در ساختمان پدید می‌آید باید به پی و از آن‌جا به زمین منتقل شوند. دیوارهای ساختمان‌های بنایی به دو دسته تقسیم می‌شوند:

۱. دیوارهایی که عمود بر جهت حرکت پی هستند (دیوارهای عرضی) که نیروهای آن‌ها بخشی به سقفی و بخشی به زمین منتقل می‌شود.

۲. دیوارهایی که در جهت حرکت پی هستند (دیوارهای برشی) که بقیه نیروها تحمل می‌کنند و سقف‌ها نیروهای حاصل از زلزله و دیوارها عرضی را به دیوارهای برشی منتقل می‌کنند.

اصلی‌ترین عنصر لرزه‌بر هر ساختمان آجری دیوارهای برشی هستند که باید بار افقی حاصل از کلیه اجزاء دیگر را به زمین منتقل کنند. علاوه بر این سقف باید از یکپارچگی لازم برای انتقال نیروهای خود و نیز نیروهایی که از بخش‌های دیگر دریافت می‌کند، به دیوارهای برشی برخوردار باشد، [۲].

۲-۱- انگیزه تحقیق

پاسداری از میراث فرهنگی گذشتگان در قالب حفظ مصالح و ظاهر معماری بناهای تاریخی در یک پروژه مقاوم‌سازی عامل ارزیابی روش بکار گرفته شده می‌باشد. در کنار این عوامل توانایی روش مقاوم‌سازی مربوطه در حفظ بنا برای آیندگان نیز عامل ارزشی عمده‌ای به حساب می‌آید.

در زمینه مقاوم‌سازی بناهای تاریخی در برابر زلزله در سطح کشور کار انسجام یافته و تصمیمات سازماندهی شده‌ای صورت نگرفته است و طرح‌های حفظ بناهای تاریخی بیشتر جنبه مرمت داشته است. این روند به جهت حفظ بناهای تاریخی چندان منطقی و معقول بنظر نمی‌رسد چرا که مرمت یک بنای تاریخی زمانی معنا پیدا می‌کند که از تمامی عوامل موثر در حفظ بنای مزبور در آینده مد نظر قرار گرفته باشند. نمونه‌های زیادی وجود دارد با وجود مرمت‌هایی که روی بنا صورت گرفته بود آسیب‌های جبران ناپذیری را محتمل گردید.

با توجه به مطالب فوق، نگرشی منطبق با اصول علمی و مهندسی در زمینه حفظ بناهای تاریخی ایران در برابر زلزله ضروری به نظر می‌رسد.

۳-۱- اهداف و حدود پروژه

هدف از انجام این پروژه ارزیابی مقاوم‌سازی مناره‌های بنای تاریخی مقبره شاه نعمت الله ولی در شهر ماهان در استان کرمان با استفاده از مصالح FRP می‌باشد که برای انجام آن سازه مناره قبل و بعد از مقاوم‌سازی با استفاده از مدل‌سازی اجزاء محدود به کمک نرم‌افزار ANSYS انجام می‌شود، با توجه به نتایج مقاوم‌سازی، نسبت به ارائه و اجرای طرح مذکور اقدام شود.

۴-۱- بخش‌های مختلف پایان‌نامه

پایان‌نامه پیش رو از ۷ فصل تشکیل شده است که در هر فصل مطالب زیر آورده شده است:

فصل اول- شامل مقدمه‌ای بر کار پایان‌نامه می‌باشد،

فصل دوم- شامل معرفی مصالح می‌باشد که از دو قسمت مصالح بنایی و مواد کامپوزیت FRP تشکیل شده است،

فصل سوم- شامل مطالبی در اهمیت آثار تاریخی و نیز معرفی بنای شاه نعمت الله ولی می‌باشد،

فصل چهارم- شامل مقدمه بر روش اجزاء محدود و تحلیل‌های دینامیکی نرم‌افزار ANSYS می‌باشد،

فصل پنجم- شامل نحوه مدل‌سازی و مقاوم‌سازی مناره‌های بنای شاه نعمت الله ولی می‌باشد،

فصل ششم - شامل نتایج حاصل از مدل‌سازی و مقاوم‌سازی می‌باشد،
فصل هفتم - شامل نتیجه‌گیری از تحقیق انجام شده و پیشنهادهایی جهت تحقیق‌های آتی در
ادامه تحقیق حاضر می‌باشد.

فصل دوم:

خصوصیات مواد کامپوزیتی

و مصالح بنایی

۲-۱- مواد کامپوزیتی

مواد مرکب موادی هستند که از چندین ماده در کنار یکدیگر تشکیل می‌شوند و هر کدام از آن‌ها وظیفه جداگانه‌ای را ایفا می‌کنند. مواد کامپوزیتی از جمله مواد مهندسی و ساختمانی جدیدی هستند که در توسعه و کاربرد آن‌ها متخصصان فراوانی از رشته‌های مختلف مانند: متالوژی، سرامیک، پلیمر، علوم مهندسی مواد، شیمی، مهندسی شیمی، مکانیک جامدات، مکانیک شکست مواد و غیره سهم بسزایی داشته‌اند.

۲-۱-۱- تاریخچه استفاده از مواد کامپوزیتی

با بسط و توسعه شیمی آلی در سال ۱۸۴۷، برزیلوس^۱ شیمیدان سوئدی اولین رزین‌ها را تهیه نمود و در سال ۱۹۰۹ توسط کبالت رزینی دیگر ساخته شد. در سال ۱۹۳۰ دانشمندان به فکر استفاده از مواد تقویت کننده افتاده و مفهوم جدید مواد مرکب را پایه‌گذاری کردند. در سال ۱۹۴۲ پلی استر تقویت شده با الیاف شیشه، در سال ۱۹۴۶ مواد مرکب رزین اپوکسی، در سال ۱۹۶۴ پلاستیک‌های تقویت شده با الیاف کربن و شیشه و در سال ۱۹۷۵ مواد مرکبی از الیاف آرامید- گرافیت ساخته شده است، [۳].

در حال حاضر نیز علاوه بر پیشرفت‌های جدید و ساخت مواد مرکب متنوع، این مواد کاربردهای وسیعی در صنعت پیدا نموده و تدریجاً جایگزین مواد قدیمی شده‌اند. در مواد کامپوزیتی عموماً سه ناحیه متمایز، شامل فاز پیوسته (ماتریس)، فاز ناپیوسته (تقویت کننده) و لایه مرزی بین این دو فاز وجود دارد که تعیین کننده خواص و مشخصه‌های ماده مرکب می‌باشد. الیاف، نقش اصلی در مقاومت و مشخصات مکانیکی ماده مرکب دارد و ماتریس، نقش توزیع بار بین الیاف و محافظت آن در برابر عوامل محیطی دارد.

عوامل اصلی مؤثر در خواص فیزیکی کامپوزیت‌های FRP عبارتند از:

۱. خواص مکانیکی الیاف
۲. آرایش الیاف
۳. طول الیاف
۴. شکل الیاف
۵. درصد ترکیب الیاف
۶. جنس الیاف
۷. خواص مکانیکی ماتریس پلیمری

¹ Brasilluss

۸. چسبندگی و پیوند الیاف و ماتریس

۲-۱-۲- انواع الیاف

مهمترین الیاف مورد استفاده در صنعت عبارتند از:

۱. الیاف شیشه

۲. الیاف کربن

۳. الیاف آرامید

به منظور انجام مقایسه، خواص مکانیکی مهمترین الیاف تقویت کننده، در جدول (۱-۲) ارائه شده است. در یک ماده مرکب با توجه به خواص مورد نیاز می توان از چند نوع الیاف نیز استفاده کرد که به آنها مواد مرکب مخلوط (Hybrid) گویند، [۳].

جدول (۱-۲): خواص مکانیکی مهمترین الیاف تقویت کننده و مواد دیگر [۴]

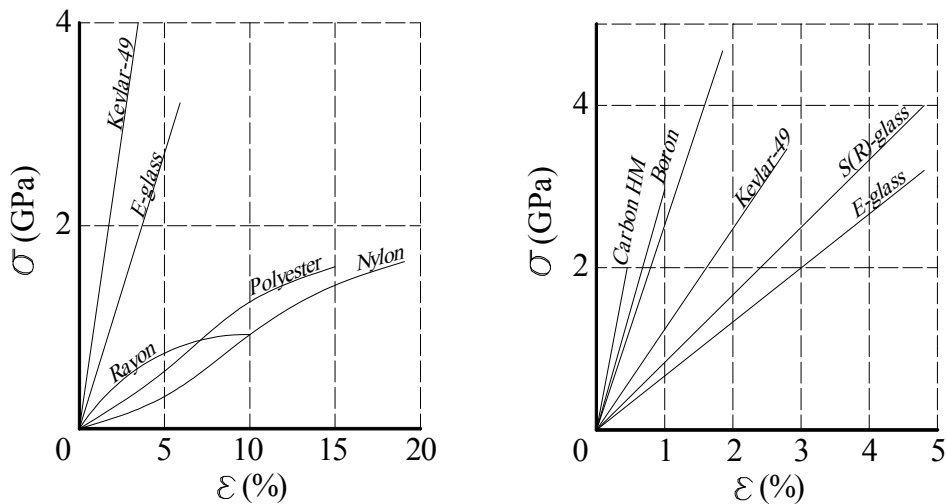
نوع مواد	دانسیته نسبی	مدول یانگ GPa	استحکام کششی GPa	کرنش در شکست %	قطر الیاف μm
الیاف شیشه:					
نوع E	۳/۵۵	۷۴	۱/۵-۳	۱/۸-۳/۲	۲/۸
نوع S	۳/۵	۸۷	۳/۵	۴/۰	۱۱
نوع R	۳/۴۹	۸۶	۴/۰	۵/۴	
الیاف کربن:					
نوع استحکام بالا	۱/۸	۲۲۰-۲۴۰	۳/۰-۳/۳	۱/۳-۱/۴	۷
نوع کارایی بالا	۱/۸	۲۲۰-۲۴۰	۳/۳-۳/۶	۱/۴-۱/۵	۷
نوع کرنش بالا	۱/۸	۲۲۰-۲۴۰	۳/۷	۱/۵-۱/۷	۷
الیاف آرامید:					
مدول بالا	۱/۴۷	۱۸۰	۲/۴۵	۱/۹	۱۲
مدول متوسط	۱/۴۶	۱۲۸	۲/۶۵	۲/۴	۱۲
مواد غیر لیفی (Bolk):					
آهن	۷/۸	۲۱۰	۰/۳۴-۲/۱	-	-
آلیاژ آلومینیوم	۲/۷	۷۰	۰/۱۴-۰/۶۲	-	-
رزین ها:					
فنلیک	۱/۴	۷/۰	-	۰/۵	-
اپوکسی	۱/۲	۲/۰-۳/۵	۰/۰۵-۰/۰۹	۱/۵-۶/۰	-
پلی استر	۱/۴	۲/۰-۳/۰	۰/۰۴-۰/۰۸۵	۱/۰-۲/۰	-

۲-۱-۲-۱- الیاف شیشه

الیاف شیشه رایج ترین و پرمصرف ترین نوع الیاف مورد استفاده در صنعت کامپوزیت است. برحسب نوع و ترکیب مواد بکار رفته در تهیه آنها، الیاف شیشه به انواع گوناگون تقسیم بندی می شوند. مزایا و معایب الیاف شیشه در مقایسه با الیاف دیگر به شرح زیر است، [۳]:

مزایا: قیمت پایین، استحکام کششی بالا، مقاومت شیمیایی بالا، خواص عایقی بالا (حرارتی و الکتریکی).

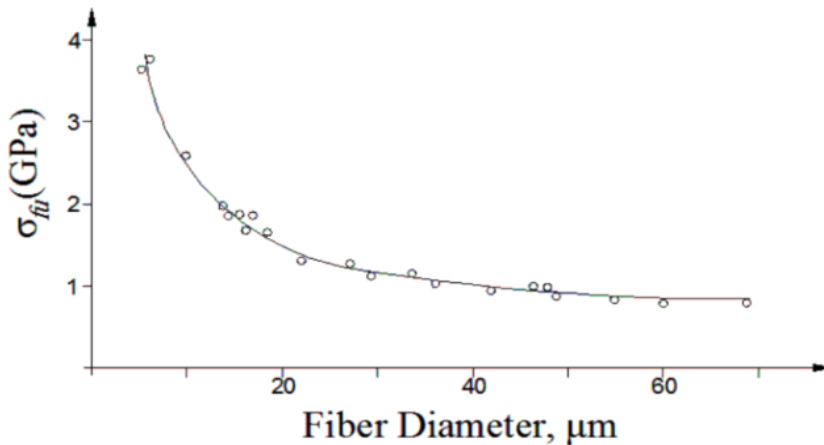
معایب: مدول کششی پایین، وزن مخصوص نسبتا بالا، حساسیت به سایش در حین حمل و نقل، مقاومت خستگی پایین، شکننده بودن، سختی بالا (سایش قالب‌ها و کندی ابزار برش).



شکل (۱-۲): منحنی‌های تنش- کرنش برخی از الیاف‌های تقویت کننده [۴]

همانطور که در شکل (۱-۲) نشان می‌دهد الیاف پلی استر در مقایسه با الیاف شیشه دارای مدول پائینی می‌باشد، ولی ازدیاد طول در نقطه شکست آن‌ها بالاست، از این رو شکل‌پذیری کامپوزیت یکی از مشخصه‌های مهم آن‌ها به شمار می‌رود، [۳].

نکته قابل توجه در مورد رشته الیاف تشکیل شده از الیاف با قطر کم آن است که در صورت ظهور پدیده شکست به جهت رشد ترک‌ها که می‌تواند ناشی از وجود ترک‌های ریز یا نقص‌های سطحی موجود بر سطح لیف باشد، تنها الیاف منفرد می‌شکند و از شکست کامل رشته الیاف جلوگیری به عمل می‌آید، بنابراین یک رشته الیاف دارای استحکام شکست بیشتر نسبت به یک لیف با قطر کلی مشابه آن می‌باشد زیرا در یک لیف ضخیم رشد یک ترک، به خاطر نقص‌های سطحی منجر به شکست کامل آن می‌گردد.



شکل (۲-۲): اثر قطر الیاف روی استحکام [۴]

انواع مختلف الیاف شیشه

ترکیب درصد و خواص مکانیکی انواع مختلف الیاف شیشه در جدول نشان داده شده است. حروف معرف هر نوع لیف (E، S و غیره) از واژه‌ای که بیانگر خصوصیت آن لیف است اقتباس شده است، [۳]:

A اشاره به Soda-Lime Glass دارد و همان شیشه معمولی است که در گذشته متداول بوده اما امروزه تقریباً الیاف نوع E جایگزین آن شده است. C از واژه Chemical گرفته شده است و الیافی هستند که مقاومت شیمیایی خوبی را از خود نشان می‌دهند.

D از واژه Dielectric گرفته شده است و این الیاف خواص الکتریکی خوبی از خود نشان می‌دهند.

M از واژه Modulus گرفته شده است و الیافی هستند که مدول بالایی دارند.

S اشاره به High Strength دارد و این الیاف بالاترین استحکام را دارا می‌باشند. بگونه‌ای که استحکام آن ۲۰٪ از نوع E بیشتر است اما قیمت آن ۴ برابر الیاف E است.

عوامل مؤثر بر استحکام الیاف شیشه

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که خواص الیاف شیشه علاوه بر مواد به کار رفته در ساختار آن‌ها به عوامل دیگری مانند شرایط محیطی و غیره نیز وابسته است. خلاصه نتایج پاره‌ای از بررسی‌ها عبارتند از:

۱. سرعت اعمال بار: استحکام الیاف با افزایش سرعت کشش اعمال شده در حین آزمایش

کشش، افزایش می‌یابد.

۲. دما: استحکام الیاف با افزایش دما کاهش می‌یابد.

۳. رطوبت: استحکام الیاف با افزایش رطوبت کاهش می‌یابد.

اگر چه مقاومت کششی الیاف شیشه در مراحل اولیه تولید، بالاتر از 3450 MPa است اما صدمات سطحی ناشی از سایش الیاف بر یکدیگر و یا سایش الیاف با تجهیزات موجود در فرآیند تولید، مقدار واقعی استحکام را به حدود $172-276 \text{ MPa}$ کاهش می‌دهد.

جدول (۲-۲): ترکیب درصد و خواص مکانیکی انواع مختلف الیاف شیشه [۴]

الیاف شیشه نوع						نوع الیاف	خاصیت
S	M	E	D	C	A		
شیمیایی							
۶۴/۳-۶۵	۵۳/۷	۵۲-۵۶	۷۴/۵	۶۰-۶۵	۷۲/۰-۷۲/۵	SiO_2	
۲۴/۸-۲۵	-	۱۲-۱۶	۰/۳	۴-۶	۰/۶-۱/۵	Al_2O_3	
۰-۰/۲	۰/۵	۰/۰۵-۰/۴	-	۰/۴	-	Fe_2O_3	
۰/۰۱	۱۲/۹	۱۶-۲۵	۰/۵	۱۳-۱۶	۹-۱۰	CaO	
۱۰-۱۰/۳	۹	۰-۶	-	۳-۴	۲/۵-۳/۵	MgO	
-	۳	۸-۱۳	۲۲	۲-۷	-	B_2O_3	
۰-۰/۲۷	-	۰-۱	۱	۷/۵-۱۲	۱۳-۱۴/۲	Na_2O	
-	۲	-	۰-۱/۳	۰-۲	-	K_2O	
-	۷/۹-۸	۰-۰/۴	-	-	-	TiO_2	
-	۸	-	۰/۱	۰/۱	۰/۷	SO_3	
-	-	۰-۰/۵	-	-	-	F_2	
فیزیکی و مکانیکی							
۲/۴۸-۲/۴۹	۲/۸۹	۲/۵۴-۲/۵۵	۲/۱۶	۲/۴۹	۲/۵	دانسیته	
۴۶۰۰	۳۵۰۰	۳۵۰۰	۲۴۱۴	۲۷۵۸	۲۴۱۴	استحکام کششی MPa	
۸۴-۸۸	۱۱۰	۷۲/۴-۷۶	۵۱/۷	۷۰	۷۲/۵	مدول کششی MPa	
۴/۵۳-۴/۶	-	۵/۸۶-۶/۶	۳/۵۶-۳/۶۲	۶/۲۴-۶/۳	۶/۹	ثابت دی الکتریک 21°C و 10^6 Hz	

۲-۲-۱-۲- الیاف کربن

کربن عنصری با دانسیته $22,7 \text{ KKN/m}^3$ است و شکل‌های مختلف بلوری دارد. الیاف کربن الیافی به مراتب نازکتر از موی انسان بوده و دارای قطری بین $6-10$ میکرومتر می‌باشد. در حال حاضر شرکت‌های متعددی الیاف کربن را تولید می‌کنند بطوری که میزان تولید جهانی آن بیش از 20000 تن در سال می‌باشد. استفاده از این الیاف نیز در حال افزایش است.

مزایای اصلی الیاف کربن عبارتند از:

۱. نسبت بسیار زیاد استحکام به وزن
۲. نسبت بالای مدول کششی به وزن
۳. استحکام بالای خستگی
۴. ضریب انبساط حرارتی بسیار پایین
۵. مقاومت بالا در برابر خوردگی

معایب الیاف کربن:

۱. شکننده بودن
۲. هادی الکتریکی
۳. کرنش کم در شکست
۴. قیمت بالا

الیاف کربن از نظر خواص فیزیکی و مکانیکی رفتاری ناهمسان از خود نشان می‌دهند. به همین جهت مدول آن‌ها در جهت صفحات اصلی حدود 1000 GPa و در جهت عمود بر این صفحات حدود 30 GPa می‌باشد. لذا جهت‌دهی صفحات اصلی در جهت محور طولی الیاف باعث تولید الیافی با مدول بالا می‌شود که با توجه به دانسیته کم این مواد (حدود 20 KN/m^3) در نهایت الیافی با مدول ویژه بسیار بالا حاصل می‌گردد.

رطوبت هوا، حلال‌ها، بازها و اسیدهای ضعیف در دمای محیط تأثیری بر روی الیاف کربن ندارد، اما در دمای بالا مانند $350-450$ درجه سانتیگراد امکان انجام اکسیداسیون می‌تواند مشکل آفرین باشد.

الیاف تجاری که از PAN تهیه شده‌اند چنانچه مدول آن‌ها کمتر از 300 GPa باشد بالاترین کرنش تا شکست را دارا می‌باشند. با توجه به شکننده بودن کامپوزیت‌ها، استفاده از الیاف با کرنش زیاد در هنگام شکست، بسیار حائز اهمیت است. لذا در کاربردهای حساس توصیه می‌شود که از الیاف کربن بر پایه PAN که حدود ۲ درصد کرنش در شکست دارد استفاده شود. مزیت عمده الیاف کربن بر پایه قیر، مدول بسیار بالای آن‌ها است لذا در کاربردهایی که به مدول بالا نیاز است مورد استفاده قرار می‌گیرند، [۳].

بهینه کردن فرآیند تولید در طول دهه‌های گذشته منجر به بهبود فراوان در استحکام و در کرنش تا شکست الیاف کربن شده است. در حال حاضر گونه‌های مختلفی از الیاف کربن در بازارهای جهانی وجود دارد که به طور عمده شامل: الیاف با مدول بالا (HM)، الیاف با استحکام

بالا (HS) و الیاف با مدول در حد میانی (IM) می‌باشد. در جدول (۲-۳) خواص چند نمونه الیاف کربن نشان داده شده است.

جدول (۲-۳): خواص چند نمونه الیاف کربن تجاری [۴]

نوع الیاف	دانسیته g/cm ³	مدول یانگ GPa	استحکام کششی MPa	کرنش در شکست %
راین استاندارد	۱/۶۰	۴۰۰	۵۰۰۰	۱/۲۵
راین HM	۱/۸۲	۵۱۷	-	-
پن HS	۱/۸۰	۲۳۰	۴۵۰۰	۲/۰
پن IM	۱/۷۶	۲۹۰	۳۱۰۰	۱/۱
پن HM	۱/۸۶	۳۸۰	۲۷۰۰	۰/۷
قیر P-25W	۱/۹۰	۱۶۰	۱۴۰۰	۰/۹
قیر P-75S	۲/۰۰	۵۲۰	۲۱۰۰	۰/۴
قیر P-120S	۲/۱۸	۸۲۷	۲۲۰۰	۰/۳

۲-۱-۲-۳- الیاف آرامید

پلیمرهای آرامیدی با خصوصیتی چون نقطه ذوب بالا، پایداری حرارتی عالی، مقاومت در برابر شعله، غیرقابل حل بودن در بسیاری از حلال‌های آلی شناخته شده‌اند. انواع آن‌ها دارای دانسیته‌ای بین ۱۲-۱۴،۶ KN/m³ می‌باشد.

به دلایل تکنولوژیک و اقتصادی تاکنون تعداد کمی از الیاف آرامید به تولید تجاری رسیده‌اند. از بعد تکنیکی، مهمترین عامل میزان خواص لیف است که به وسیله پارامترهایی چون نوع پلیمر مصرفی، جرم ملکولی پلیمر، روش تولید لیف و غیره کنترل می‌شود. از بعد اقتصادی نیز مسائلی چون تهیه منومر^۲، مخارج سرمایه‌گذاری برای تولید و غیره مطرح است. در حال حاضر مهمترین الیاف آرامیدی که به صورت تجاری در دسترس هستند کولار از شرکت دوپونت آمریکا، وارلون از شرکت آکزیوی هلند و تکنورا از شرکت تژین ژاپن و آرموس از روسیه هستند که معروف‌ترین آن‌ها کولار می‌باشد، [۳].

² Monomer

خواص الیاف آرامید

مهمترین خواص الیاف آرامید عبارتند از:

۱. نسبت استحکام و مدول به وزن بسیار عالی
۲. مقاومت در مقابل ضربه
۳. مقاومت بسیار عالی در مقابل شکست ناشی از خزش
۴. مقاومت خستگی خوب
۵. عدم حساسیت به شکاف یا ترک
۶. مقاومت بالا در مقابل حلال‌های آلی، مواد سوختی و نرم کننده‌ها
۷. مقاومت خوب در مقابل اسیدها و بازها
۸. خواص خوب اتلاف انرژی ارتعاشی
۹. خواص دی‌الکتریک عالی نسبت به شیشه
۱۰. خواص خود خاموش کنی با نشر دود کم
۱۱. امکان استفاده مداوم تا دمای حدود ۱۸۰ درجه سانتیگراد

مقاومت کششی الیاف کولار ۱/۵ برابر مقاومت کششی الیاف شیشه است. دو نوع از الیاف آرامید تحت نام‌های تجاری کولار ۲۹ و کولار ۴۹ توسط شرکت دوپنت به بازار عرضه گردیده است. کولار ۲۹ تقریباً مدولی نصف کولار ۴۹ اما ازدیاد طولی دو برابر آن دارد و برای کاربردهایی مناسب است که مقاومت ضربه بسیار بالایی مورد نیاز است. خواص مکانیکی دو نوع الیاف در جدول نشان داده شده است.

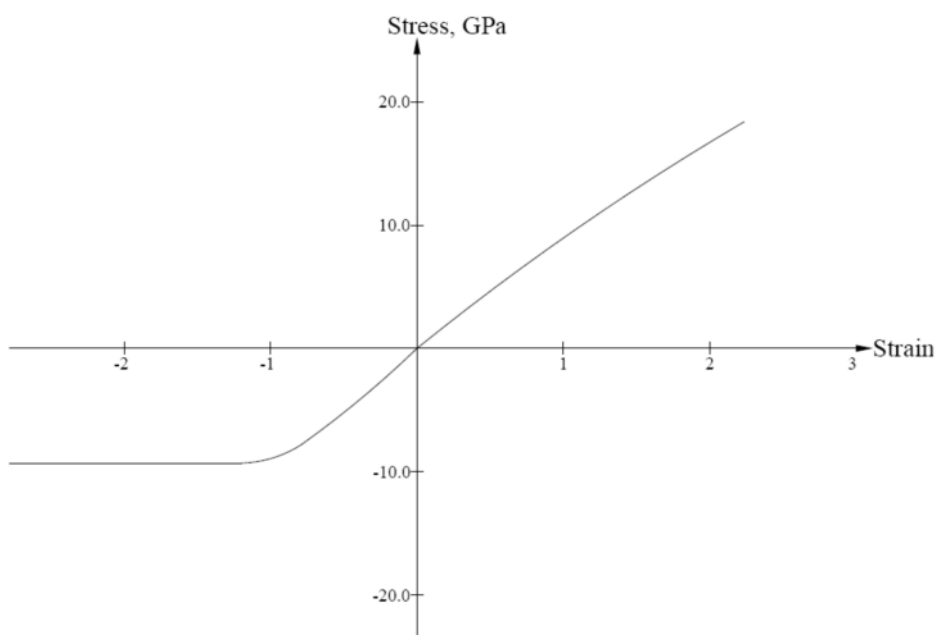
الیاف آرامید در شرایط پختی رزینها تا دمای حدود ۱۸۰ درجه سانتیگراد تحت تأثیر قرار نمی‌گیرند اما به طور کامل در دمای بالای ۴۰۰ درجه سانتیگراد اکسیده می‌شوند. الیاف آرامید اگر چه رفتاری الاستیک را در کشش از خود نشان می‌دهند اما تحت بار فشاری رفتاری غیرخطی دارند. همانگونه که شکل نشان می‌دهد در کرنش ۰/۳ تا ۰/۵ درصد پدیده تسلیم مشاهده می‌شود. الیاف آرامید مقاومت خوبی در برابر نور ماوراء بنفش دارد. میزان تخریب بستگی به ضخامت الیاف داشته زیرا الیاف آرامید نقش خود محافظ دارند و تخریب لایه‌های رویی از تخریب لایه‌های زیرین محافظت می‌کند. این مشکل در سازه‌های کامپوزیتی کمتر حائز اهمیت است زیرا ماتریس تا حدودی نقش محافظت از الیاف را ایفا می‌کند. همچنین با افزودن مواد جاذب UV (اشعه فرابنفش) به رزین، مشکل فوق بیشتر کاهش می‌یابد.

جدول (۲-۴): خواص الیاف آرامید [۴]

کولار ۴۹	کولار ۲۹	نوع کولار / خواص
۱/۴۵	۱/۴۴	وزن مخصوص g/cm^3
۲/۹۴	۲/۷۶	استحکام کششی GPa
۱۳۰	۵۸	مدول کششی MPa
۲/۶	۴/۰	کرنش نهایی %
۱۱/۹	۱۲/۱	قطر الیاف μm

از نقطه نظر مقاومت شیمیایی، بیشتر حلال‌های آلی تأثیر کمی بر کولار دارند و بیشتر محلول‌های آبی نمک‌ها بر آن تأثیر ندارند. اما اسیدهای قوی و بازها در دمای بالا و یا در غلظت‌های زیاد بر کولار اثر می‌گذارند.

الیاف آرامیدی رنگ زرد مات داشته و مشابه دیگر الیاف مورد استفاده در مواد مرکب در اشکال مختلف مانند الیاف نتاییده، پارچه، الیاف کوتاه و غیره تولید شده و به بازار عرضه می‌شوند. لازم به ذکر است که برش الیاف آرامید با وسایل برش معمولی به سختی انجام می‌شود و وسایل برش خاصی احتیاج دارد.



شکل (۲-۳): رفتار تنش - کرنش الیاف آرامید در حالت‌های کششی و فشاری [۴]

۲-۱-۳- ماتریس‌های مورد استفاده در مواد مرکب

ماتریس ماده‌ای است که به عنوان زمینه استفاده می‌شود و تسلیح روی آن انجام می‌شود. ماتریس‌های مورد استفاده در مواد مرکب به سه گروه کلی: فلزی، سرامیکی و پلیمری تقسیم می‌شوند که با توجه به پارامترهایی مانند فرآیندپذیری ساده، وزن کم، قیمت و خواص فیزیکی و شیمیایی ویژه موارد استفاده گوناگون دارند. مواد مرکب با ماتریس پلیمری، از جایگاه ویژه‌ای در صنایع مختلف و از جمله در صنعت ساختمان برخوردار شده‌اند، [۵].

الیاف پلیمری تقویت کننده، جزء اصلی ساختار یک ماده مرکب هستند. اما دانستن نقش و اهمیت ماتریس پلیمری بسیار ضروری است. نقش ماتریس پلیمری عبارت است از:

۱. انتقال تنش بین الیاف تقویت کننده
 ۲. احاطه کردن و نگه داشتن ساختار الیاف
 ۳. محافظت الیاف از آسیب‌های محیطی
 ۴. تأثیر مهم، هم در برش‌های درون لایه‌ای و هم در برش‌های در صفحه ماده مرکب
 ۵. نگهدارنده جانبی در مقابل خم شدگی الیاف در مقابل بار فشاری
- رزین‌ها نقش اساسی در بعضی از خواص ماده مرکب نظیر مقاومت و مدول عرضی دارد، اما نقش کمی در تحمل بارهای کششی ایفا می‌کند. رزین تأثیر مهمی بر مقاومت برشی بین لایه‌ای و مقاومت برشی صفحه‌ای ماده مرکب دارد، [۶].

مقاومت برشی بین لایه‌ای یک عامل مهم در طراحی سازه‌هایی است که تحت بار خمشی قرار می‌گیرند در حالیکه مقاومت برشی صفحه‌ای هنگام اعمال بارهای پیچشی اهمیت پیدا می‌کنند. همانطور که قبلاً ذکر شد، هنگام اعمال بارهای فشار، ماتریس از کماتش احتمالی الیاف نیز ممانعت می‌نماید لذا تا حدودی در مقاومت فشاری ماده مرکب نقش دارد. فرآیند پذیری و نقایص در یک ماده مرکب بستگی زیادی به خصوصیات فیزیکی ماتریس مانند: ویسکوزیته، نقطه ذوب و دمای پخت آن دارد.

خواص مکانیکی مواد مرکب به دو عامل حرارت و سرعت اعمال بار بستگی دارد. مدول مواد مرکب در دماهای بالاتر از دمای نرم شدن پلیمر (Tg) کاهش قابل ملاحظه‌ای پیدا کرده و بیش از ۸۰ درصد کاهش می‌یابد. در صورتیکه اثر سرعت اعمال بار، برعکس اثر دما می‌باشد یعنی با افزایش سرعت اعمال بار، پلیمر حالتی شکل پذیر از خود نشان می‌دهد.

ماتریس‌های پلیمری مورد استفاده در صنعت به دو دسته پلیمرهای گرما نرم و گرما سخت، تقسیم می‌شوند. مهمترین پلیمرهای گرما سخت (Thermoset) عبارتند از: رزینهای پلی استر،

رزین‌های وینیل استر، رزین‌های اپوکسی، رزین‌های فنولیک و رزین‌های اپوکسی نووالاک، رزین‌های پلی آمین و ... که پرمصرف‌ترین آن‌ها پلی استر و اپوکسی می‌باشد. مهمترین پلیمرهای گرما نرم (Thermoplast) نیز عبارتند از: پلی پروپیلن، پلی اتیلن، نایلون-ها و ...

پرکننده‌ها (Filler) را می‌توان برای کاهش قیمت، کنترل جمع شدگی، بهبود خواص مکانیکی و افزایش مقاومت در برابر آتش سوزی به ترموست‌ها و ترموپلاستیک‌ها اضافه نمود. در کاربردهای ساختمانی پرکننده‌ها طوری انتخاب می‌شوند که انتقال تنش را بهبود دهند. معمولاً از خاک رس، کربنات کلسیم و الیاف شیشه خرد شده به عنوان فیلر براساس نیاز موجود استفاده می‌شود. قبل از تشریح رزین‌های مختلف، تعریف پاره‌ای از واژه‌ها که به رزین‌های گرما سخت مربوط می‌شود ضروری به نظر می‌رسد، [۶].

زمان نگهداری: از زمانی که یک رزین تولید می‌شود تا زمانی که می‌توان آن را با اطمینان استفاده کرد را زمان نگهداری یا زمان انبارداری گویند.

زمان ژل شدن: پس از آنکه رزین با کاتالیزور و شتاب دهنده مخلوط گردد، مدت زمانی طول می‌کشد تا رزین حالت ژله‌ای به خود بگیرد به این مدت، زمان ژل شدن می‌گویند. پس از این زمان است که دمای رزین به دلیل گرمای حاصل از واکنش شبکه‌ای شدن، به سرعت شروع به افزایش می‌نماید.

عمر مفید: واکنش‌های شبکه‌ای شدن رزین مدتی کوتاه (بسته به وجود ممانعت کننده در سیستم) پس از اختلاط رزین با کاتالیزور و شتاب دهنده آغاز شده و در نتیجه ویسکوزیته سیستم افزایش می‌یابد. سرعت افزایش ویسکوزیته بستگی به میزان کاتالیزور و شتاب دهنده، ممانعت کننده، دمای محیط، میزان مواد و ... دارد. مدت زمان پس از اختلاط، تا زمانی که دیگر نتوان رزین را مورد استفاده قرارداد را عمر مفید سیستم یا زمان نگهداری در ظرف سرباز گویند. این ویژگی بسیار حائز اهمیت است و قبل از استفاده از هر رزینی باید از آن آگاهی داشت.

رزین‌های پلی استر

پلی استر غیراشباع متداول‌ترین رزین پلیمری است که برای تولید قطعات مرکب ساختمانی استفاده می‌شود. براساس تخمین انستیتو کامپوزیت تقریباً ۸۵٪ کامپوزیت‌های تولید شده در آمریکا بر پایه رزین پلی استر غیراشباع می‌باشد. همان‌طور که گفته شد این رزین تا هنگام پخت، ویسکوزیته پایینی دارد و حتی تا هنگامی که به آن‌ها الیاف اضافه می‌شود می‌تواند در شرایط حرارتی و فشاری مخصوصی نیز استفاده شود. رزین پلی استر غیراشباع در یک حلال فعال مانند

استایرن حل می‌شود تا ویسکوزیته آن کاهش یابد و کار با آن ساده‌تر شود. رزین‌های پلی‌استر به دو دسته کلی رزین‌های ایزومتریک و اورتو براساس نوع اسید فنالیک مورد استفاده طبقه‌بندی می‌شوند. اگر اسید فنالیک مورد استفاده از نوع اورتو باشد به رزین حاصل را اورتو و در صورت استفاده از اسید فنالیک نوع ایزو به رزین حاصل را رزین ایزو گویند. ۸۰ تا ۸۵ درصد رزین پلی‌استر مصرفی در صنعت کامپوزیت از انواع اورتو می‌باشد و میزان مصرف رزین‌های ایزو ۱۵ تا ۲۰ درصد است. باید توجه داشت که رزین‌های پلی‌استر مایعاتی غیرپایدارند، [۶].

حتی در دمای محیط پس از نگهداری آن‌ها به مدت چندین ماه یا چندین سال از حالت مایع خارج و به صورت ژل در می‌آیند. همانطور که توضیح داده شد این زمان را زمان انبارداری یا عمر نگهداری گویند. این زمان برای رزین‌های مختلف متفاوت است. با افزایش دما و در صورت نگهداری رزین در ظروف شیشه‌ای و یا در معرض نور، عمر نگهداری رزین، کاهش می‌یابد. اغلب رزین‌های پلی‌استر را در محیط تاریک و در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد می‌توان به مدت حداقل ۶ ماه و در بعضی موارد بیش از یک سال نگهداری کرد، [۶].

رزین‌های وینیل‌استر

با توجه به ساختار شیمیایی رزین‌های وینیل‌استر، این رزین‌ها محصولاتی هستند که بخش زیادی از خواص اپوکسی‌ها را داشته اما مثل پلی‌استرها فرآیند می‌شوند، [۶].

رزین‌های اپوکسی

رزین‌های اپوکسی خواص بسیار خوبی داشته و به همین جهت کاربردهای وسیعی در صنایع مختلف دارند. مهمترین خواص عبارتند از:

۱. خواص مکانیکی خوب مانند: سختی و مقاومت سایش بالا که بیشتر به خاطر حضور ساختارهایی چون بیسفنل A در این رزین‌ها است.
۲. خاصیت الکتریکی خوب
۳. مقاومت حرارتی نسبتاً خوب
۴. چسبندگی عالی به بسیاری از مواد مانند فلزات، چوب، بتن، مصالح بنایی، شیشه، سرامیک و بسیاری از پلاستیک‌ها. این ویژگی ناشی از وجود گروه‌های اپوکسی و هیدروکسیل در زنجیره است.
۵. مقاومت شیمیایی خوب به ویژه در محیط‌های قلیایی.
۶. جمع‌شدگی کم پس از واکنش‌های پخت.

این خاصیت امکان ساخت قطعاتی با ابعاد دقیق را فراهم نموده و تنش‌های باقیمانده در آن‌ها را کم خواهد کرد. رزین‌های اپوکسی در طرح‌های پیشرفته مانند: هواپیماسازی، کاربردهای فضایی و دفاعی و همچنین بسیاری از سازه‌های تقویت شده با کامپوزیت استفاده می‌شوند. رزین‌های اپوکسی با ویسکوزیته متنوع تولید می‌شوند و مواد پخت یا سخت کننده گوناگونی برای آن‌ها وجود دارد. رزین‌های اپوکسی بسیار گرانتر از پلی استرهای تجاری و وینیل استرها هستند. در استفاده و تقویت‌های اولیه سازه‌های بنایی، بیشتر از رزین‌های اپوکسی استفاده می‌شود ولی در مرحله دوم تقویت این سازه‌ها بیشتر از پلی استرهای استفاده می‌شود که ازدیاد طول کششی بیشتری دارند و در ضمن مقاومت قلیایی بیشتری نیز از خود نشان می‌دهند، [۶].

۲-۱-۴- آماده سازی سطح کار و نصب پلیمرهای الیافی

سطح کار باید قادر باشد بار را از سازه به پلیمرهای الیافی منتقل نماید. سطح کار باید مقاومت کششی و برشی کافی داشته باشد تا پیوستگی کافی را تضمین نماید. مقاومت کششی به وسیله آزمایش کششی اندازه‌گیری می‌شود. مقاومت برشی نیز از روی مقاومت کششی تخمین زده می‌شود. زمانی که سطح کار دارای ترک‌های زیادی باشد، آن قسمت باید با روکش مناسب (مثلاً ملات) صاف و هموار شود. آماده سازی سطح کار پیش از نصب پلیمرهای الیافی با استفاده از دستورالعمل کارخانه سازنده چسب و پلیمرهای الیافی صورت می‌گیرد. به طور کلی سطح کار باید عاری از روغن‌ها یا هر آلودگی دیگری باشد. سطح کار یا سطح تعمیر شده باید عاری از مواد شل و ناسالم باشد. در همه حالت‌ها، گرد و غبار و هر چیزی که با اتصال چسب به سطح کار تداخل داشته باشد باید از سطح کار برداشته شود، [۷].

درجه حرارت و رطوبت در زمان نصب، روی عملکرد سیستم اثر می‌گذارد. معمولاً آسترها و رزین‌های اشباع نباید بر سطوح سرد و یخ زده اعمال شوند. زمانی که دمای هوای محیط پایین است، لازم است به مواد پلیمری الیافی در طول زمان نصب و مراقبت، گرما داده شود. رزین‌ها نباید به سطوح خیس اعمال گردند. مگر اینکه برای این منظور ساخته شده باشند. آستر اعمال شده به سطح کار باید ویسکوزیته پایین داشته باشد تا در لایه زیرین کار نفوذ نماید. درحالت استفاده از پلیمرهای الیافی از جنس شیشه، ضخامت لایه آستر باید کافی باشد تا از انتقال اثرات قلیایی سطح کار به الیاف شیشه‌ای جلوگیری شود.

مراحل نصب FRP شامل:

- ۱- کشیدن پرایمر یا لایه اولیه
- ۲- پر کردن خلل و فرج
- ۳- مالیدن رزین یا چسب
- ۴- قرار دادن ورقه‌های FRP

۵- مالیدن لایه دوم و فوقانی چسب یا رزین ۶- بکار بردن پوشش محافظ می باشد، [۷].

۲-۲- مصالح بنایی

مشخصات مصالح اعضا و اجزای به کار رفته در ساختمان‌های بنایی مطابق ضوابط دستورالعمل بهسازی که در ادامه آمده است در نظر گرفته می‌شود. مشخصات مورد انتظار مصالح بنایی، متوسط مقادیر به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده می‌باشد و کرانه پایین مشخصات مصالح بنایی نیز از متوسط منهای یک انحراف معیار مقادیر آزمایش‌ها تعیین می‌شود، [۸].

مشخصات اسمی مصالح بنایی، یا به عبارتی مقادیر استفاده شده در اسناد و مدارک ساخت و ساز نیز، به عنوان کرانه پایین مشخصات مصالح در نظر گرفته می‌شود. همچنین، می‌توان مشخصات مورد انتظار را از مقادیر کرانه پایین، به دست آورد. در این صورت برای به دست آوردن مقادیر مقاومت مورد انتظار، مقادیر کرانه پایین باید در ضریبی که در جدول زیر آورده شده است، ضرب شود.

جدول (۲-۵): ضرایب تبدیل کرانه پایین مشخصات به مشخصات مورد انتظار [۸]

ضریب	خصوصیت
۱/۲	مقاومت فشاری
-	مدول الاستیسیته [*]
۱/۲	مقاومت کششی
۱/۲	مقاومت برشی

^{*}مدول الاستیسیته در فشار، ۵۵۰ برابر مقاومت فشاری در نظر گرفته می‌شود.

۲-۲-۱- مقاومت فشاری مصالح بنایی (f_{me})

سه روش برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری مورد انتظار مصالح بنایی f_{me} وجود دارد، که دو روش آن به صورت انجام آزمایش بر روی منشورهایی است که از دیوار مصالح بنایی بیرون کشیده شده و به آزمایشگاه منتقل می‌شوند. روش سوم به صورت درجا و با قرار دادن یک جک مسطح در دیوار مصالح بنایی موجود، انجام می‌شود، [۸].

در روش اول، به منشورهای نمونه برداری شده از دیوار بنایی موجود، فشار وارد کرده و آنقدر تنش فشاری قایم را افزایش می‌دهند تا به اوج مقاومت برسد.

منشور مورد آزمایش، بایستی شرایط زیر را داشته باشد:

۱- دارای حداقل ارتفاع ۴۰ سانتیمتر باشد.

۲- نسبت ارتفاع به ضخامت آن، بیشتر از ۲ باشد.

۳- حداقل دارای سه ردیف واحد بنایی باشد.

مزیت این روش، انجام آزمایش در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی و اندازه گیری کرنش برای تعیین مدول الاستیسیته است. از معایب این روش، کاهش مقاومت فشاری منشور در هنگام بیرون کشیدن از دیوار و محدود بودن تعداد نمونه‌ها، به علت هزینه بالای نمونه برداری و سپس پر کردن محل آن است، [۸].

در روش دوم، نمونه‌های آزمایشگاهی با استفاده از الگوی منشورهایی که از دیوار بیرون کشیده شده است، شبیه‌سازی می‌شود، برای شبیه‌سازی نسبت اختلاط و ساخت ملات برای نمونه‌های آزمایشگاهی، از آنالیز شیمیایی استفاده می‌شود. مزیت این روش، همان مزیت روش اول است و از معایب آن این است که آثار دما، رطوبت و خزش را نمی‌توان شبیه‌سازی کرد. در روش سوم، شکافی در محل ملات دیوار بنایی ایجاد می‌شود. با قرارگیری جک مسطح هیدرولیکی در شکاف، فشار لازم وارد می‌شود، تا قسمت مورد نظر از دیوار بنایی در معرض تنش قائم قرار گیرد. این فشار تا آنجا افزایش پیدا می‌کند که فاصله نقاط بالا و پایین شکاف (که به وسیله کرنش سنج^۳ نصب شده، اندازه گرفته می‌شود)، کاهش یابد. مزیت این روش، اندازه گیری مقاومت به صورت درجا و همچنین، غیرمخرب بودن آن است. عیب این روش آن است که انواعی از جک‌های مسطح، قادر به رسیدن به فشارهای بالا نیستند، [۸].

در هر حال، مقادیر پیش فرض کرانه پایین مقاومت فشاری، نباید از 60 kg/cm^2 برای مصالح با شرایط خوب، 40 kg/cm^2 برای مصالح با شرایط متوسط و 20 kg/cm^2 برای مصالح با کیفیت بد تجاوز کند، [۸].

آزمایش‌های مقاومت فشاری مصالح بنایی:

۱- روش آزمایش نمونه‌های ساخته شده و یا برداشت شده از دیوار:

در این روش، به منشورهای نمونه برداری شده از دیوار بنایی موجود، نیرو وارد می‌شود و آنقدر تنش فشاری قائم افزایش داده می‌شود تا به اوج مقاومت برسد. منشور مورد آزمایش، بایستی شرایط گفته شده را برآورده کند.

مزیت این روش، انجام آزمایش در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی و اندازه گیری کرنش برای به دست آوردن مدول الاستیسیته است. از معایب این روش، یکی کاهش مقاومت فشاری منشور

³ Gage

در هنگام بیرون کشیدن از دیوار و دیگری، محدود بودن تعداد نمونه‌ها به علت هزینه بالای نمونه‌برداری و سپس پرکردن محل آن است.

در حالتی دیگر، نمونه‌های آزمایشگاهی با استفاده از الگوی منشورهایی که از دیوار بیرون کشیده شده‌اند، شبیه‌سازی می‌شوند. همچنین، برای شبیه‌سازی نسبت اختلاط و ساخت ملات برای نمونه‌های آزمایشگاهی، از تجزیه شیمیایی استفاده می‌شود. از معایب آن، این است که آثار دما، رطوبت و خزش را نمی‌توان شبیه‌سازی کرد. شکل (۲-۴) نمونه‌ای را نشان می‌دهد که به این روش آزمایش می‌شود، [۸].



شکل (۲-۴): آزمایش تنش فشاری مصالح بر روی نمونه [۸]

۲- روش استاندارد آزمایش درجا با استفاده از جک مسطح:

این روش با قرار دادن جک مسطحی درون دیوار موجود که از قبل برای این منظور شکافی در محل ملات آن ایجاد شده است، انجام می‌شود. سپس، افزایش تنش فشاری باعث جابجایی مصالح بالا و پایین شکاف می‌شود. فشار داخلی جک، آنقدر افزایش می‌یابد تا اینکه فاصله نقاط مشخص شده در بالا و پایین شکاف به حالت اولیه برگردد. تنش فشاری در مصالح بنایی، تقریباً برابر حاصلضرب فشار درونی جک در ضرایبی است که این ضرایب، مشخصات فیزیکی جک و سطح

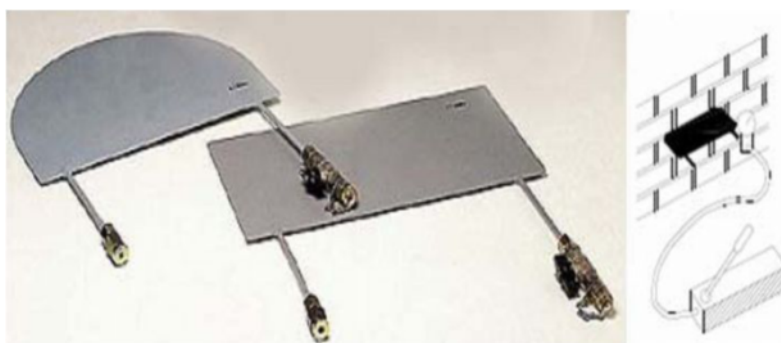
اتصال جک به مصالح را لحاظ می کنند. در دیوارهای با چند نوع مصالح بنایی، تنش محاسبه شده فقط برای مصالحی است که جک در آن قرار گرفته است، [۸].

شکاف به وسیله خارج کردن ملات و بدون اینکه آسیبی به واحد بنایی وارد شود، درون دیوار ایجاد می شود. طول شکاف ایجاد شده، نباید بیش از ۱۲ میلیمتر از ابعاد جک مسطح بیشتر باشد. سطوح بالا و پایین شکاف، باید کاملاً هموار باشند. همانطور که در شکل (۲-۵) نشان داده شده است برای جک های نیمه دایره ای یا مستطیلی نیز بایستی از ابزار مخصوص برای ایجاد شکاف نیمه دایره ای یا مستطیلی استفاده کرد.



شکل (۲-۵): نحوه ایجاد شکاف دایره ای و مستطیلی [۸]

جک مسطح یک وسیله نازک تیغه مانند با پورت های ورودی و خروجی است که به وسیله روغن، فشار ایجاد می کند (شکل (۲-۶)).



شکل (۲-۶): نمایی از یک جک مسطح [۸]

این جک دارای یک سختی درونی است، بنابراین، فشار سیال درون جک از تنش اعمالی به مصالح بیشتر است. بنابراین، برای یک جک هیدرولیکی باید ضریب K_m به عنوان نسبت فشار

سیال درونی به تنش اعمالی در دست باشد. بعد از هر پنج بار آزمایش، جک باید دوباره کالیبره شود. نحوه کالیبره کردن بدین صورت است که دو صفحه فولادی با ضخامت ۵ سانتیمتر و ابعادی مطابق با ابعاد جک، در بالا و پایین جک مسطح قرار داده می‌شود و این دو صفحه فولادی ثابت می‌شود. برای ایجاد تماس کافی بین صفحات، فشار ۰/۷ کیلوگرم بر سانتیمترمربع به صفحه‌ها اعمال می‌شود. سپس فشار درون جک در گام‌های افزایشی ۳/۵ کیلوگرم بر سانتیمترمربع زیاد می‌شود، ولی نباید این فشار از ۷۰ کیلوگرم بر سانتیمترمربع فراتر رود. در هر گام، فشار هیدرولیکی جک و نیروی وارد به صفحه‌های فولادی ثبت می‌شود. مراحل افزایش فشار و تخلیه فشار برای سه بار تکرار می‌شود. نیروی جک مسطح از ضرب فشار داخلی آن در سطح جک به- دست می‌آید. با رسم منحنی نیروی جک (محور افقی) در مقابل نیروی اعمال شده به صفحه‌های فولادی (محور قائم)، می‌توان ثابت جک مسطح را با محاسبه شیب این نمودار تعیین کرد، [۸]:

$$K_m = \frac{P_{Plate}}{P_{Jack}} \quad (1-2)$$

محل انجام آزمایش با در نظر گرفتن موارد زیر تعیین می‌شود:

۱. انتخاب و علامت‌گذاری یک خط روی مصالح بنایی برای تعریف محل و طول شکافی که باید شکل گیرد.
 ۲. نصب حداقل چهار کرنش سنج که دو سر آن در فواصل مساوی در بالا و پایین شکاف نصب شده‌اند.
 ۳. دو ردیف بالا و پایین شکاف باید فواصل مساوی تا شکاف داشته باشند.
 ۴. حداقل فاصله دو سر کرنش سنج که در دیوار نصب شده باید ۰/۳ برابر طول صفحه جک و حداکثر این فاصله باید ۰/۶ طول صفحه جک باشد. همچنین، فاصله اولین و آخرین محل نصب کرنش سنج تا انتهای صفحه جک نباید از ۰/۱۲۵ برابر طول صفحه جک کمتر باشد.
 ۵. محل شکاف باید حداقل به اندازه ۱/۵ برابر طول صفحه جک، از باز شو یا انتهای دیوار فاصله داشته باشد.
- مراحل انجام آزمایش:

۱. اندازه‌گیری فاصله اولیه بین نقاط نصب کرنش سنج روی دیوار؛
۲. آماده کردن شکاف و ثبت ابعاد شکاف؛
۳. اندازه‌گیری مجدد فاصله بین نقاط نصب کرنش سنج برای تعیین انحراف اولیه از فاصله اولیه نقاط نصب کرنش سنج؛

۴. قرار دادن جک درون شکاف و افزایش فشار تا حدود ۵۰ درصد فشار تخمینی برای مصالح و سپس کاهش فشار تا صفر (برای درست نشاندن جک مسطح در شکاف)؛
 ۵. افزایش مجدد فشار تا ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد بیشترین فشار تخمینی برای مصالح و در هر بار افزایش فشار، مقدار انحراف نقاط نصب کرنش سنج بایست اندازه گرفته شود؛
 ۶. افزایش فشار تا زمانی که فاصله نقاط نصب کرنش سنج به حالت اولیه برگردد، ادامه پیدا می‌کند؛ متوسط انحراف مجاز نسبت به طول اصلی کرنش سنج بایستی بیشینه مقادیر ± 0.013 میلیمتر یا 0.05 برابر انحراف اولیه باشد؛ به طوری که، هر یک از انحراف‌ها از بیشینه ± 0.025 یا 0.1 بیشترین انحراف فراتر نرود؛
 ۷. کاهش فشار جک تا حد صفر (انجام مجدد دو مرحله فوق برای اطمینان از صحت آزمایش توصیه می‌شود)؛
 ۸. خارج کردن جک و پر کردن شکاف با ملات؛
 ۹. محاسبه تنش فشاری مصالح.
- تنش فشاری مصالح از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$f_m = K_m \cdot K_a \cdot P \quad (2-2)$$

که در این رابطه، K_m ثابت بی بعد وابسته به خصوصیات سختی و هندسی جک مسطح، K_a نسبت سطح اندازه گرفته شده جک به متوسط سطح شکاف و P فشار جک که لازم است تا فاصله نقاط نصب کرنش سنج به فاصله اولیه برگردند، می‌باشند.

۲-۲-۲- مدول الاستیسیته مصالح بنایی در فشار (E_{me})

مدول الاستیسیته مصالح بنایی در فشار، E_{me} ، به دو روش تعیین می‌شود؛ در روش اول، منشورهایی از دیوار موجود بیرون آورده و به آزمایشگاه منتقل می‌شود و آزمایش‌هایی مشابه آزمایش مقاومت فشاری که شرح داده شد، بر روی آن‌ها انجام می‌شود؛ تنها این تفاوت وجود دارد که در آزمایشگاه، کرنش سنجی برای ثبت تغییرشکل‌ها قرار داده می‌شود، تا بتوان کرنش‌ها را ثبت و مدول الاستیسیته را محاسبه کرد، [۸].

در روش دوم، که به صورت درجا انجام می‌شود؛ دو شکاف به فاصله چهار تا شش ردیف از المان‌های بنایی در قسمت ملات دیوار ایجاد می‌شود و سپس با قراردادن جک‌های مسطح هیدرولیکی در شکاف‌ها فشار لازم اعمال می‌شود تا قسمت مورد نظر از دیوار در معرض تنش قائم قرار گیرد. مقدار فشار اعمالی توسط جک‌ها، در این آزمایش تا کمتر از نصف مقاومت

مصالح، کافی است. تغییر شکل، به وسیله کرنش سنج‌ها اندازه‌گیری می‌شود و کرنش از تقسیم این تغییر شکل بر فاصله بین کرنش سنج‌ها به دست می‌آید.

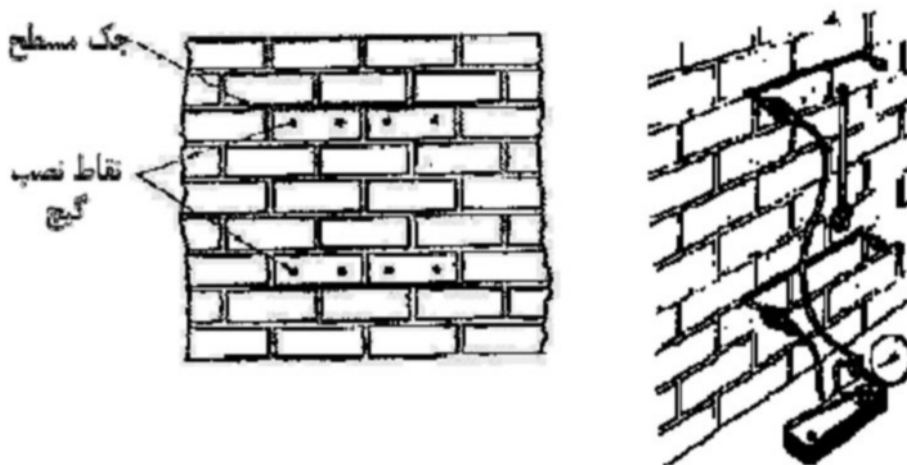
مدول الاستیسیته، E_{me} ، از شیب منحنی تنش-کرنش بین ۵ درصد و ۳۳ درصد مقاومت فشاری نهایی محاسبه می‌شود. معمولاً مقدار مدول الاستیسیته، ۵۵۰ برابر مقاومت فشاری مورد انتظار در نظر گرفته می‌شود.

$$E_m = 550 f_m \quad (2-3)$$

آزمایش مدول الاستیسیته مصالح بنایی در فشار:

در این قسمت، روش استاندارد آزمایش درجا برای تعیین مدول الاستیسیته با استفاده از جک مسطح تشریح می‌شود، مراحل انجام این آزمایش مطابق موارد ارائه شده برای آزمایش تعیین مقاومت فشاری المان است، با این تفاوت که برای ایجاد فشار یکنواخت در مصالح، از دو جک مسطح که به موازات یکدیگر و یکی در بالای دیگری و در دو شکاف که به این منظور در دیوار تعبیه شده، استفاده می‌شود (شکل (۲-۶)). این دو شکاف بایستی چهار تا شش واحد بنایی را از هم جدا کنند.

در این روش، به کرنش سنجی برای اندازه‌گیری مقدار جابجایی نیز نیاز است و بایستی دارای حداقل دقت ۰/۰۰۵ درصد طول کرنش سنج باشد.



شکل (۲-۷): نحوه نصب جک و وسایل اندازه‌گیری [۸]

در این آزمایش، فشار به تدریج افزایش می‌یابد و پس از هر بار افزایش، فشار به مدت یک دقیقه به منظور پایدار شدن میزان جابجایی، ثابت نگه داشته می‌شود و پس از این یک دقیقه مقدار جابجایی، قرائت و ثبت می‌شود. مقدار فشار اعمالی توسط جک‌ها در این آزمایش تا کمتر از

نصف مقاومت مصالح، کافی است. ولی در صورتی که کاهش قابل ملاحظه‌ای در جابجایی رخ داد، آزمایش متوقف می‌شود. تنش فشاری در هر گام، از رابطه (۲-۲) قابل محاسبه است.

کرنش نیز از تقسیم جابجایی ثبت شده بر طول کرنش سنج به دست می‌آید. هم‌چنین، مدول الاستیک مماسی در هر گام و مدول وتری در هر نقطه (گام) به ترتیب از روابط (۲-۴) و (۲-۵) به دست می‌آید:

$$E_t = \frac{\delta f_m}{\delta \varepsilon_m} \quad (۲-۴)$$

$$E_{st} = \frac{f_{mi}}{\varepsilon_{mi}} \quad (۲-۵)$$

مدول الاستیسیته، E_{me} ، از شیب منحنی تنش کرنش بین ۵ درصد و ۳۳ درصد مقاومت فشاری نهایی محاسبه می‌شود، [۸].

۲-۲-۳ - مقاومت کششی مصالح بنایی (f_{te})

آزمایش مقاومت کششی برای خمش خارج از صفحه به دو روش انجام می‌شود: در روش اول، این مقاومت به وسیله روشی به نام قید چرخشی^۴ به دست می‌آید. بدین ترتیب که قیدی در بالای نمونه قرار داده می‌شود و به آن لنگر خمشی حول محور ضعیف اعمال می‌شود تا واحدهای بنایی بالایی گسیخته شود. تنش کششی خمشی، f_{te} ، به وسیله تقسیم ظرفیت خمشی، M ، بر مدول مقطع دیوار، S ، به دست می‌آید.

$$f_{te} = \frac{M}{S} \quad (۲-۶)$$

$$S = \frac{I}{C} \quad (۲-۷)$$

در روابط فوق، I ممان اینرسی مقطع دیوار و C فاصله دورترین تار از تار خنثی است. آزمایش فوق می‌تواند در دو حالت، انجام شود؛ در حالت اول، آزمایش بر روی نمونه بیرون کشیده شده از دیوار انجام می‌شود، ولی در حالت دوم، آزمایش به صورت درجا و بر روی قسمتی از دیوار انجام می‌شود که در این حالت، برای جداسازی قسمت مورد آزمایش از کل دیوار، شکاف‌های قائمی در دو طرف قسمت مورد آزمایش، ایجاد می‌شود. روش دوم آزمایش مقاومت کششی، شامل بیرون کشیدن نمونه از دیوار و اعمال خمش حول محور ضعیف، توسط دو بار نقطه‌ای در یک سوم‌های دهانه و یا توسط بار گسترده یکنواخت است. مقاومت کششی، f_{te} ، به وسیله تقسیم بیشترین لنگر ایجاد شده، M ، بر مدول مقطع نمونه، S ، به دست می‌آید.

⁴ Bond Wrench

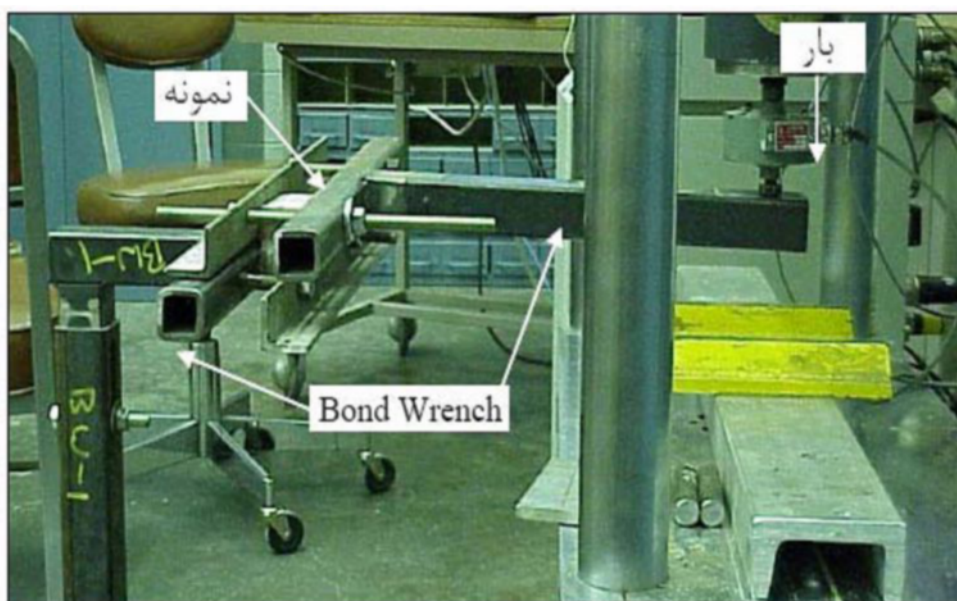
مقادیر پیش فرض کرانه پایین مقاومت کششی، $1/4 \text{ kg/cm}^2$ برای مصالح با شرایط خوب، $0/7 \text{ kg/cm}^2$ برای مصالح با شرایط متوسط و صفر برای مصالح با کیفیت بد می‌باشد. مقاومت کششی دیوارهای مصالح بنایی تحت بارهای جانبی درون صفحه، بایستی معادل مقاومت کششی آن‌ها در خمش خارج از صفحه فرض شود، مگر آنکه، آزمایشی برای این منظور انجام شود، [۸].

آزمایش‌های مقاومت کششی مصالح بنایی (f_{te})

۱- روش آزمایش استاندارد با استفاده از قید چرخشی

در این روش، مقاومت کششی به وسیله روشی به نام قید چرخشی به دست می‌آید. بدین ترتیب که قیدی در بالای نمونه قرار داده می‌شود و به آن لنگر خمشی حول محور ضعیف اعمال می‌شود، تا واحدهای بنایی بالایی گسیخته شود (شکل (۲-۶)).

نمونه آزمایش باید دارای حداقل دو واحد بنایی یا بیشتر، با حداقل عرض ۱۰ سانتیمتر باشد. توصیه می‌شود که از واحدهای بنایی کامل استفاده شود. نمونه ممکن است به صورت آزمایشگاهی و مطابق با واقعیت، ساخته شده و یا از دیوار موجود برداشته شده باشد، [۸].



شکل (۲-۸): نمونه تحت آزمایش به روش قید چرخشی [۸]

بار بایستی با سرعت یکنواخت و در زمانی بین یک تا سه دقیقه، اعمال شود. مقدار بار اعمالی باید با دقت $\pm 2\%$ و حداکثر خطای $2/25$ کیلوگرم اندازه گرفته شود. مقاومت کششی مصالح از

روابط زیر قابل محاسبه است. لازم به ذکر است که این روابط برای حالتی که بار از بالا به طرف پایین اعمال می شود صادق است، [۸]:

برای نمونه‌های ساخته شده از مصالح توپر (سطح خالص مصالح بیش از ۷۵ درصد سطح مصالح باشد):

$$f_{te} = \frac{6(P.L + P_1.L_1)}{b.d^2} - \frac{(P + P_1)}{b.d} \quad (۸-۲)$$

که در آن، F_{te} مقاومت کششی مصالح، P بیشترین بار اعمالی، P_1 وزن بازوی تولید کننده گشتاور، L فاصله مرکز نمونه تا نقطه اعمال بار، L_1 فاصله مرکز نمونه تا نقطه وسط بازوی تولید گشتاور، b متوسط عرض مقطع عبوری از سطح گسیختگی و d متوسط ضخامت مقطع عبوری از سطح گسیختگی است.

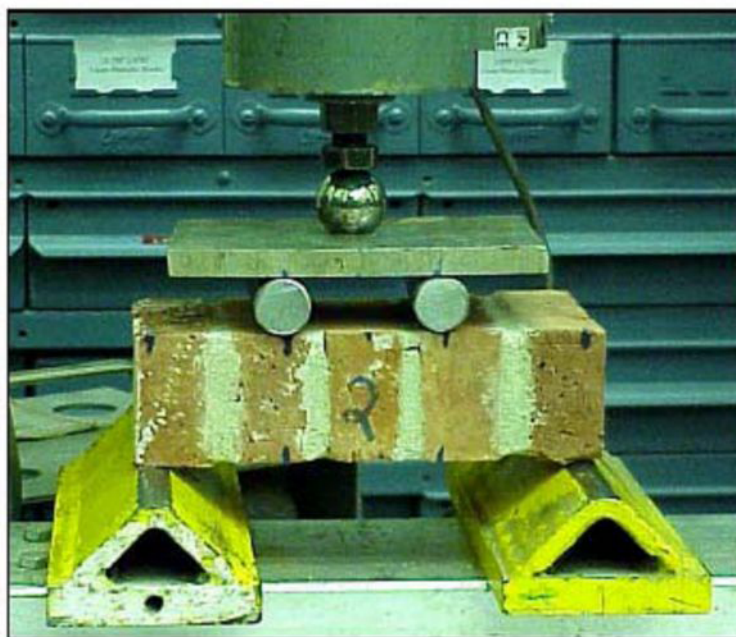
برای نمونه‌های ساخته شده از مصالح سوراخ دار:

$$f_{te} = \frac{(P.L + P_1.L_1)}{S} - \frac{(P + P_1)}{A} \quad (۹-۲)$$

که در آن، S مدول مقطع سطح خالص و A سطح خالص است.

۲- روش آزمایش استاندارد با استفاده از خمش حول محور ضعیف

بارگذاری در این روش به دو شیوه انجام می شود. در شیوه اول، دو بار نقطه‌ای در جهت عمود به صفحه و در نقاط با فاصله یک سوم دهانه از دو انتها مطابق شکل (۲-۷) اعمال می شود، [۸].



شکل (۲-۹): نحوه بارگذاری نقطه‌ای برای تعیین مقاومت کششی [۸]

در شیوه دوم بارگذاری، بار به صورت گسترده یکنواخت به نمونه اعمال می‌شود بدین ترتیب، که بار به واسطه کیف هوایی که از جنس P.V.C ساخته شده است و دارای ضخامت ۰/۵ میلیمتر و سطحی برابر سطح نمونه است، به نمونه وارد می‌شود.

بار بایستی با سرعت یکنواخت و در زمانی بین یک تا سه دقیقه، اعمال شود. مقاومت کششی مصالح از روابط زیر قابل محاسبه است، [۸]:

برای نمونه‌های ساخته شده از مصالح توپر (سطح خالص مصالح بیش از ۷۵ درصد سطح مصالح باشد):

الف) برای شیوه اول بارگذاری:

$$f_{te} = \frac{(P + 0.75P_l).l}{b.d^2} \quad (10-2)$$

که در آن، F_{te} مقاومت کششی مصالح، P بار وارد شده به نمونه، P_s وزن نمونه، l طول دهانه نمونه، b عرض متوسط نمونه و d ضخامت متوسط نمونه است.

ب) برای شیوه دوم بارگذاری:

$$f_{te} = \frac{0.75(P + P_l).l}{b.d^2} \quad (11-2)$$

برای نمونه‌های ساخته شده از مصالح سوراخ دار:

الف) برای شیوه اول بارگذاری:

$$f_{te} = \frac{(0.167P + 0.125P_l).l}{S} \quad (12-2)$$

که در آن، S مدول مقطع سطح مقطع خالص واقعی می‌باشد.

ب) برای شیوه دوم بارگذاری:

$$f_{te} = \frac{0.125(P + P_l).l}{S} \quad (13-2)$$

نکته‌ای که باید مورد توجه باشد این است که اگر در شیوه اول بارگذاری، شکست در خارج از یک سوم میانی طول دهانه رخ دهد، نتایج آزمایش بی‌اعتبار خواهد بود، [۸].

۲-۲-۴- مقاومت برشی مصالح بنایی (v_{me})

ردیف خارجی دیوار، تحت آزمایش برشی قرار می‌گیرد. این آزمایش با جابجایی یک آجر نسبت به آجرهای مجاور صورت می‌گیرد. آجرهای دو طرف آجر تحت آزمایش، باید برداشته شوند و دو سطح در درزهای قائم باید قبل از آزمایش به‌خوبی تمیز شوند. سپس با اندازه‌گیری نیروی مورد نیاز برای جابجایی آجر، مقاومت برشی مشخص می‌شود. مقاومت برشی بر اساس دو سطح آجر در درزهای افقی و در اولین حرکت آجر محاسبه می‌شود. برای محاسبه مقاومت برشی،

باید تنش ناشی از بار ثقلی در محل آزمایش از نتیجه آزمایش کسر شود. مقاومت برشی ملات از رابطه زیر محاسبه می شود، [۸].

$$v_{te} = \frac{V_{test}}{A_b} - \sigma_{D+L} \quad (14-2)$$

در این رابطه، V_{test} بار اعمالی در آزمایش در اولین جابجایی، A_b مجموع سطوح ملات بالا و پایین واحد مورد آزمایش و σ_{D+L} تنش ناشی از بارهای ثقلی در محل آزمایش است. مقاومت برشی مورد انتظار برای المان بنایی از رابطه زیر به دست می آید:

$$v_{me} = 0.56v_{te} + 0.75 \frac{P_D}{A_n} \quad (15-2)$$

در این رابطه، P_D نیروی فشاری ثقلی اعمال شده در بالای دیوار تحت اثر بار مرده، A_n سطح مقطع خالص دیوار و v_{te} متوسط مقاومت برشی آزمایش شده است. در بلوک های سیمانی و آجری سوراخدار A_b باید براساس سطح مقطع خالص محاسبه شود. مقدار مقاومت برشی ملات، v_{te} ، نباید از 0.7 kg/cm^2 فراتر رود.

مقادیر پیش فرض کرانه پایین مقاومت برشی، نباید از 2 kg/cm^2 برای مصالح با شرایط خوب، 1.5 kg/cm^2 برای مصالح با شرایط متوسط و 1 kg/cm^2 برای مصالح با کیفیت بد تجاوز کند. در صورت پر نبودن درزهای قائم بین واحدهای بنایی از ملات، باید مقاومت برشی درون صفحه و مقاومت خمشی خارج از صفحه دیوار، ۵۰ درصد مقادیر محاسبه شده برای دیوار کامل منظور شود. مگر آنکه این درزها با ملات جدید و به صورت مناسب پر شوند، [۸].

۲-۲-۵- مدول برشی مصالح بنایی (G_{me})

مدول برشی مورد انتظار مصالح بنایی، G_{me} ، ۴۰ درصد مدول الاستیسته مصالح بنایی در فشار، در نظر گرفته می شود.

۲-۲-۶- حداقل تعداد آزمایش ها

برنامه آزمایش ها برای تعیین مشخصات مصالح، با توجه به هدف بهسازی انتخابی و تعیین ضریب آگاهی است. برای تعیین خصوصیات مصالح ساختمان موجود، انجام حداقل تعداد آزمایش های معین شده روی اعضای اصلی ضرورت دارد. باید توجه داشت که تعداد آزمایش های مشخص شده در این بخش، بیانگر حداقل تعداد لازم است، و با نظر مهندس مسئول طرح بهسازی اگر برای تعیین دقیقتر شرایط ساخت به تعداد آزمایش های بیشتری نیاز باشد، این کار بایستی انجام پذیرد، [۸].

۲-۲-۲- آزمایش‌های تکمیلی

از آنجایی که وضعیت فیزیکی اعضا بر عملکرد آن‌ها تأثیر مستقیم دارد، لذا گاهی نیاز می‌شود برای بازرسی عملکرد اعضا، به بررسی وضعیت آن‌ها با استفاده از روش‌های آزمایش مخرب و غیرمخرب پرداخته شود، [۸].

آزمایش فشاری قطری

در این روش، مقاومت برشی یا کشش قطری یک المان $۱/۲ \times ۱/۲$ متر مربعی مصالح بنایی به وسیله اعمال بار فشاری در طول قطر المان، تعیین می‌شود. شکل (۲-۸).



شکل (۲-۱۰): آزمایش فشار قطری [۸]

نمونه‌ها باید دارای ضخامتی برابر ضخامت دیوار مورد نظر داشته باشند. حداقل تعداد نمونه‌ها باید سه نمونه باشد. نمونه‌های آزمایشگاهی را نباید بعد از ساختن تا ۷ روز حرکت داد و بایستی حداقل ۸ روز در شرایط آزمایشگاهی نگهداری شوند. دمای آزمایشگاه باید ۲۴ ± ۸ درجه سلسیوس با رطوبت ۲۵ تا ۷۵ درصد باشد.

مراحل انجام آزمایش:

۱- قرار دادن کفشک‌ها در محلشان (نیرو از طریق این کفشک‌ها به المان وارد می‌شود)؛

۲- قرار دادن نمونه در محل مربوطه؛

اندازه‌گیری میزان کاسته شدن طول قطر عمودی و افزایش طول قطر افقی تحت اثر بار اعمالی

به یکی از دو روش زیر:

- به وسیله کمپرسومتر و اکستنسومتر؛
- به وسیله کرنش سنج الکتریکی.

نیرو به دو طریق زیر اعمال می‌شود:

برای نمونه‌هایی که نیاز به ثابت کرنش ندارند، بار به صورت پیوسته تا حد نهایی اعمال

می‌شود که این عمل در زمانی بین ۱ تا ۲ دقیقه انجام می‌شود.

برای نمونه‌هایی که نیاز به ثابت کرنش دارند، بازه‌های افزایش نیرو به گونه‌ای انتخاب شود که

حداقل ۱۰ قرائت تغییر شکل یا کرنش به دست آید تا منحنی تنش-کرنش به صورت روشن

مشخص شود، [۸].

تنش برشی از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$S_s = \frac{0.707P}{A_n} \quad (۱۶-۲)$$

که در آن، S_s تنش برشی در سطح خالص، P بار اعمالی و A_n سطح خالص نمونه که از رابطه

زیر به دست می‌آید:

$$A_n = \left(\frac{w+h}{2} \right) . t . n \quad (۱۷-۲)$$

که در آن، w عرض نمونه، h ارتفاع نمونه، t ضخامت نمونه و n درصدی از سطح واحد

مصالح که توپر است به صورت اعشاری است.

کرنش برشی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\gamma = \frac{\Delta V + \Delta H}{g} \quad (۱۸-۲)$$

که در آن، γ کرنش برشی، ΔV کاهش طول عمودی، ΔH افزایش طول افقی و g طول

کرنش سنج قائم می‌باشد. ΔH باید براساس همان طول کرنش سنج که برای ΔV است، باشد.

مدول برشی از رابطه زیر به دست می‌آید، [۸]:

$$G = \frac{S_s}{\gamma} \quad (۱۹-۲)$$

فصل سوم:

بناهای تاریخی و معرفی

بنای شاه نعمت الله ولی

۳-۱- آثار تاریخی و توریسم

آثار تاریخی ویژگی‌هایی بالقوه هستند که قادر به تعیین مرزهای فرهنگی جوامع بشری بوده و حداقل یکی از عوامل اصلی بازشناسی ملت‌ها و کشورها از یکدیگر می‌باشند. شرایط طبیعی، وسعت زمین، موقعیت جغرافیایی و اقلیمی و مهاجرت‌هایی که در قرون متمادی صورت گرفته است و سبب پیدایش تمدن‌های متعددی در نواحی مختلف ایران شده است. فرهنگ و تمدن کهن، غنی و پربرابر ایران در عرصه‌های مختلف و شاهکارهای بی‌نظیری به جامعه جهانی ارزانی داشته است. که از این میان معبد چغار زنبیل، مجموعه تاریخی تخت جمشید و میدان نقش جهان اصفهان را می‌توان نام برد.

فرهنگ ایرانی به دلیل ویژگی خاص خود همواره در هنر و فرهنگ جهان معاصر خود تاثیر شایسته و بسزا داشته است و این ویژگی می‌تواند از جمله زمینه‌های مساعد بین‌المللی و صنعت توریسم باشد.

صنعت توریسم در حال حاضر بعد از صنعت نفت و خودروسازی در درجه سوم اهمیت در دنیای امروز می‌باشد و کارشناسان پیش‌بینی می‌کنند که در قرن آینده میلادی از صنعت نفت و خودروسازی پیشی بگیرد. کشور ایران از نظر جایگاه توریسم فرهنگی در رده دهم قرار دارد. ناگفته نماند که در زمینه اکوتوریسم و طبیعت گردی اگر مقام سوم را نداشته باشد قطعاً می‌توان ادعا کرد که جایگاه چهارم را دارد در حال حاضر با توجه به شرایط اجتماعی و فرهنگی جامعه ما ممتازترین جایگاه برای توریسم ایران جذب توریست فرهنگی است.

۳-۲- عوامل تهدید کننده بناهای تاریخی

بطور کلی عوامل اصلی تهدید کننده آثار فرهنگی تاریخی را می‌توان به چهار بخش عمده ذیل خلاصه کرد، [۹]:

۱. عوامل سیاسی: منازعات سیاسی موجبات ناامنی را فراهم آورده و امکان سوء استفاده را به سود جویان می‌دهد تا آثار فرهنگی تاریخی را مورد تهدید قرار دهند. علاوه بر آن گاه برای جنگ‌های داخلی و یا شرایط خاص جنگ بسیاری از آثار منهدم می‌شود که در این خصوص موارد بسیاری در کشورهای همسایه و یا در سال‌های نه چندان دور در کشور خود شاهد بوده‌ایم، دیده شده است که حتی این آثار در دوران هشت سال دفاع مقدس نیز مورد تهدید جدی قرار گرفته‌اند.

۲. عوامل طبیعی: عواملی مانند؛ سیل، زلزله، آتش سوزی و یا شرایط خاص جوی از علل مهم تهدید کننده ابنیه تاریخی به شمار می رود که مواجهه با آن نیازمند طرح های علمی و پروژه های اجرایی دقیق حفاظتی می باشد.

۳. دخالت های غیرمجاز: از دیگر تهدیدهای جدی بر آثار فرهنگی تاریخی می توان از تخریب بافت و سازه ها و تعمیرات غیرمجاز بمانند تجاوز به تپه ها و اماکن تاریخی و حفاری های غیرمجاز نام برد. بیشتر این اقدامات با هدف سودجویانه صورت می گیرد در موارد اندکی نیز به دلیل عدم آشنایی متخصصان با قوانین و مقررات و روش های اکتشاف و مرمت و یا احتمالاً نارسایی مقررات ناظر به حفاظت از میراث فرهنگی است.

۴. برنامه های عمرانی: گسترش و سرعت اجرای برنامه های عمرانی در قلب برنامه توسعه اجتماعی اقتصادی خصوصاً در محوطه های تاریخی و عدم توجه به مقررات ناظر به حفاظت از میراث فرهنگی از سوی مجریان طرح های کشوری و یا شهری موجب بروز موارد متعددی از تخریب آثار فرهنگی تاریخی گردیده است.

۳-۳- بررسی خطرپذیری ابنیه تاریخی ایران در برابر زلزله

توجه به تاریخچه زلزله های گذشته نشان می دهد که زمین لرزه در نواحی خاصی از زمین بیشتر روی می دهد. وقوع زلزله ها در نواحی مشخصی در نواحی پوسته ای قاره ها که به موازات رشته کوه های مهم می باشند (نظیر نوار لرزه خیزی آلپ-هیمالیا) و همچنین وقوع زلزله ها در محل فرورانش صفحه های اقیانوسی به زیر صفحه های قاره ای (نظیر زمین لرزه های ناحیه ژاپن) و یا زلزله های دیده شده در موزات با رشته کوه های میان اقیانوسی موید این مسئله می باشد، [۱۰].

فقط با یک دامنه از پارامترهای زلزله نمی توان در زلزله شناسی ویژگی های یک ناحیه را توضیح داد چرا که در بعضی از ناحیه ها زلزله بصورت فوج زلزله های با بزرگی کم تا متوسط رخ می دهند (نظیر ناحیه زاگرس) و در بعضی دیگر زلزله های بزرگ فراوان هستند ولی در فاصله های زمانی نسبتاً زیاد ایجاد می شوند (نظیر ناحیه های ایران مرکزی و البرز) لازم به ذکر است تعداد زلزله های با بزرگی کم و متوسط (عمدتاً ۳ تا ۵ در مقیاس ریشتر) بعلت عدم وجود شبکه های ثبت زلزله بطور قابل ملاحظه ای با آنچه تا قبل از دهه ۱۹۶۰ ثبت شده تفاوت زیادی را نشان می دهد.

زلزله های با بزرگی بیش از ۵/۴ برای ایران که توسط داده های شبکه استاندارد جهانی بدست آمده است نمایانگر لرزه خیزی بالای ایران می باشد. با دقت در نقشه ها روندهای مشخصی در راستای رشته کوه های کپه داغ-ققاز در شمال شرقی ایران، در راستای رشته کوه های البرز، شمال

لوت و همچنین در شرق ایران حاصل از تمرکز روی مرکزهای زلزله مشاهده می‌گردد. با دقت در این نقشه، میزان بالای لرزه‌خیزی فلات ایران با روندهای مهم وجود در پستی و بلندی‌ها در این ناحیه جالب توجه می‌باشد. می‌توان ملاحظه نمود که در یک دوره زمانی ۳۶ ساله زمین‌لرزه‌های زاگرس با بزرگی‌های کمتر (متوسط کمتر از ۶) نسبت به زلزله‌های البرز و ایران مرکزی (که دارای بزرگی بیشتری هستند) با فراوانی بیشتری رخ داده‌اند، [۱۰].

۳-۴- عناصر تشکیل دهنده معماری در بناهای تاریخی

بناهای تاریخی چه مذهبی، مانند مسجد و مدرسه و چه غیر مذهبی مانند کاروان سرا و کاخ از فضاهای گوناگون تشکیل می‌شوند و گاهی نیز ممکن است فضای تازه به صورت الحاقی به بناهای دیگر اضافه می‌شود. مثلاً مناره در مسجد و مدرسه که جزئی از بناست و بطور مجزا هم کاربری دارد در این میان می‌توان به اجزای بناهای تاریخی ایران به صورت زیر اشاره نمود، [۱۱]:

۱- میان سرا: میان سرا، حیاط و صحن یکی از ویژگی‌های معماری است مساجد، مدارس و کاروانسراها عمدتاً دارای صحن یا حیاط مرکزی هستند. شکل میان سرا عموماً مربع و مستطیل بود ولی گاهی از نقشه‌های چند ضلعی و مدور هم استفاده شده است. میان سرا راه دسترسی به شبستان و بناهای وابسته راه پله‌ها و اتاق‌ها را مشخص می‌کرد و دارای ایوانی در یک یا دو یا چهار طرف بود.

۲- ایوان: ایوان از زمان اشکانیان متداول بوده است و مورد استفاده قرار گرفتن آن تاکنون به شیوه‌های مختلف ادامه داشته است. ایوان‌ها به صورت فضاهای ورودی و خروجی اجرا می‌شوند و معمولاً از یک طاق آهنگ شکل می‌گیرد و از سه طرف بسته و تنها ارتباط آن به میان سرا می‌باشد. ایوان به عنوان یکی از اجزای مهم تشکیل دهنده بنا اهمیت فوق العاده‌ای داشته و کانونی برای تزئینات مختلف بنا به منظور ایجاد مقرنس با شیوه‌های گچبری، کاشیکاری و آجرکاری است.

۳- رواق: به فضایی سرپوشیده ستون‌دار یا متشکل از چشمه طاق‌هایی اتلاق می‌شود که در طرفین صحن مساجد و یا اماکن مذهبی ساخته می‌شود. دهانه این گونه فضاها رو به صحن است و در ورودی مسجد را به شبستان یا گنبد خانه متصل می‌سازد.

۴- گنبد: از مهمترین عناصر معماری ایران گنبد است که سابقه شکل‌گیری آن به گذشته دور و قبل از اسلام می‌رسد. ایجاد گنبد روی فضای مربع و یا چند ضلعی دارای چند مرحله بوده است. نخست اطاق چهارگوش با درب‌ها و طاقچه‌ها، سپس بخش انتقالی بین اطاق چهارگوش و گنبد و در پایان گنبد اصلی که بروی برش مذکور قرار می‌گیرد. معماران ایرانی روی بناهای

گونگون (معاير، مساجد و مدارس) اين گنبدها را ساخته‌اند. گنبدهای ایرانی به شکل‌های گونگون ساخته می‌شوند که برخی از آن‌ها عبارتند از: گنبد یک پوش، دو پوش و سه پوش، گنبد پیوسته و گسسته یا گنبد مخروطی از زیباترین گنبدهای اجراء شده در کشور مسجد شیخ لطف الله اصفهان است که در نوع خود در جهان بی‌نظیر است.

۵- شبستان ستون‌دار: شبستان‌های ستون‌دار که معمولاً ارتفاع چندانی ندارند در طرفین گنبدها ساخته شده‌اند. این شبستان‌ها بگونه‌ای ساخته شده‌اند که با افزودن و یا کم کردن دهانه‌ای می‌توانستند شبستانی را توسعه داده و یا آن را کوچک نماید.

۶- چهار صفحه: اصطلاح چهار صفحه را می‌توان برای اطاق یا چهار طاق (صلیبی شکل) یا تالار مستطیل که یا چند طاق پوشیده شده باشد. چهار صفحه‌های ساده معمولاً در گوشه‌های بنایی که در مرکز یا حیاط قرار دارد ساخته شده‌اند قرن هشتم هجری تاریخ دوره اوج تکامل چهار صفحه با موارد استفاده گونگون است.

۷- مناره: قبل از اسلام از مناره برای راهنمایی استفاده می‌کردند و اصطلاحاً به آن میل هم می‌گفتند مانند میل فیروزآباد و میل نورآباد. امروز مناره به بنایی اطلاق می‌شود که عموماً در کنار بناهای مذهبی مانند مدارس مساجد و مقبره‌ها ساخته می‌شدند. قدیمی‌ترین مناره در ایران مربوط به مسجد جامع دامغان است. از نظر معماری مناره‌ها از قسمت‌های اصلی پایه، ساقه یا بدنه، کلاهک یا تاج و بخش‌های پلکان و نورگیر تشکیل می‌شود. مناره‌ها به صورت استوانه‌ای، چندضلعی و مخروطی ساخته شده‌اند. مناره عموماً به صورت منفرد در مجاورت مساجد ساخته می‌شدند ولی از دوره سلجوقیان به بعد به تدریج به صورت زوج بر سر در ورودی و یا ایوان اصلی احداث گردیده‌اند. این عناصر معماری در آغاز احداث بسیار ساده و عاری از تزئینات بودند ولی به تدریج همانند دیگر عناصر معماری با تزئیناتی چون آجرکاری و کاشیکاری آراسته شده‌اند. مصالح ساختمانی مناره‌ها عموماً از آجر و سنگ بوده است.

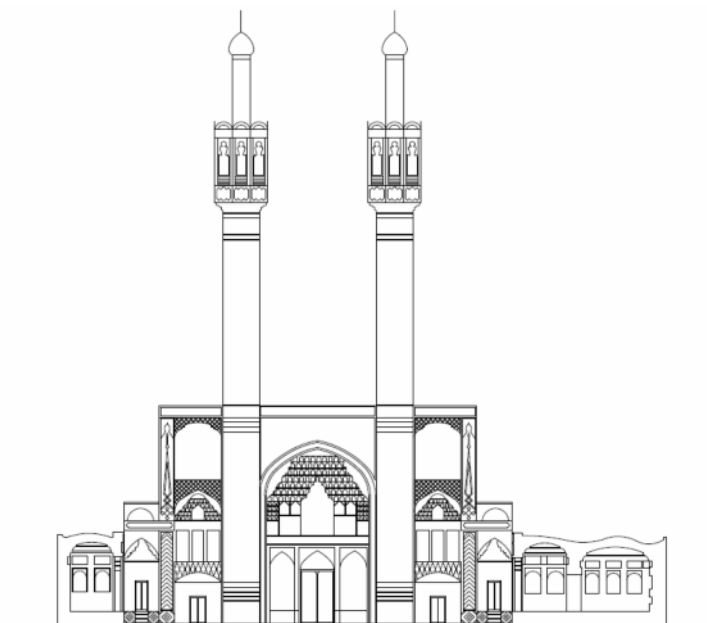
۸- حجره: یا اتاق معمولاً در اطراف حیاط مرکزی ساخته می‌شد. این گونه حجره‌ها در مدارس برای استفاده طلاب و در کاروانسراها برای استراحت مسافران و گاهی هم به منظور چله نشینی و عزلت‌گزینی در اویش بنا گردیده است. در بعضی موارد حجره‌ها به صورت دو طبقه ساخته می‌شود که رفتن به طبقه بالا از طبقه راهروهای ارتباطی انجام می‌شود.

۳-۵- ساختمان تاریخی شاه نعمت ا... ولی

۳-۵-۱- مشخصات بنای تاریخی شاه نعمت ا... ولی

همان گونه که در فصل دوم ذکر شد بنای تاریخی شاه نعمت ا... ولی ماهان از جمله نمونه‌هایی از ساخت و ساز ابنیه با مصالح بنایی غیرمسلح می‌باشد که یکی از آثار باشکوه و زیبای تاریخی ایران به شمار می‌رود. شاهکاری است از هنر معماری شش قرن اخیر با تلفیقی از فضای معماری و باغ‌سازی مفرح و صفایی عارفانه، بارگاه شاه نعمت ا... از ورودی شمالی شامل صحن اتابکی، صحن میرداماد، حسینیه و سردر محمدشاهی است و قدیمی‌ترین قسمت آستانه گنبدی است که بر مزار شاه نعمت ا... ولی قرار دارد و در سال ۸۴۰ ه.ق. ساخته شده است. در قسمت پیش‌خان (جلوخان) دو مناره مرتفع در عهد محمد شاه قاجار و پس از او ساخته شده که بسیار زیباست. ارتفاع این مناره‌ها از سطح صحن $41/6$ متر و رویهم رفته از بلندترین مناره‌های بناهای ایران می‌باشند. این مناره‌ها از آجرهایی به ابعاد $25 \times 25 \times 4$ سانتیمتر و ملات گچ شوره ساخته شده اند، [۱۲].

بنای شاه نعمت ا... ولی در شهر ماهان در ۳۰ کیلومتری جنوب شرقی کرمان واقع شده است. استان کرمان یکی از استان‌های لرزه‌خیز ایران با خطر نسبی زلزله زیاد می‌باشد و زلزله سال ۱۳۶۰ گلباف و زمین‌لرزه ۵ دی ماه سال ۱۳۸۲ بم را تجربه نموده است. از این جهت و نیز با توجه به وجود گسل‌های متعددی در این منطقه و همچنین اهمیت این بنا از لحاظ تاریخی، فرهنگی و گردشگری، مقاوم‌سازی این بنا در برابر زلزله یکی از مسائل مهم و قابل توجه می‌باشد.



شکل (۳-۱): نمای مناره‌های بنای شاه نعمت‌الله ولی [۱۴]

نظر به اینکه مصالح مصرفی در این بنا از نوع مصالح بنایی غیر مسلح با قدرت چسبندگی پایین و جرم زیاد می‌باشد و با توجه به سوابق آسیب‌پذیری این بنا در برابر زمین‌لرزه‌های قبلی از جمله زلزله گلباف و همچنین اهمیت این بنا از لحاظ تاریخی و گردشگری باید مقاوم‌سازی به گونه‌ای انجام شود که در نما و وضعیت معماری بنا دخالت زیادی صورت نگیرد.



شکل (۳-۲): مناره‌های بنای شاه نعمت‌الله ولی

۳-۵-۲- جزئیات معماری بنای تاریخی شاه نعمت ا... ولی

بنای تاریخی شاه نعمت ا... ولی در جنوب شرقی شهر کرمان و در شهر ماهان واقع شده است. شاه نعمت ا... ولی در سال ۸۳۲ ه.ق. در کرمان فوت نموده و در ماهان در میان باغی مصفا مدفون شده است. هسته اولیه بناء گنبدی منفرد بوده که در سال ۸۴۰ ه.ق. و به دستور احمد شاه دکنی ساخته شده و به تدریج توسعه یافته و ۳۲۰۰۰ مترمربع مساحت دارد و از چندین صحن تشکیل شده است.

ورودی امروز آن از شرق است و اولین صحن آن اتابکی نام دارد که به صحن وکیل الملکی راه دارد. این صحن به رواق های دوره قاجاریه و گنبدخانه و رواق شاه عباسی و صحن حسینه دسترسی دارد که آخرین صحن آن صحن بیگلریگی نامیده می شود که به خانه متولی باشی ختم می گردد. این مجموعه طی شش قرن بنا شده و تداوم معماری ایران در شش قرن گذشته و به صورت زیبایی به تماشا گذارده است.

بیشترین توسعه این مجموعه در دوران قاجاریه انجام شده است. معماری رواق و صحن میرداماد، استاد کمال الدین حسین و بانی آن بکتاش خان و معمار صحن حسینه استاد رضا و بانی آن عبدالحمید میرزا می باشد.

صحن وکیل الملکی و رواقها نیز به دستور وکیل الملک های اول و دوم در سال ۱۲۸۵ ه.ق. بنا گردیده است. عناصر تزئینی مجموعه شامل کاشیکاری، کاربندی، مقرنس، گچبری و نقاشی است، [۱۳].

۳-۵-۳- معضلات اجرایی ساختمان بنایی شاه نعمت ا... ولی

ساختمان های خنثی و سنگی از جمله بنای مذکور در برابر زمین لرزه ها آسیب می بینند. به دلیل کافی نبودن قفل و بست اتصال دیوارها با یکدیگر و عدم وجود مهار بین سقف ها و دیوارها، اغلب ترک هایی در محل تقاطع دیوارها مشاهده می شود. در بسیاری از موارد، جدا شدن دیوارها و حتی فروریختگی خارج از صفحه برای دیوارها اتفاق می افتد. در بعضی موارد هم که فرم سازه ای مناسب است، کیفیت نامناسب مصالح دیوار باعث ترک های قطری از هم پاشیده شدن دیوار و فروریختگی نهایی می گردد.

در مورد ساختمان های آجری قدیمی نیز، اثرات نامطلوب کافی نبودن مهار بین سقف و دیوارها مشاهده می شود. عدم تقارن سازه در پلان، بازشوی بزرگ در دیوار، کمبود دیوارهای باربر در هر دو جهت اغلب باعث خسارت شدید یا حتی فروریختگی بسیاری از ساختمانها

می‌گردد. رفتار نامناسب ساختمان‌های آجری در برابر زمین‌لرزه اغلب نتیجه‌ی کیفیت ضعیف مصالح مصرفی برای ساخت، خصوصاً ملات مصرفی است.

رفتار ساختمان‌های با سیستم سازه‌ای مختلف نیز بسیار مناسب است، زیرا دیوارهای مقاوم در برابر بار جانبی که در قسمت‌های خارجی ساختمان قرار دارند، اغلب با بازشوهای متعدد خود، بسیار ضعیف عمل می‌کنند. رفتار نامناسب مشابهی نیز در ساختمان‌هایی که فقط در یک جهت دیوار باربر دارند مشاهده می‌گردد.

ساختمان‌های بنایی که مطابق آئین‌نامه‌های لرزه‌ای، طراحی و ساخته می‌شوند، کم و بیش رفتاری رضایت بخش دارند. فروریختگی و خسارت سنگین نیز در آن‌ها ندرتاً اتفاق می‌افتد. ساختمان‌های جدید که کاملاً مطابق مقررات طرح لرزه‌ای، طراحی و اجرا می‌شوند. با این وجود، هر جا که فقط بخشی از ضوابط طرح لرزه‌ای رعایت می‌شود و یا هنگامی که به کیفیت اجرا توجهی نمی‌شود، خسارت در ابعاد مختلفی رخ می‌دهد. مشاهده‌های عینی نشان می‌دهند که کلاف‌های قائم از بتن مسلح، در بسیاری از موارد از فروریختن ساختمان‌ها جلوگیری می‌نمایند، حتی هنگامی که دیوارها، به دلیل کیفیت پایین مصالح و اجراء به شدت خسارت دیده‌اند.

۳-۵-۴ - اثر زمین‌لرزه بر ساختمان بنایی شاه نعمت الله ... ولی

زمین در هنگام زمین‌لرزه به شدت تکان می‌خورد و در امتدادهای مختلف به حرکت در می‌آید. شالوده ساختمان نیز که تا حدود زیادی به زمین متصل است، متناسب با حرکت زمین جابجا می‌گردد. ولی در قسمت‌های بالاتر ساختمان به دلیل اثر اینرسی، میرایی و سختی با تأخیر به حرکت در می‌آید. این تأخیر در اجزای ساختمان ایجاد تنش کرده و در اثر آن ترک‌ها در ساختمان توسعه می‌یابند. با توجه به اینکه نیروی وارده به ساختمان متناسب با حرکت زمین و وزن ساختمان است، با افزایش شدت زمین‌لرزه و وزن ساختمان، نیروی وارد بر آن نیز بیشتر می‌گردد.

اجزای باربر ساختمان که قبل از زمین‌لرزه فقط بارهای قائم را تحمل می‌نمودند، در اثر نیروهای جانبی ناشی از حرکات زمین، باید نیروی برشی و لنگر خمشی را نیز تحمل نمایند. وضعیت تنش در اجزای ساختمان در هر لحظه متغیر بوده و از حالت تنش فشاری خالص به ترکیبی از تنش‌های فشاری، خمشی و برشی تبدیل می‌شود.

بنابراین در هنگام بروز زمین‌لرزه چنانچه در قسمتی از دیوار، مقدار تنش کششی ناشی از بارهای جانبی از میزان تنش فشاری مربوط به بارهای قائم ثقلی بیشتر شود و مقاومت کششی مصالح مصرف شده در این دیوار کم باشد، در این قسمت ترک ایجاد خواهد شد و در نتیجه سطح مؤثر برای جذب نیروی برشی نیز کاهش و تنش برشی افزایش خواهد یافت. در اثر افزایش

تنش برشی در این قسمت از دیوار، لغزش ایجاد شده و ترک حاصله بزرگتر می‌گردد و بالاخره باعث واژگونی دیوار شده و یا اینکه قسمتی از آن به خارج پرتاب می‌گردد. بنابراین ملاحظه می‌شود که برای مقاومت در برابر زمین‌لرزه نه تنها ساختمان باید بتواند بار قائم را تحمل کند، بلکه باید در برابر نیروهای کششی و برشی به اندازه کافی مقاومت کند.

پاسخ ساختمان‌ها در برابر زمین‌لرزه تابع مشخصات هندسی و سازه‌ای آنهاست. جرم، میرایی، سختی و ویژگی‌ها مقاومت گسیختگی اجزای ساختمان بر پاسخ‌ها تاثیر می‌گذارند. گاهی در ساختمان‌های کوتاه و صلب با پیوند ارتعاشی کم، شتاب موثر بر ساختمان‌ها، خیلی بیشتر از حداکثر شتاب زمین به هنگام زمین‌لرزه می‌گردد. در حالی که ساختمان‌های شکل پذیر، که حد جاری شدن آنها با تغییر شکل زیاد همراه است، شانس بیشتری دارند که در زمین‌لرزه سالم بمانند و یا اینکه متحمل خسارات جزئی شوند.

فصل چهارم:

مقدمه ای بر روش اجزاء محدود

و تحلیل های دینامیکی

نرم افزار ANSYS

۴-۱- نرم‌افزار ANSYS

نرم‌افزار ANSYS یک برنامه چند منظوره و بسیار قدرتمند در زمینه اجزاء محدود بوده که قابلیت فراوانی در حل مسائل پیچیده مهندسی دارد. این نرم‌افزار با دارا بودن بیش از ۱۳۰ نوع المان قادر به تحلیل مسائل استاتیکی، دینامیکی، انتقال حرارت، سیالات، مغناطیس، الکتریسته، ارتعاشات و ... می‌باشد. به منظور درک گسترده‌تری و قدرت این نرم‌افزار کافی است که تعداد المان‌های موجود را با تعداد المان‌های برنامه SAP90 مقایسه کنیم (برنامه SAP90 تنها چهار المان دارد) از جمله المان‌های سازه‌ای موجود در این برنامه می‌توان به المان‌های Solid, Plane, Shell, Beam, Link, Contact و ... اشاره کرد. که هر کدام از آن‌ها به زیرمجموعه‌هایی از لحاظ تعداد درجه آزادی و ... تقسیم می‌شوند. این برنامه از لحاظ درجه آزادی برای حل مسائل محدودیتی ندارد. و تنها به قابلیت سخت‌افزاری سیستم عامل بستگی دارد. مطالب در مورد جنبه‌های مختلف این نرم‌افزار زیاد است که از حوصله این پایان‌نامه خارج است. لذا در این قسمت توجه خود را بر قابلیت‌هایی از این نرم‌افزار متمرکز می‌کنیم که در ارتباط با این پایان‌نامه باشد.

۴-۲- کاربری نرم‌افزار المان محدود

یک نرم‌افزار المان محدود به رغم تحلیل‌های شگفت‌انگیزی که در شاخه‌های مختلف علوم انجام می‌دهد، در واقع کاری جز حل یک معادله دیفرانسیل حاکم بر سیستم، در یک دامنه خاص و با شرایط مرزی معین انجام نمی‌دهد. از تئوری الاستیسته می‌دانیم که تمام مسائل مربوط به مقاومت مصالح را می‌توان به صورت یک مجموعه معادله دیفرانسیل نمایش داد:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \quad (1-4)$$

پس هنگامی که نرم‌افزار المان محدود بطور مثال تنش‌های بوجود آمده در یک میز را تحلیل می‌کند، در واقع دستگاه معادلات (۱-۴) را در زیرمجموعه‌ای از فضای سه‌بعدی به شکل یک میز حل می‌کند. کتاب‌ها و لوازمی که روی میز قرار دارند و به آن نیرو وارد می‌کنند، شرایط مرزی معادلات مذکور هستند. درک عملکرد نرم‌افزار المان محدود، تحلیل‌گر را در استفاده هرچه بهتر از امکانات چنین نرم‌افزارهایی کمک می‌کند. بسیاری از پدیده‌های طبیعت را می‌توان نام برد که علی‌رغم ظاهر متفاوت، از یک نوع معادله دیفرانسیل تبعیت می‌کنند. به عنوان مثال تغییر شکل یک تیر یک سر گیردار در اثر بار گذاری جانبی، از معادله‌ای تبعیت می‌کند که پره‌های خنک کننده

یک رادیاتور، در انتقال حرارت از آن تبعیت می‌کنند. درک عمیق کاربرد از نرم‌افزار المان محدود به عنوان حل کننده معادلات دیفرانسیل و نه به عنوان تحلیل کننده تیرها، صفحه‌ها و... کمک می‌کند تا کاربر بتواند از نرم‌افزار در حوزه‌های به ظاهر کاملاً متفاوت ولی دارای یک نوع معادلات دیفرانسیل استفاده نماید، [۱۶].

۳-۴- دستگاه‌های مختصات در نرم‌افزار ANSYS

برنامه ANSYS دارای قابلیت‌های متعددی در تحلیل اجزاء محدود می‌باشد. این برنامه قادر است حالت‌های مختلف تحلیل مانند: استاتیکی، هارمونیک، مودال، دینامیکی، طیفی، کماتش، و زیرسازه‌ای را در حالت خطی و غیرخطی اجرا نماید.

۴-۳-۱- انواع دستگاه‌های مختصات

برنامه ANSYS دارای دستگاه‌های مختصات متعددی می‌باشد که هر کدام مورد استفاده خاصی دارد:

۱. دستگاه مختصات کلی و محلی جهت معرفی هندسه قطعه مورد نظر.
۲. دستگاه مختصات گرهی که جهات خواص مصالح و جهات نتایج المانی را مشخص می‌کند.
۳. دستگاه مختصات نتایج که جهت انتقال گرهی یا المانی به یک دستگاه مختصات خاص جهت تهیه فهرست‌ها یا نمایش بکار می‌رود.

۴-۴- بارگذاری در نرم‌افزار ANSYS

هدف اصلی یک تحلیل اجزاء محدود بررسی نحوه پاسخ یک سازه یا اجزاء آن به یک بارگذاری مشخص می‌باشد. بنابراین تعریف مناسب بارگذاری می‌تواند گامی کلیدی در انجام تحلیل باشد. کلمه بار در این برنامه شامل شرایط مرزی یا توابع نیروهای خارجی یا داخلی می‌باشد. انواع بارها عبارتند از: تغییر مکان، نیرو، فشار، دما و شتاب. بارها در حالت کلی به شش گروه تقسیم می‌شوند که عبارتند از: قیود درجات آزادی، نیروها (متمرکز)، بارهای سطحی، بارهای حجمی، بارهای اینرسی و میدان مغناطیسی.

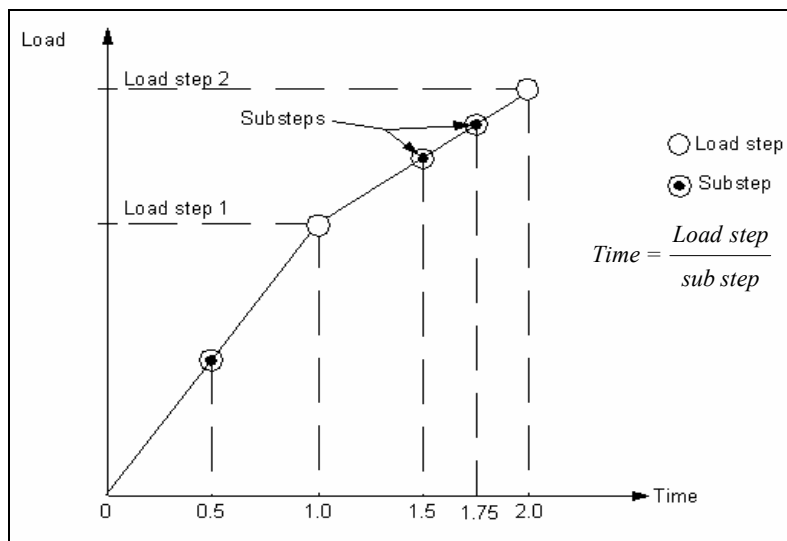
۴-۴-۱- گام‌های بار و معادلات تکراری

یک گام بار عبارت است از ترکیبی از بارها که برای آن‌ها یک جواب بدست می‌آید. در یک تحلیل می‌توان با استفاده از گام‌های بار مختلف گروه‌های متعددی از بارها را اعمال نمود. بطور خلاصه یک تحلیل غیرخطی متشکل از سه مرحله است، [۱۵]:

۱. بالاترین رده عبارت است از گام‌های بار^۱ که توسط کاربر به طور صریح در یک بازه زمانی تعریف می‌شود. فرض بر آن است که تغییرات بار در داخل این گام‌ها به صورت خطی (در تحلیل‌های استاتیکی) می‌باشد.

۲. در هر گام بار، کاربر می‌تواند به برنامه دستور بدهد که برای اعمال کردن بار به طور تدریجی، این کار را در چند مرحله انجام دهد که به هر مرحله یک زیرگام^۲ یا گام زمانی^۳ گفته می‌شود.

۳. در هر زیرگام، برنامه مبادرت به انجام تعدادی تکرار موازنه‌ای برای رسیدن به حل همگرا می‌نماید. شکل (۴-۱) مفاهیم گام بار، زیرگام و زمان در یک تحلیل غیرخطی را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۱): مفاهیم گام بار، زیرگام و زمان

۴-۵- بررسی انواع مسائل غیرخطی در نرم‌افزار ANSYS

رفتار غیرخطی سازه‌ای از مصالح متعددی ناشی می‌شوند که در یک تقسیم‌بندی کلی می‌توان آن‌ها را در سه گروه به شرح زیر بیان نمود، [۱۵].

۱. رفتار غیرخطی سازه‌ای ناشی از خصوصیات غیرخطی مصالح
۲. رفتار غیرخطی سازه‌ای ناشی از مساله غیرخطی هندسی
۳. رفتار غیرخطی سازه‌ای ناشی از تغییر وضعیت

¹ Load Steps

² Substep

³ Time Step

۴-۵-۱- بررسی رفتار غیرخطی سازه‌ای ناشی از خصوصیات غیرخطی مصالح

رابطه غیرخطی بین تنش و کرنش مصالح معمولی‌ترین عامل منعکس‌کننده خاصیت غیرخطی در رفتار سازه می‌باشد، عوامل متعددی بر رابطه بین تنش و کرنش مؤثر است که از آن جمله می‌توان به شرایط محیطی، تاریخچه بارگذاری، و ... اشاره کرد. پدیده‌های غیرخطی مصالح در نرم‌افزار ANSYS در هشت گروه به صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شوند:

۱. پلاستیسیته مستقل از روند اعمال بار^۴: ویژگی بارز آن ایجاد کرنش‌های پلاستیک به صورت آنی و برگشت‌ناپذیر می‌باشد.

۲. پلاستیسیته وابسته به روند اعمال بار (مدل ویسکوپلاستیک)^۵: این مدل رفتاری این اجازه را می‌دهد تا کرنش‌های پلاستیک در طی زمان گسترش و افزایش یابند.

۳. خزش^۶: این مدل رفتاری وابسته به نرخ اعمال بار است، دوره زمانی که برای گسترش خزش لازم است معمولاً بسیار بزرگتر از دوره زمانی مورد نیاز برای گسترش پلاستیسیته وابسته به روند اعمال بار است.

۴. الاستیسیته غیرخطی^۷: با اعمال آن قادر به مدل کردن رابطه غیرخطی تنش و کرنش در حالی که تنش‌ها قابل برگشت می‌باشند. خواهیم بود.

۵. هیبرالاستیسیته^۸: این حالت با تعریف یک پتانسیل چگالی انرژی تعریف می‌شود. که توصیف‌کننده رفتار اسفنج‌گونه و الاستومتری مصالح می‌باشد. در این حالت کلیه تنش‌ها برگشت‌پذیر می‌باشند.

۶. ویسکوالاستیسیته^۹: این حالت توصیف‌کننده رفتار وابسته به روند اعمال بار است که دربرگیرنده اثر لزجت در کرنش‌های الاستیک می‌باشد.

۷. بتن^{۱۰}: این مدل رفتاری منعکس‌کننده رفتاری از مصالح است که قابلیت ترک خوردن و شکستن را دارند.

۸. تورم^{۱۱}: در این مدل رفتاری به مصالح اجازه می‌دهد تا در حضور یک سیال خنثی متورم شود.

⁴ Rate-Independent Plasticity

⁵ Rate Dependent Plasticity (Viscoplasticity)

⁶ Creep

⁷ Nonlinear Elasticity

⁸ Hyperelasticity

⁹ Viscoelasticity

¹⁰ Concrete

¹¹ Swelling

مدل مصالح به کار رفته در مدل‌سازی‌های این پایان‌نامه از نوع پلاستیسیته مستقل از سرعت بارگذاری در دمای ثابت می‌باشد.

۴-۵-۲- بررسی رفتار غیرخطی سازه‌ای ناشی از خصوصیات غیرخطی

هندسی

اگر سازه‌ای، در تاریخچه بارگذاری خود تغییرشکل بزرگی را تجربه نماید آنگاه تحت تاثیر تغییرات، خصوصیات هندسی سازه رفتار غیرخطی از خود نشان می‌دهند. برنامه ANSYS توانایی در نظر گرفتن خصوصیات غیرخطی هندسی در چهار گروه به شرح زیر را دارد:

۱. کرنش‌های بزرگ: در این حالت فرض می‌شود دیگر کرنش‌ها بی‌نهایت کوچک نمی‌باشند. در نتیجه تغییرات شکل در مدل لحاظ می‌گردد. همچنین در دوران‌ها نیز می‌تواند بزرگ باشند.

۲. تغییر مکان‌های بزرگ: در این حالت فرض می‌شود دوران‌ها بزرگ می‌باشند. ولی کرنش‌های مکانیکی آن‌هایی که باعث ایجاد تنش می‌شوند، کوچک باقی می‌ماند. ضمناً در این حالت فرض می‌شود که شکل سازه به غیر از آن قسمت که به دوران صلب است تغییر نمی‌کند به عنوان مثال در این زمینه می‌توان به تیر لاغر بلند که تحت خمش خالص است اشاره کرد.

۳. سختی ناشی از تنش: در این حالت فرض می‌شود که کرنش‌ها و دوران‌ها کوچک باقی می‌ماند. در واقع این اثر عبارت است از تقویت یا تضعیف سازه در اثر تنش ایجاد شده، به عبارت دیگر در اثر این گزینه تاثیر تنش درون صفحه‌ای روی سختی خارج صفحه‌ای لحاظ می‌گردد، این اثر باید برای سازه‌های لاغر که سختی خمشی در مقابل سختی محوری‌شان کم است در نظر گرفته شود. صفحات، کابل‌ها و تیرهای لاغر نمونه‌ای از این سازه‌ها هستند.

۴. نرم‌شدگی ناشی از دوران: در این حالت فرض می‌شود که کرنش‌ها و دوران‌ها کوچک هستند. این مورد مخصوص حالتی است که جرم با سرعت دورانی معین حول یک نقطه دوران می‌کند.

۴-۵-۳- بررسی رفتار غیرخطی سازه‌ای ناشی از خصوصیت تغییر وضعیت

رفتار غیرخطی ارائه شده توسط تعداد زیادی از سازه‌های معمولی به وضعیت آن‌ها بستگی دارد. به عنوان مثال کابل با عملکرد کششی خالص که در وضعیت شل یا سفت قرار می‌گیرد. و یا تکیه‌گاه غلتکی که با سازه در تماس باشد یا نباشد و یا حالت‌هایی از این قبیل دارای سختی‌های متفاوتی هستند که به وضعیت آن‌ها بستگی دارد تغییر وضعیت می‌تواند به طور مستقیم ناشی از نحوه اعمال بار باشد.

۴-۶- روش حل معادلات غیرخطی در نرم‌افزار ANSYS

یکی از روش‌های حل مسائل غیرخطی در برنامه ANSYS روش تکرار نیوتن-رافسون می‌باشد. در این روش معادله غیرخطی رابطه (۲-۴) حل خواهد شد:

$$[K]\{U\} = \{F\} \quad (2-4)$$

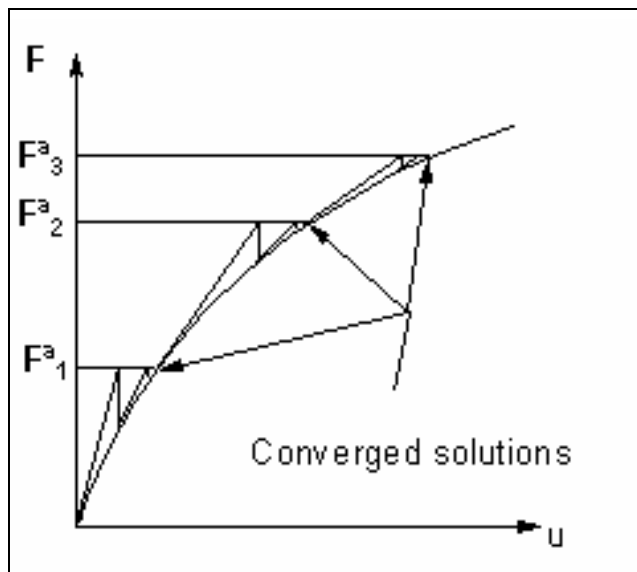
بدین ترتیب که در ابتدا، مقدار اولیه برای $\{U\}$ حدس زده می‌شود سپس با رسم مماس بر منحنی مقدار جدیدی برای $\{U\}$ بدست می‌آید. آنقدر این عمل تکرار می‌شود تا اختلاف دو مقدار متوالی از یک حد دلخواه کوچک‌تر شود (جواب‌ها همگرا شوند). یافتن معکوس ماتریس $[K]$ تعبیر دیگری برای رسم مماس بر منحنی می‌باشد زیرا خواهیم داشت:

$$\{U\} = \{F\} \times [K]^{-1} \quad (3-4)$$

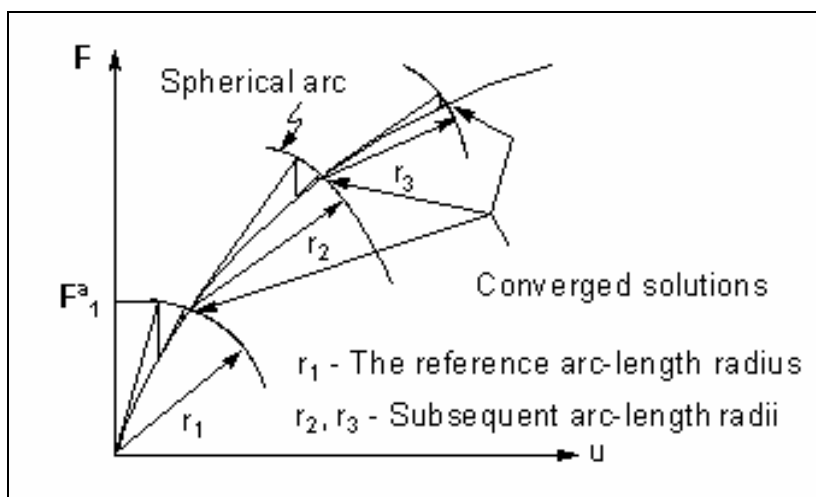
به عبارت دیگر در هر مرحله نیازمند به محاسبه معکوس ماتریس سختی خواهیم بود. این امر باعث افزایش زمان محاسبه کامپیوتری می‌شود با کاهش دادن این زمان می‌توان از معکوس ماتریس سختی که در اولین مرحله بدست می‌آید، استفاده نمود. شکل (۲-۴) روش نیوتن-رافسون را در حل معادلات غیرخطی نشان می‌دهد. معادلات غیرخطی در هر نمو، حل شده و نتایج برای هر مرحله تعیین می‌گردند. این عمل تا رسیدن به انتهای بارگذاری تکرار می‌شود. تا اینکه با افزایش منطقه پلاستیک در سازه سیستم به مکانیزم شکست تبدیل شده یا به حالتی که توسط کاربر به نرم‌افزار معرفی می‌گردد برسد.

ضعف روش نیوتن-رافسون در مواقعی است که مماس بر منحنی نیرو-جابجایی به حالت عمودی نزدیک می‌شود. در این حالت احتمال همگرایی پاسخ به شدت کاهش می‌یابد. در چنین مواقعی می‌توان از روش تقریب طول کمان^{۱۲} به عنوان جایگزین استفاده نمود. روش تقریب طول کمان تکرارهای موازنه‌ای نیوتن-رافسون را مجبور به همگرایی در امتداد یک کمان می‌کند و به موجب آن در اغلب موارد از واگرایی جواب جلوگیری می‌نماید، تا جایی که شیب منحنی بار-تغییر مکان می‌تواند صفر و حتی منفی شود. شکل (۳-۴) روش تقریب طول کمان را نشان می‌دهد، [۱۵].

¹² Arc Length Method



شکل (۴-۲): روش تقریب طول کمان



شکل (۴-۳): روش نیوتن-رافسون

۴-۷- روش‌های حل در برنامه ANSYS

پس از مدل‌سازی برنامه، باید آن را با استفاده از معادلات همزمان ایجاد شده توسط اجزاء محدود حل نمود. روش‌های متعددی برای این منظور در نرم‌افزار ANSYS وجود دارد که عبارتند از:

- ۱- روش مستقیم^{۱۳}: در این روش براساس حذف مستقیم معادلات با استفاده از روش‌های تکرار به جواب می‌رسیم.

¹³ Sparse

۲- روش فرونتال^{۱۴}: در این روش ابتدا ماتریس تک تک المان‌ها محاسبه شده، سپس درجات آزادی المان‌ها خوانده می‌شود. هر درجه آزادی که قابل بیان براساس بقیه درجات آزادی باشد، حذف می‌شود. بدین ترتیب یک ماتریس مثلثی باقی می‌ماند که حل درجات آزادی با جانشین رو به عقب انجام می‌شود.

۳- روش گرادیان مزدوج^{۱۵}: در این روش پس از تکمیل ماتریس سختی تک تک المان‌های آن‌ها سرهم شده و ماتریس کل تشکیل می‌شود. سپس با انتگرال‌گیری تا حصول همگرایی ادامه می‌یابد.

۴- روش گرادیان مزدوج یا مکمل^{۱۶}: این روش مشابه روش قبل می‌باشد ولی سرعت تحلیلی بیشتر است و برای مساله‌هایی که در روش‌های دیگر به سختی همگرا می‌شود این روش مناسب است. البته این روش حافظه زیادی برای تحلیل نیاز دارد.

۵- روش تکرار خودکار: با توجه به شرایط مسئله یک روش حل تکرار مناسب را انتخاب می‌کند. و با توجه به دقت تعریف شده برای جواب، مسئله حل می‌شود، [۱۵].

۴-۸- مفهوم تحلیل دینامیکی^{۱۷}

در تحلیل دینامیکی، نیروی جانبی زلزله، با استفاده از بازتاب دینامیکی که سازه بر اثر حرکت زمین ناشی از زلزله، از خود نشان می‌دهد، بدست می‌آید. این تحلیل شامل، دو روش تحلیل دینامیکی طیفی و تحلیل تاریخچه زمانی می‌باشد، [۱۶].

در تحلیل دینامیکی علاوه بر بار اعمالی $(P(t))$ که به صورت تابعی از زمان می‌باشد، پارامترهای جرم (m) ، سختی (K) و میرایی (c) ، بر پاسخ سازه تاثیر می‌گذارند. پاسخ سازه در این تحلیل می‌تواند؛ تغییر مکان، سرعت و یا شتاب باشد، که از روی این پاسخ‌ها تنش‌ها و نیروهای داخلی محاسبه می‌شوند.

۴-۸-۱- تحلیل تاریخچه زمانی

به کمک این آنالیز می‌توان پاسخ دینامیکی یک سازه تحت اثر بارگذاری‌های وابسته به زمان را بدست آورد. در این آنالیز می‌توان به محاسبه جابجایی‌ها، کرنش‌ها، تنش‌ها و نیروهای متغیر با زمان در یک سازه پرداخت. معادله اصلی حاکم بر آنالیز دینامیکی به صورت زیر است:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = f(t) \quad (4-4)$$

¹⁴ Frontal

¹⁵ Jacobi

¹⁶ Cholesky

¹⁷ Dynamic Analysis

که در رابطه فوق، M ماتریس جرم سازه، C ماتریس میرایی، K ماتریس سختی، \ddot{X} بردار شتاب، \dot{X} بردار سرعت، X بردار جابجایی و $f(t)$ بردار بار متغیر با زمان است، [۱۶].

در آنالیز دینامیکی تاریخچه زمانی سه روش برای انجام محاسبات ماتریسی وجود دارد:

- ۱- روش کامل: این روش ماتریس کامل سیستم را تشکیل می‌دهد و پاسخ آن را محاسبه می‌کند. این روش قدرتمندترین روش بین سه روش است، زیرا قادر است در محاسبات خواص غیرخطی نظیر پلاستیسیته، تغییر شکل بزرگ و ... را لحاظ کند.
- ۲- روش کاهش یافته: این روش با به کار بردن درجات آزادی اصلی به کاهش محاسبات ماتریسی می‌پردازد و در نتیجه زمان حل مساله کاهش می‌یابد. ولی پس از محاسبه جابجایی‌ها در هر درجه آزادی باید آن‌ها را گسترش داد.
- ۳- روش انطباق مود: این روش با جمع آثار بردارهای ویژه از یک آنالیز مودال انجام می‌شود. مزیت این سرعت بیشتر از دو روش فوق و در نظر گرفتن نسبت میرایی به صورت تابعی از شماره مود می‌باشد.

فصل پنجم:

نحوه مدل سازی سازه قبل

و بعد از مقاوم سازی

۵- مراحل مدل‌سازی در نرم افزار ANSYS

۵-۱- انتخاب سیستم واحدها مناسب

Preprocessor/.../Select Units

در مدل مورد نظر سیستم واحدها بر اساس MKS در نظر گرفته شد.

جدول (۵-۱): واحدهای سیستم MKS در نرم‌افزار [۱۶]

نوع پارامتر مکانیکی	واحد در سیستم MKS	بعد
طول	m	m
نیرو	N	kg.m/s ²
زمان	s	s
جرم	kg	kg
فشار	Pa	kg/m.s ²
سرعت	m/s	m/s
شتاب	m/s ²	m/s ²
چگالی	kg/m ³	kg/m ³
تنش	Pa	kg/m.s ²
مدول یانگ	Pa	kg/m.s ²
توان	W	kg.m ² /s ³

۵-۲- انتخاب نوع المان

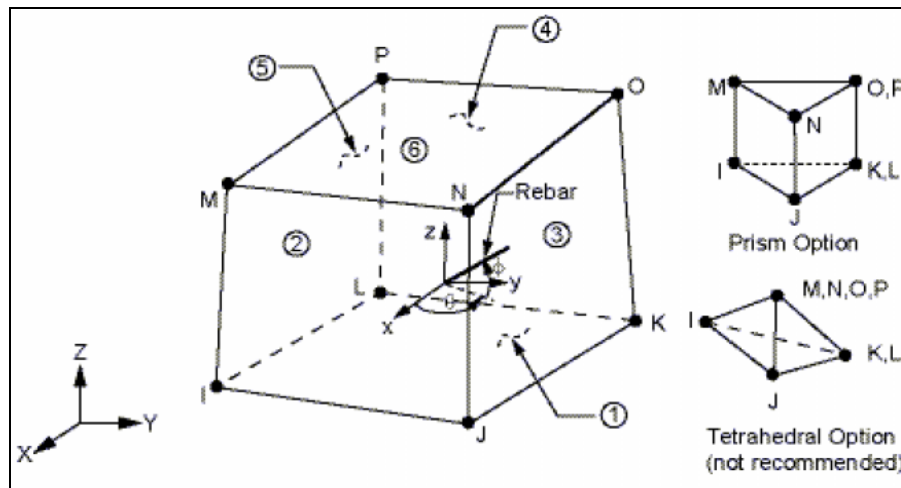
Preprocessor/Element Type

با توجه به نوع مساله المان‌های خاص با توجه به هماهنگی مناسب بین درجات آزادی المان‌ها استفاده می‌شود. به عنوان مثال در یک مساله تنش مسطحه بایستی از المان‌های غشایی استفاده شود تا حجم محاسبات و روند حل کوتاه شود. در این پایان‌نامه برای مدل کردن مناره از المان حجمی Solid65 که قابلیت مدل کردن ترک خوردگی و خرد شدن را دارد و برای مدل کردن FRP از المان لایه‌ای Solid46 استفاده شده است.

۵-۲-۱- المان Solid65

از جزء Solid65 به‌طور کلی برای مدل‌سازی احجام بتن و مصالح بنایی بدلیل نزدیکی رفتارشان به بتن استفاده می‌شود. این جزء قابلیت مدل‌سازی ترک در کشش و خردشدگی در

فشار را دارا می‌باشد. از جمله موارد دیگری که می‌توان از Solid65 استفاده نمود، مدل‌سازی مواد مرکب مسلح مانند فایبرگلاس و مواد مربوط به زمین‌شناسی نظیر سنگ می‌باشد. این جزء به وسیله هشت گره که دارای سه درجه آزادی در هر گره می‌باشد، تعریف می‌شود. که این درجات آزادی عبارتند از: انتقال در جهت‌های x ، y و z ، همچنین در این جزء می‌توان سه نوع آرماتور با خصوصیات مختلف مدل‌سازی کرد. مهمترین خصوصیت این جزء توانایی مدل‌سازی خصوصیات غیرخطی مواد می‌باشد. با استفاده از این جزء می‌توان مصالح را با قابلیت‌های ترک خوردگی در کلیه جهات، خردشدگی، تغییر شکل‌های مومسان و خزش مدل‌سازی کرد. هندسه، موقعیت گره‌ها و دستگاه مختصات برای این جزء در شکل (۵-۱) نشان داده شده است، [۱۶].



شکل (۵-۱): هندسه، موقعیت گره‌ها و دستگاه مختصات جزء Solid65 [۱۶]

این جزء توسط هشت گره و خصوصیت مواد ایزوتروپیک (همسانگرد) تعریف شده است. جزء Solid65 را تنها می‌توان برای یک ماده جامد مدل‌سازی نمود و همچنین در این جزء می‌توان سه نوع ماده برای آرماتورها تعریف نمود.

اطلاعات خصوصیات مصالح شامل ضریب انتقال برش در ترک باز، ضریب انتقال برش در ترک بسته، مقاومت کششی مصالح، مقاومت فشاری یک محوره مصالح، مقاومت فشاری دو محوره مصالح، تنش هیدرواستاتیک محصور شده، تنش خردشدگی یک محوره تحت حالت تنش هیدرواستاتیک محصور شده، تنش خردشدگی دو محوره تحت حالت تنش هیدرواستاتیک محصور شده می‌باشد که موارد فوق در قسمت معرفی معیار شکست مصالح یعنی معیار Concrete به تفصیل توضیح داده می‌شود. در اینجا قابل ذکر است که ضرایب انتقال برش در ترک‌های باز و بسته در محدوده بین صفر و یک قرار دارند. مقدار صفر برای ضرایب انتقال برش

در ترک‌های باز و بسته نشان دهنده یک ترک با لبه‌های کاملاً صاف و صیقلی می‌باشد. به عبارتی در این حالت هیچ‌گونه انتقال برشی در ترک وجود نخواهد داشت و مقدار یک برای ضرایب انتقال برش در ترک‌های باز و بسته نشان دهنده یک ترک کاملاً زبر و خشن می‌باشد. به عبارتی در این حالت کل برش در ترک انتقال پیدا می‌کند. لازم به ذکر است وقتی که جزء ترک می‌خورد و یا خرد می‌شود. یک مقدار کوچک سختی به منظور پایداری عددی به جزء اضافه می‌شود. ضریب سختی در عرض یک وجه جزء ترک خورده یا برای یک جزء خرد شده استفاده می‌شود و مقدار پیش فرض این ضریب 1×10^{-6} می‌باشد.

فرضیات و محدودیت‌های جزء Solid65 بصورت زیر می‌باشد:

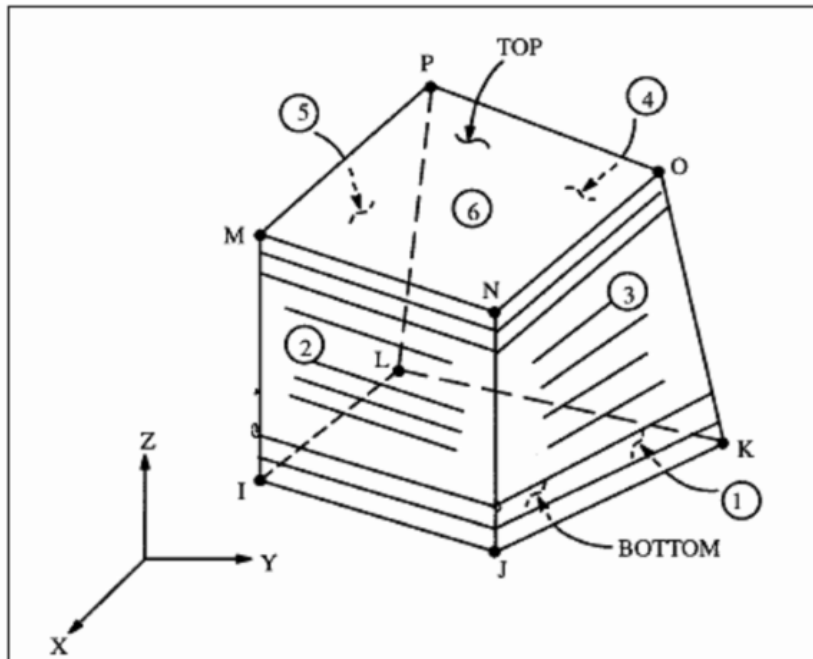
۱. در هر نقطه ترک خوردگی در سه جهت عمود بر هم مجاز می‌باشد.
۲. اگر ترک خوردگی در یک نقطه اتفاق بیفتد، بجای اینکه ترک‌ها را گسسته در نظر بگیرد، ترک خوردگی با یک تنظیم در خصوصیات مواد که بطور موثر رفتار ترک خوردگی را در یک محدوده پیوسته از ترک در نظر می‌گیرد، مدل‌سازی می‌شود.
۳. خصوصیات مصالح از ابتدا فرض می‌شود که همسانگرد باشد.
۴. علاوه بر ترک خوردگی و خردشدگی، ممکن است مصالح متحمل حالت مومسانی با سطح شکست دراگر-پراگر که معمولاً برای مصالحی نظیر بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد، شود. در این حالت خمیری شدن بتن قبل از ترک خوردگی و خرد شدن مصالح بررسی می‌شود.

۵-۲-۲- Solid46 المان

جزء Solid46 برای مدل‌سازی جامداتی استفاده می‌شود، که خاصیت لایه‌ای را دارند. جزء بوسیله هشت گره تعریف می‌شود و دارای سه درجه آزادی در هر گره می‌باشد که عبارتند از: انتقال در جهت‌های X، Y و Z این جزء قابلیت مدل‌سازی خواص غیر خطی مواد، خزش، تورم، سخت شوندگی تنش، تغییر مکان‌ها و کرنش‌های بزرگ را دارا می‌باشد، [۱۶].

این جزء قابلیت مدل‌سازی مواد غیر همسانگرد را دارا می‌باشد. جهت ماده ناهمسانگرد مطابق جهت مختصات جزء می‌باشد. دارای سه درجه آزادی در هر گره می‌باشد. و برای مدل‌سازی پوسته‌های ضخیم لایه‌ای یا مواد لایه‌ای سه بعدی (Solid) به کار می‌رود و تا ۲۵۰ لایه با ضخامت یکسان در هر المان و ۲۵ لایه با ضخامت متغیر به طور خطی در المان را می‌تواند مدل‌سازی کند. شکل (۵-۲) هندسه و موقعیت گره‌ها را برای این المان نشان می‌دهد.

برای مدل‌سازی مواد مرکب از این نوع المان استفاده شده است. مدل‌سازی مواد مرکب از مدل‌سازی مواد معمولی نظیر آهن و فولاد قدری مشکل‌تر است. بنابراین باید در مدل‌سازی مواد مرکب نهایت دقت در معرفی خواص و جهات لایه‌ها به کار رود زیرا که هر لایه می‌تواند جهت و خواص ارتوتروپیک خاص خود را دارا باشد.



شکل (۵-۲): هندسه، موقعیت گره‌ها و دستگاه مختصات جزء Solid46 [۱۶]

۳-۵- تعیین ثوابت حقیقی

Preprocessor/Real constant

برای هر المان می‌توان ثابت حقیقی مربوطه به آن را تعریف کرد. به عنوان مثال برای المان مصالح بنایی Solid65 می‌توان وجود (به صورت پخشی^۱) و یا عدم وجود میلگرد را به عنوان یک ثابت حقیقی و ضخامت و تعداد لایه‌ها و زاویه قرارگیری FRP را برای Solid46 را نیز با یک ثابت حقیقی تعریف کنیم.

۴-۵- تعریف خصوصیات و رفتار مکانیکی مواد

Preprocessor/.../Material Models

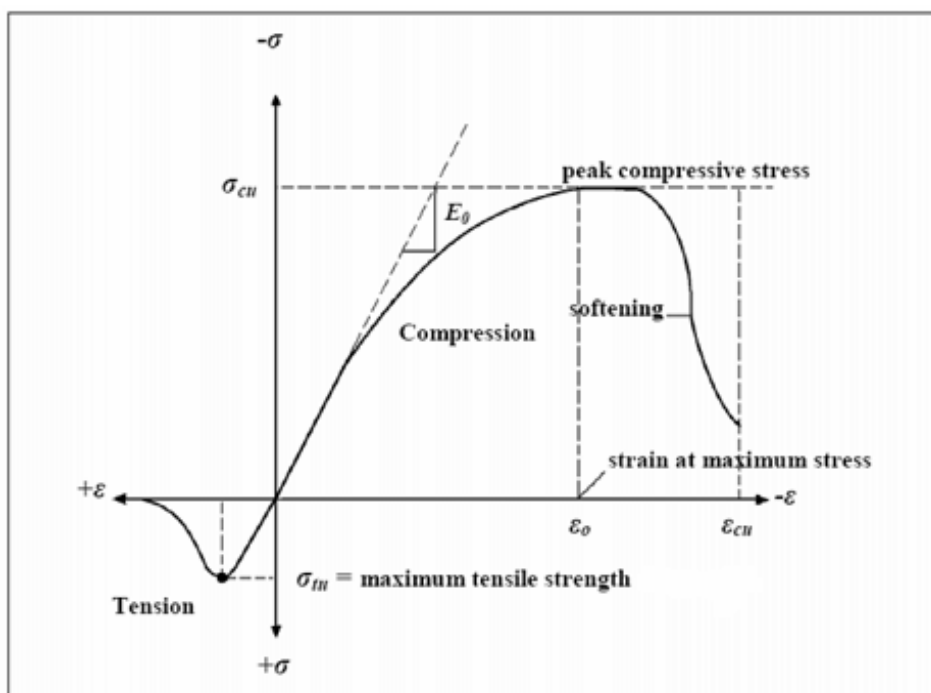
برای تحلیل باید خواص ماده المان‌های ایجاد شده روی مدل معلوم باشد. بطور معمول این خواص شامل جنس، خصوصیات مکانیکی و حرارتی آن می‌باشد.

¹ Smeard

در این بخش خواص مواد به کار رفته در مدل که عبارتند از: مصالح بنایی و مواد مرکب، بررسی می‌شود.

۵-۴-۱- مدل رفتاری مصالح بنایی

مصالح بنایی موادی هستند که دارای مقاومت نسبتاً خوبی در فشار هستند و از اینرو استفاده از آنها برای قطعات تحت فشار مانند: ستون‌ها، دیوارها و قوس‌ها مناسب است، لیکن علی‌رغم مقاومت فشاری مناسب، مقاومت کششی کم و شکنندگی (همانند بتن)، استفاده از آن را برای قطعاتی که کامل یا بطور موضعی تحت کشش هستند محدود می‌نماید. از آنجایی که مصالح بنایی موادی شکننده بوده و رفتار آنها در ناحیه کششی و فشاری متفاوت است، ارائه یک مدل عددی مناسب برای مشخص کردن رفتار این ماده امری مشکل است. در شکل (۳-۵) منحنی تنش- کرنش مصالح بنایی نشان داده شده است، [۱۶].



شکل (۳-۵): مدل رفتاری مصالح بنایی [۱۶]

همان‌طور که در تصویر مشاهده می‌شود، در ناحیه فشاری، تقریباً تا حدود ۳۰ درصد ماکزیمم مقاومت فشاری مصالح بنایی، رفتار منحنی خطی و الاستیک بوده، پس از این مرحله تنش به تدریج تا زمانی که مصالح به ماکزیمم مقاومت فشاری خود برسد افزایش یافته، سپس با ورود منحنی داخل یک ناحیه نرم تنش نیز کاهش می‌یابد و سرانجام گسیختگی در اثر خرد شدن در

کرنش نهایی (ϵ_{cu}) اتفاق می‌افتد. از طرفی مقاومت کششی مصالح بنایی حدود ۸ تا ۱۵ درصد مقاومت فشاری آن است و در ناحیه کششی رفتار منحنی تنش-کرنش تا ماکزیمم مقاومت کششی، تقریباً خطی و الاستیک بوده، پس از آن مصالح ترک خورده و مقاومتش به تدریج کم می‌شود تا اینکه به مقدار صفر برسد.

جدول (۵-۲): مشخصات مصالح بنایی در نظر گرفته شده در مدل [۱۷]

مشخصه فیزیکی	ملاط	آجر	میانگین
مدول الاستیسیته (E) (GPa)	۳/۹	۶	۵/۲
ضریب پواسون (ν)	۰/۳	۰/۲۵	۰/۳

۵-۴-۱-۱- داده‌های ورودی مدل اجزاء محدود برای مصالح بنایی

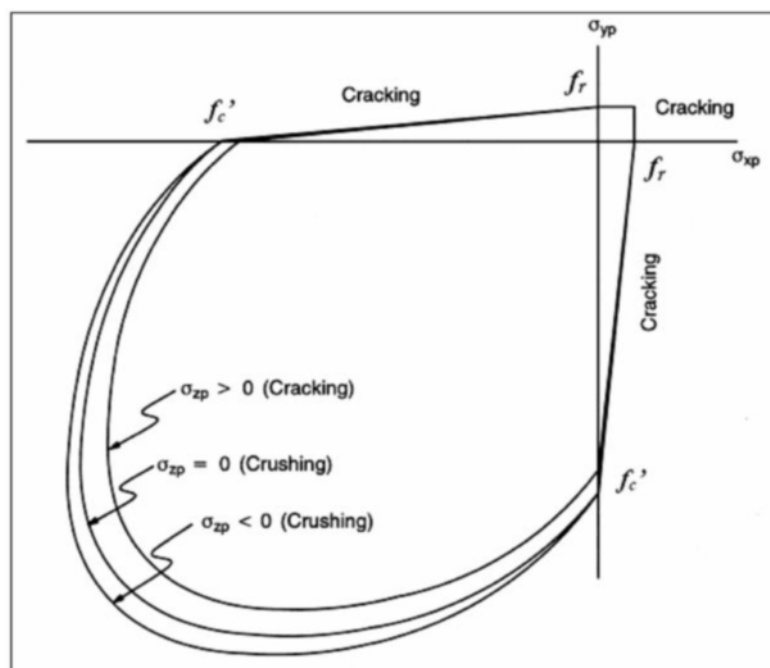
به یک سری اطلاعات برای مشخص کردن نوع ماده در مدل سازی مصالح بنایی به وسیله نرم افزار ANSYS نیاز داریم این اطلاعات عبارتند از:

۱. مدول الاستیسیته (E)
 ۲. مقاومت فشاری نهایی (f_c)
 ۳. مقاومت کششی نهایی (مدول گسیختگی (f_t))
 ۴. ضریب پواسون (ν)
 ۵. ضرایب انتقال برش برای ترک باز و ترک بسته (β_c و β_t)
 ۶. روابط تنش-کرنش در حالت تک محوری و فشاری برای مصالح
- در این مدل، مقاومت کششی مصالح بنایی برابر ۱ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و مقاومت فشاری تک محوره مصالح برابر ۷۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع می‌باشد.
- مقدار ضریب پواسون نیز برابر ۰/۳ در نظر گرفته شد. ضرایب انتقال برش (β) نشان دهنده شرایط سطح ترک در یک المان است و دامنه تغییراتش بین صفر تا یک می‌باشد زمانی که دو طرف ترک نسبت به هم بلغزند یا به اصطلاح سطح ترک صاف باشد، مقدار (β_t) کم بوده و تقریباً برابر صفر در نظر گرفته می‌شود ولی در صورتیکه دو طرف ترک با یکدیگر اصطکاک داشته و به اصطلاح سطح ترک زبر باشد مقدار (β_t) برابر یک است. در این پژوهش ضریب انتقال برش برای ترک‌های باز برابر ۰/۳ و برای ترک‌های بسته برابر ۰/۹ در نظر گرفته شده است.

۵-۴-۱-۲- معیار گسیختگی ۲ مصالح بنایی

حالات گسیختگی مصالح بنایی شامل ترک خوردن و خرد شدن است و یک مدل دقیق باید توانایی پیش بینی سطح شکست را برای چنین ماده‌ای داشته باشد. از آنجایی که گسیختگی مصالح ناشی از حالت تنش چند محوری است، لذا برای تعیین یک سطح شکست مناسب برای عضو هر دو پارامتر مقاومت فشاری نهایی و مقاومت کششی نهایی مصالح مورد نیاز می‌باشند.

در شکل (۴-۵) یک سطح شکست سه بعدی برای مصالح بنایی نشان داده شده است. تنش‌های اصلی غیر صفر، تنش‌هایی هستند که در جهت‌های X و Y قرار دارند و به وسیله σ_{xp} و σ_{yp} نمایش داده می‌شوند مد گسیختگی تابعی از σ_{zp} (تنش اصلی در جهت Z) می‌باشد. به عنوان مثال اگر σ_{yp} و σ_{xp} هر دو منفی (فشاری) و σ_{zp} مثبت (کششی) باشد، عضو در اثر ترک خوردن در سطحی عمود بر سطح σ_{zp} از بین می‌رود ولی چنانچه σ_{zp} صفر و یا منفی باشد نابودی مصالح در اثر خرد شدن می‌باشد، [۱۶].



شکل (۴-۵): سطوح شکست سه بعدی مصالح بنایی [۱۶]

در یک المان زمانی که تنش‌های کششی در همه جهات بیرون سطح شکست قرار بگیرد، ترک ایجاد شده و مدول الاستیک المان در جهتی موازی با جهت تنش اصلی کششی صفر

² Failure Criteria

می شود ولی در صورتی که همه تنش های اصلی فشاری بوده و بیرون سطح شکست قرار بگیرند المان خرد شده و در نتیجه مدول الاستیک در همه جهت ها صفر، و المان از بین می رود.

۵-۴-۲- مدل رفتاری FRP

رفتار FRP به صورت خطی و ارتوتروپیک خاص در نظر گرفته می شود. به عبارت دیگر مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و مدول برشی در جهت اصلی با دو جهت متعامد دیگر متفاوت بوده و از ضوابط مصالح ارتوتروپیک پیروی می کنند. و این به این معنی است که الیاف در جهت X قرار گرفته و جهت های Y و Z عمود بر جهت X می باشند. از طرفی مشخصات مواد نیز در جهت های Y و Z یکسان است.

۵-۴-۲-۱- داده های ورودی مدل اجزاء محدود برای مصالح FRP

۱. تعداد لایه ها
 ۲. ضخامت هر لایه
 ۳. جهت قرار گیری الیاف برای هر لایه
 ۴. مدول های الاستیسیته مواد مرکب در سه جهت (E_x, E_y, E_z)
 ۵. مدول های برشی مواد مرکب در سه جهت (G_{xy}, G_{yz}, G_{xz})
 ۶. ضریب پواسون برای سه جهت $(\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{xz})$
 ۷. اختصاص دادن معیار شکست
- در جدول (۵-۳)، مشخصات ماده مرکبی که در این مدل استفاده شده آمده است.

جدول (۵-۳): مشخصات مواد مرکب [۱۸]

نوع ماده	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون	مقاومت کششی (GPa)	مدول برشی (GPa)	ضخامت (mm)
CFRP	$E_x=181$	$\nu_{xy}=0/28$	۱/۵	$G_{xy}=7/2$	۰/۱۳
	$E_y=10/3$	$\nu_{yz}=0/52$		$G_{yz}=4/3$	
	$E_z=10/3$	$\nu_{xz}=0/28$		$G_{xz}=7/2$	

۵-۴-۲-۲- اختصاص دادن معیار شکست FRP

- در نرم افزار ANSYS، ۳ معیار شکست لایه ها بعلاوه معیار شکست تعیین شده کاربر^۳ را می توان در بررسی تخریب لایه ها به کار برد این معیارها عبارتند از:
۱. معیار شکست بر اساس ماکزیم کرنش ها

³ User Written Criteria

۲. معیار شکست بر اساس ماکزیم تنش‌ها

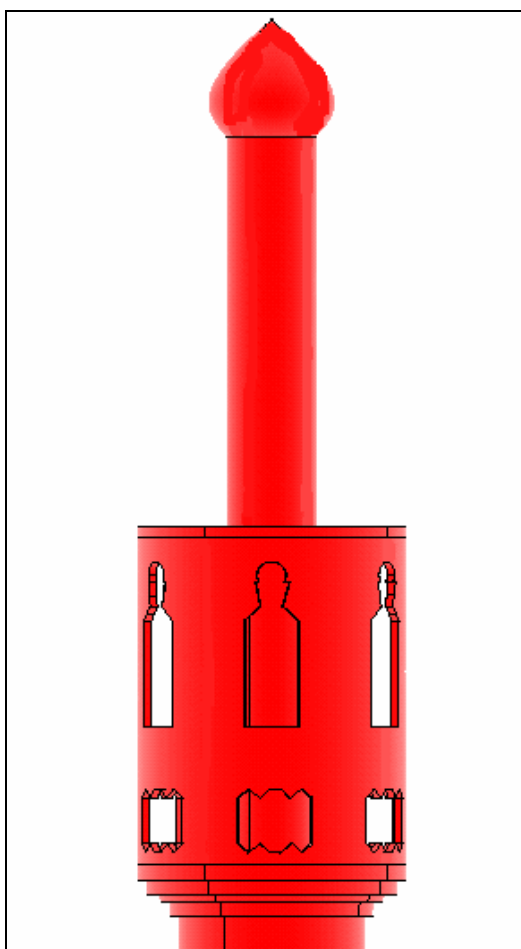
۳. معیار شکست Tsai-Wu

از آنجایی که مواد FRP بکار رفته در مدل مورد مطالعه از نوع یک جهته هستند موثرترین عامل در گسیختگی آن‌ها به وجود آمدن تنش‌های کششی بیشتر از مقاومت کششی‌شان است بنابراین معیار شکست برای مدل مورد نظر بر اساس تنش ماکزیمم در نظر گرفته شد.

۵-۵- ایجاد هندسه سازه

Preprocessor/.../Modeling

برای ایجاد هندسه سازه اصلی بدلیل پیچیدگی‌های آن در مدل‌سازی قسمت فوقانی مناره از مدل‌سازی مستقیم در خود نرم‌افزار ANSYS استفاده نشد. برای این کار هندسه مدل در نرم‌افزار AutoCAD ایجاد شد و با اختصاص دادن حجم و خصوصیات به آن هندسه اصلی سازه ایجاد شد.



شکل (۵-۵): مدل هندسی ساخته شده در AutoCAD [۱۷]

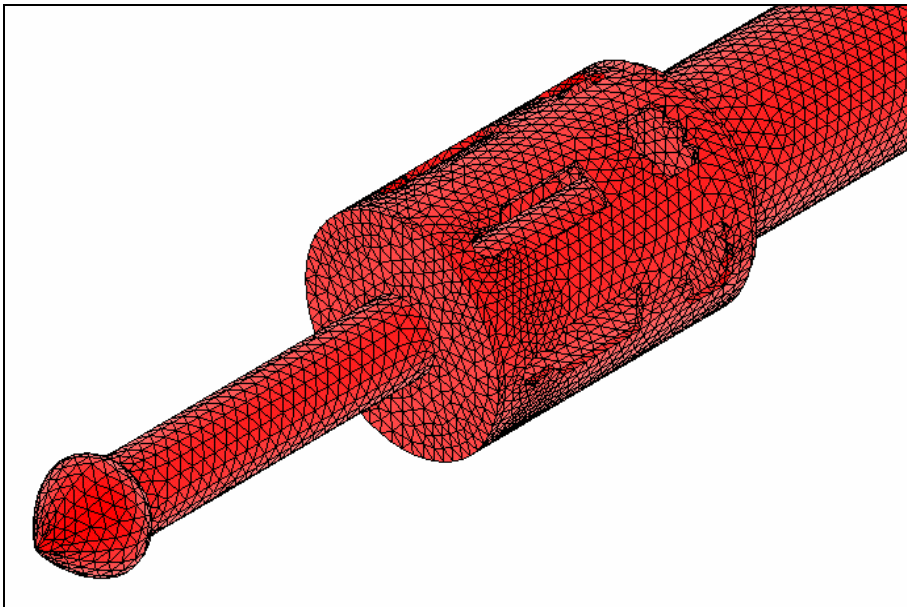
Preprocessor/.../Modeling/.../Cylinder

برای قسمت اضافه شده جهت مقاوم سازی با ایجاد یک استوانه در قسمت پایینی مناره (استوانه‌ای) حجم مورد نیاز ایجاد شد.

۵-۶- مش بندی^۴ اجسام موجود

Preprocessor/.../Meshing

یکی از مهمترین مراحل مدل سازی اجزاء محدود در نرم افزار ANSYS مش بندی مدل است. مش بندی به دو صورت آزاد^۵ (نامنظم) و منظم^۶ انجام می شود که در حالت آزاد مش بندی به صورت خود کار و توسط خود نرم افزار انجام می شود و در حالت منظم با تعیین تعداد تقسیمات بر روی اجسام توسط کاربر تعداد و شکل المانها را مشخص می کند. در این تحقیق بدلیل اینکه گره ها باید بر یکدیگر منطبق شوند تا بتوان المانهای مصالح بنایی و مواد کامپوزیت را به هم متصل کرد، از روش منظم برای مش بندی استفاده شده است.

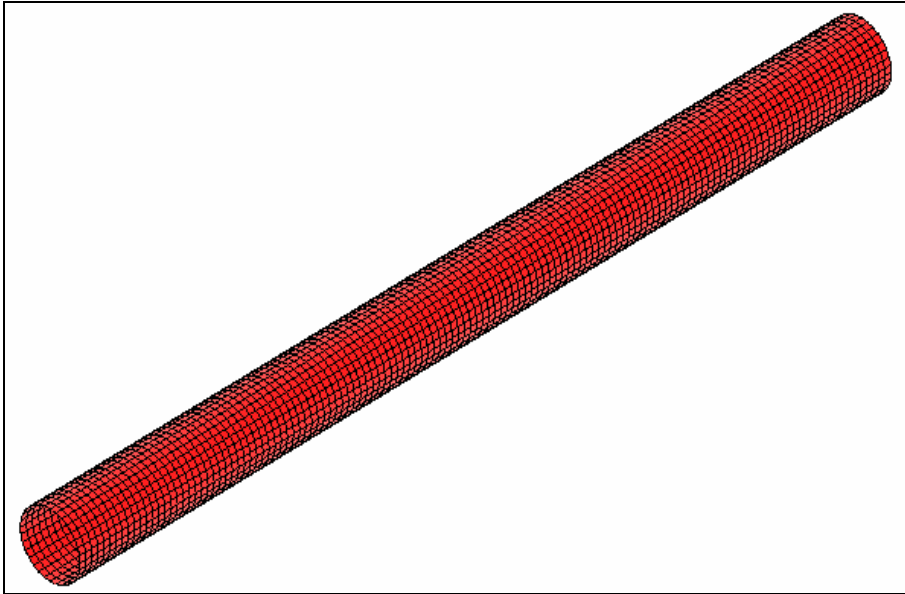


شکل (۵-۶): مش بندی سازه مناره

⁴ Meshing

⁵ Free

⁶ Mapped



شکل (۵-۷): مش بندی المان FRP

۵-۷-۲ آنالیز (تحلیل)

Solution/ Analysis Type

در این پایان‌نامه برای بررسی رفتار سازه آنالیز تاریخچه زمانی، که در زیر توضیح داده شده است، روی مناره انجام شد.

۵-۷-۲-۷ آنالیز تاریخچه زمانی^۷

Solution/ Analysis Type/.../ Transient

به منظور بدست آوردن رفتار دقیق سازه مناره مورد بررسی، در این پایان‌نامه از آنالیز دینامیکی گذرا (تاریخچه زمانی) استفاده شده است.

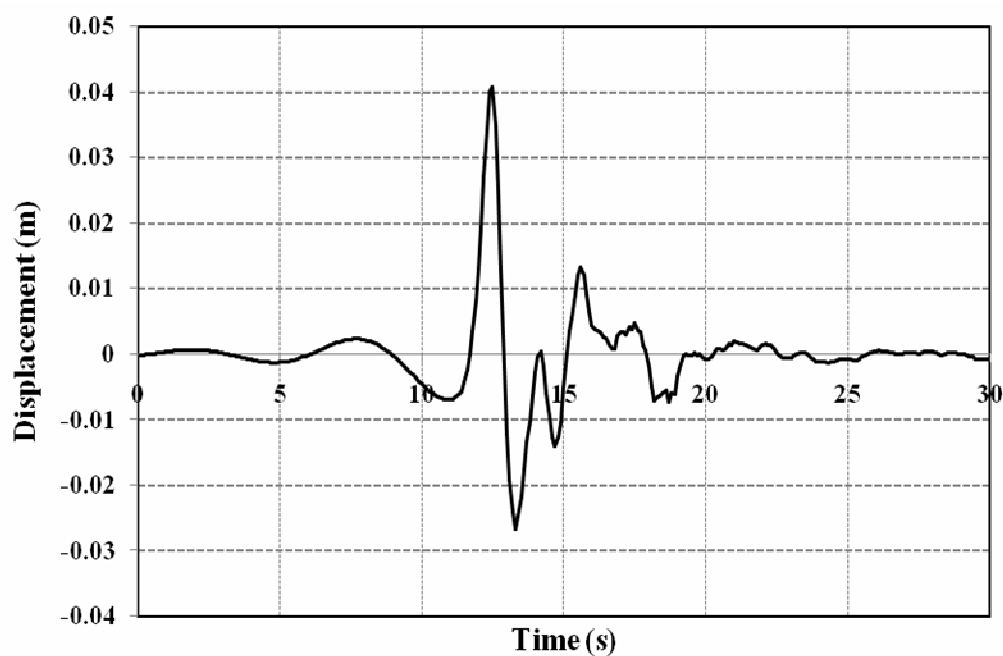
برای این منظور سازه مورد نظر تحت سه زلزله بم، طبس و زرنند آنالیز تاریخچه زمانی شده و با توجه به خصوصیات غیرخطی تعریف شده، نتایج حاصل تفسیر دقیق‌تری نسبت به روش‌های آنالیز قبلی ارائه می‌کند.

برای بدست آوردن مقادیر زلزله بر حسب تغییر مکان-زمان و ورود آن به نرم افزار، ابتدا ضریب $\frac{AI}{R} g = 1.009$ را در شتابنگاشت مقیاس شده به یک را ضرب و سپس از شتابنگاشت زلزله مورد نظر در نرم افزار SeismoSignal دوبار انتگرال‌گیری کرده و مقادیر شتاب تبدیل به تغییر مکان بر حسب زمان شده است. برای وارد کردن زلزله مقادیر به صورت تغییر مکان متغیر با زمان به پای سازه وارد شده و تحت این جابجایی‌های اعمالی سازه تحلیل می‌شود.

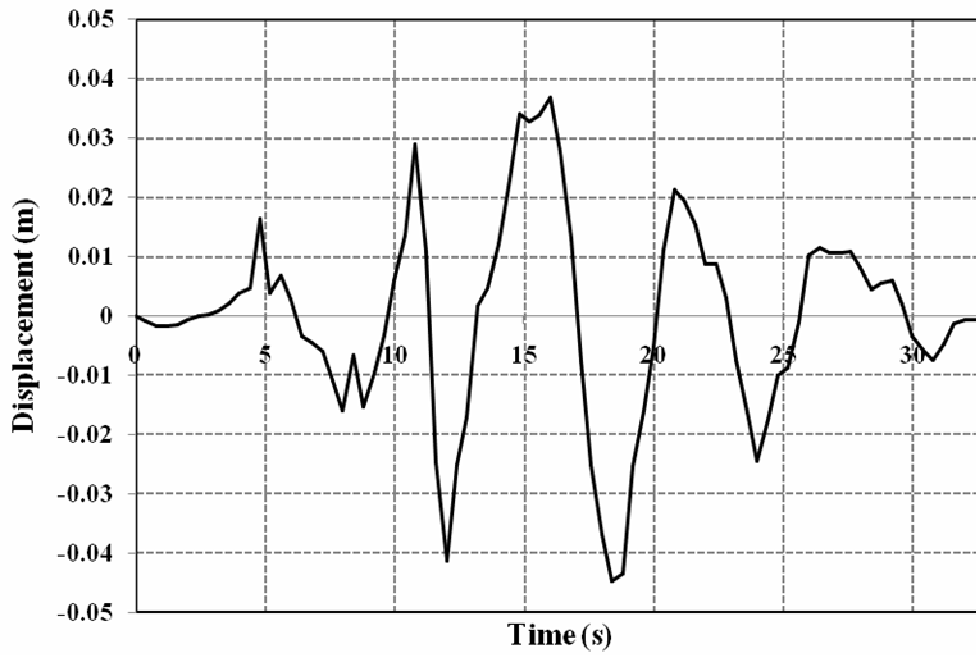
⁷ Time-History Analyze

جدول (۵-۴): پارامترهای ضریب زلزله

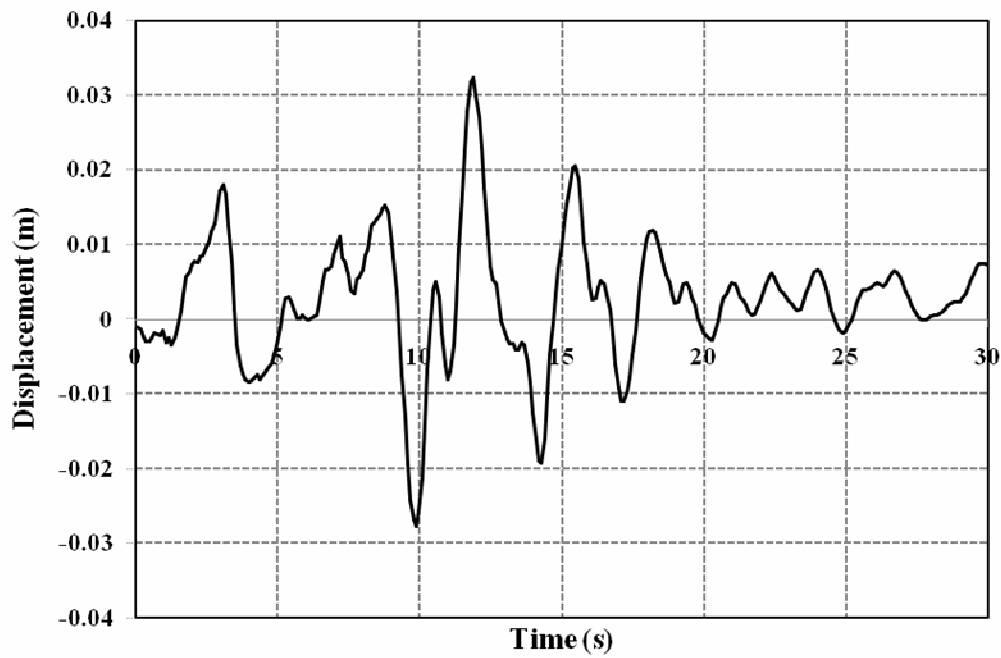
پارامتر	مقدار	توضیحات
نسبت شتاب مبنای طرح (A)	۰/۳	برای منطقه با خطر نسبی زیاد
ضریب رفتار سازه (R)	۳/۵	برای سازه غیر ساختمانی (سایر سازه‌ها)
ضریب اهمیت ساختمان (I)	۱/۲	برای ساختمان‌های تاریخی
شتاب گرانشی زمین (g)	۹/۸۱	



شکل (۵-۸): زلزله بیم بر حسب تغییر مکان-زمان



شکل (۹-۵): زلزله طیس بر حسب تغییر مکان-زمان



شکل (۱۰-۵): زلزله زرنند بر حسب تغییر مکان-زمان

برای حل تاریخچه زمانی از روش کامل^۸ در این پایان‌نامه استفاده شده است.

^۸ Full Method

فصل ششم:

نتایج مدل سازی

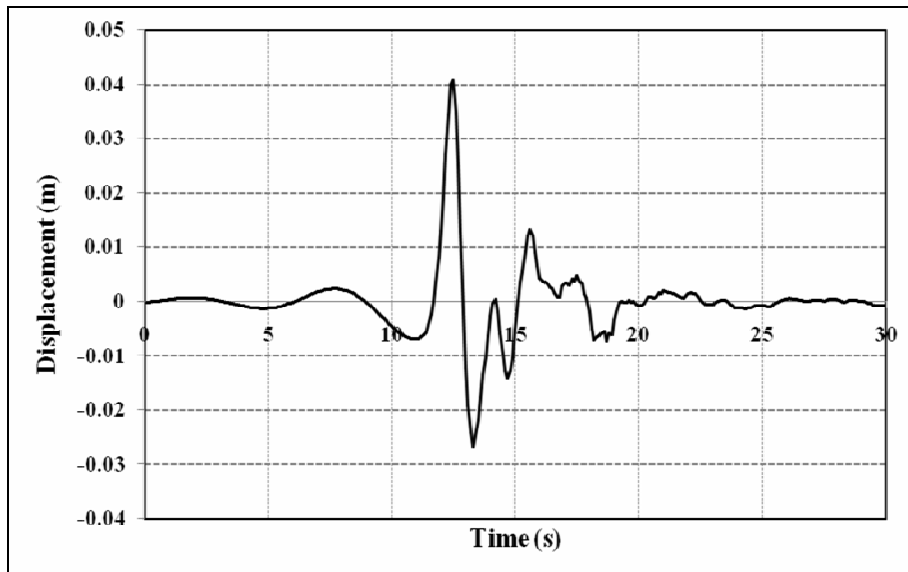
و مقاوم سازی

۶-۱- نتایج تحلیل تاریخچه زمانی زلزله بیم

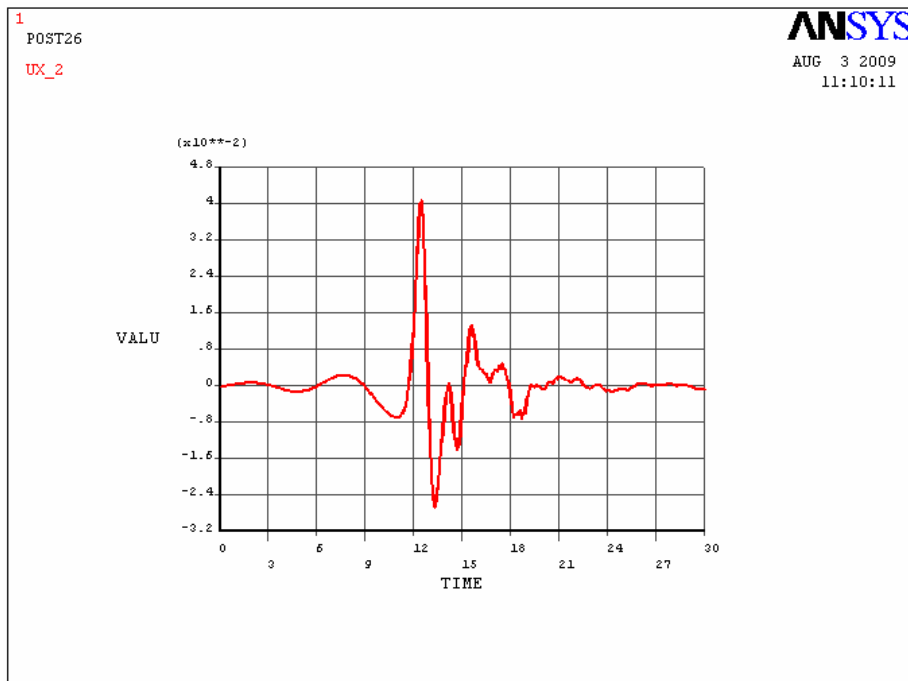
در این قسمت نتایج حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی برای زلزله بیم ارائه می شود.

۶-۱-۱- زلزله بیم

مقادیر زلزله بیم خروجی از نرم افزار SeismoSignal و تغییر مکان اعمال شده به پای مناره در شکل زیر آمده است:

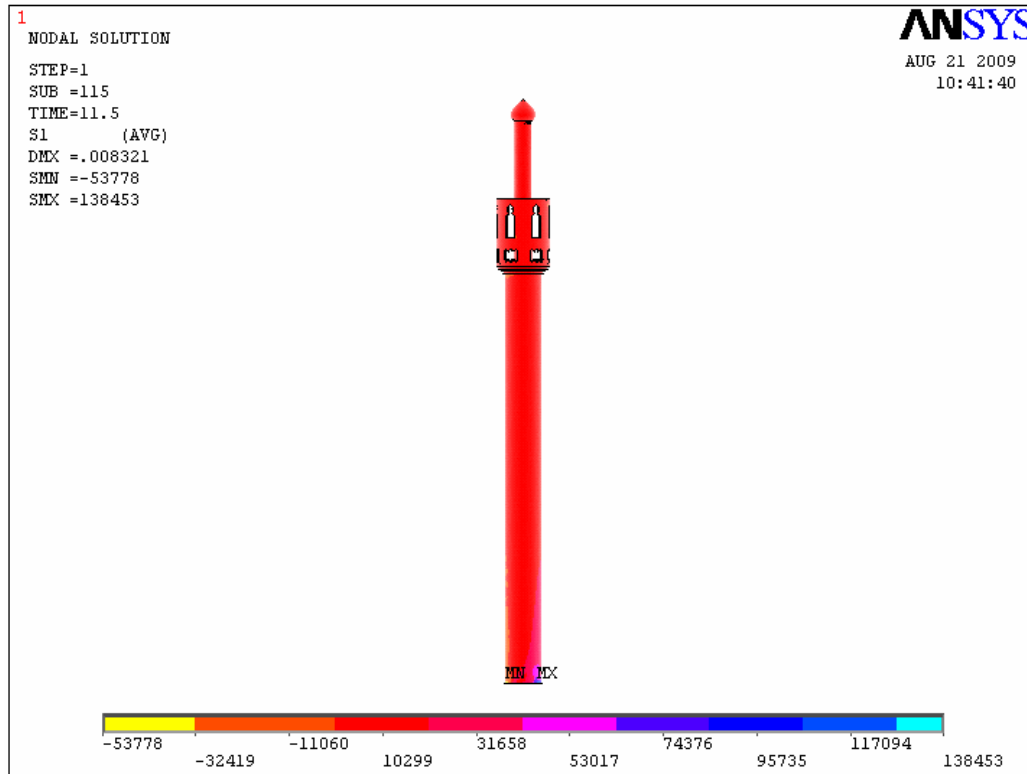


شکل (۶-۱): زلزله بیم بر حسب تغییر مکان زمان خروجی از SeismoSignal

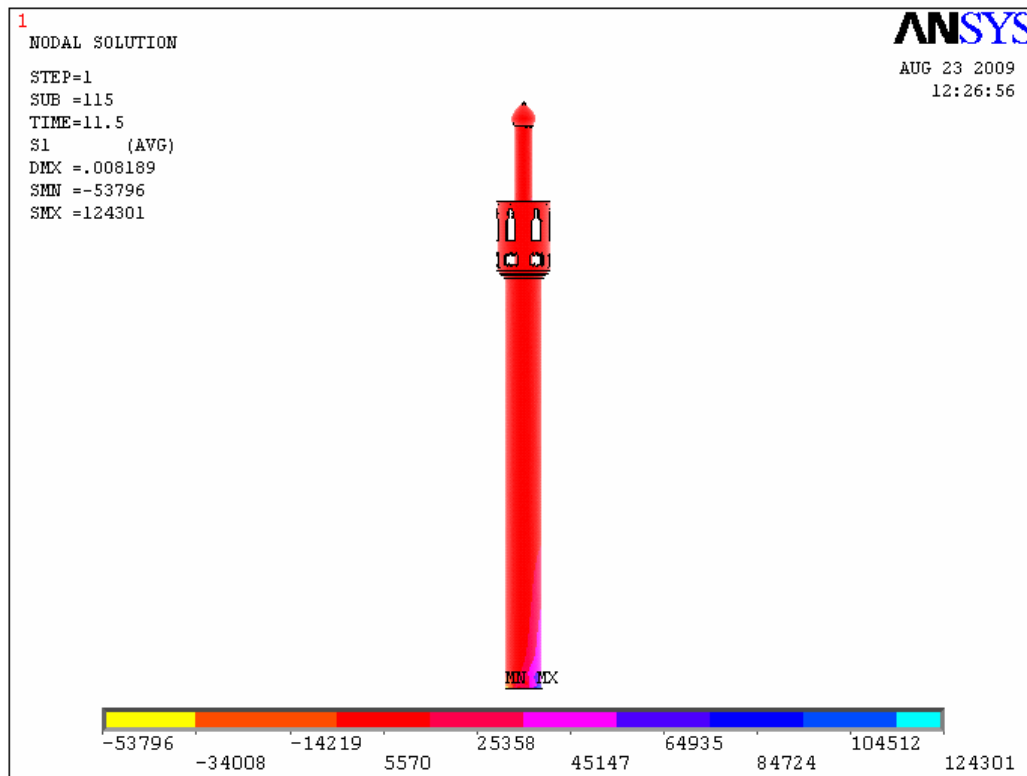


شکل (۶-۲): زلزله بیم اعمال شده به تکیه گاه سازه

۶-۱-۲- تنش اصلی در جهت یک در ثانیه ۱۱/۵ زلزله بیم

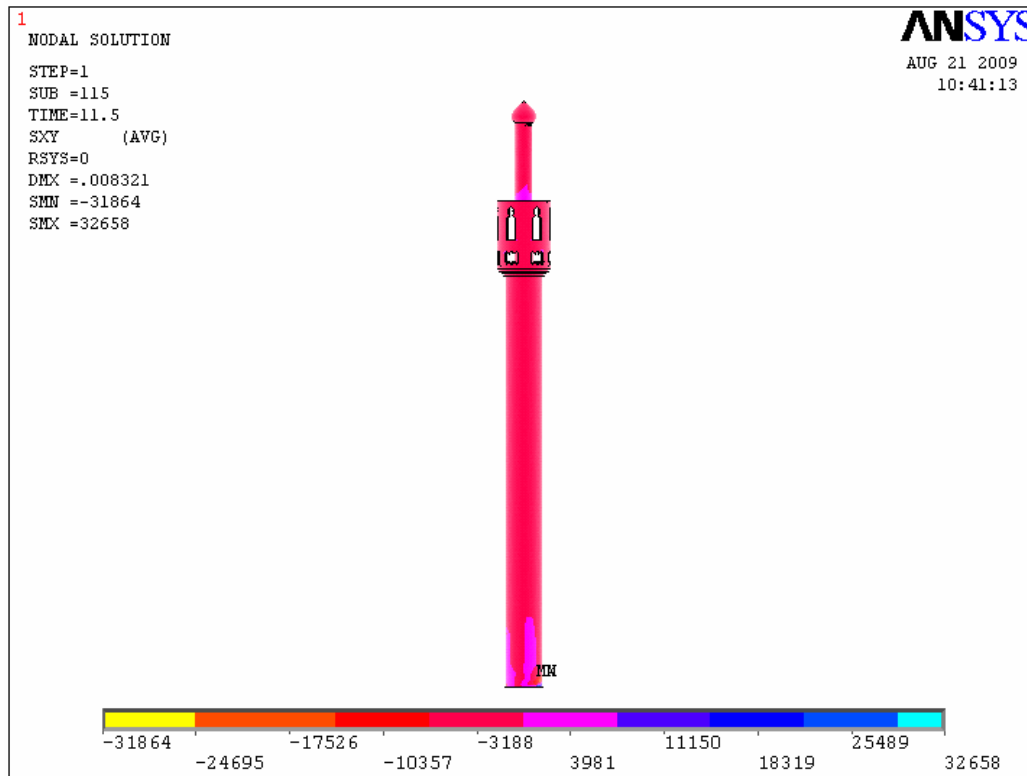


شکل (۶-۳): تنش اصلی جهت یک در ثانیه ۱۱/۵ (شروع ترک خوردگی) قبل از مقاوم سازی

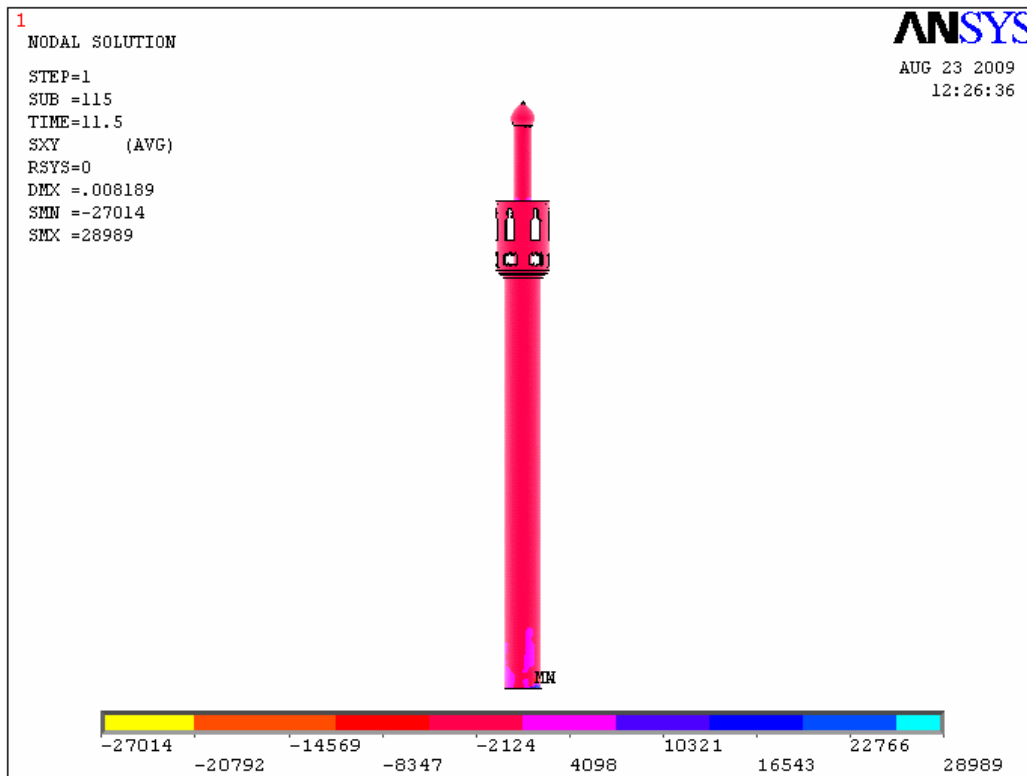


شکل (۶-۴): تنش اصلی جهت یک در ثانیه ۱۱/۵ (شروع ترک خوردگی) بعد از مقاوم سازی

۳-۱-۶- تنش برشی در جهت یک در ثانیه ۱۱/۵ زلزله بیم

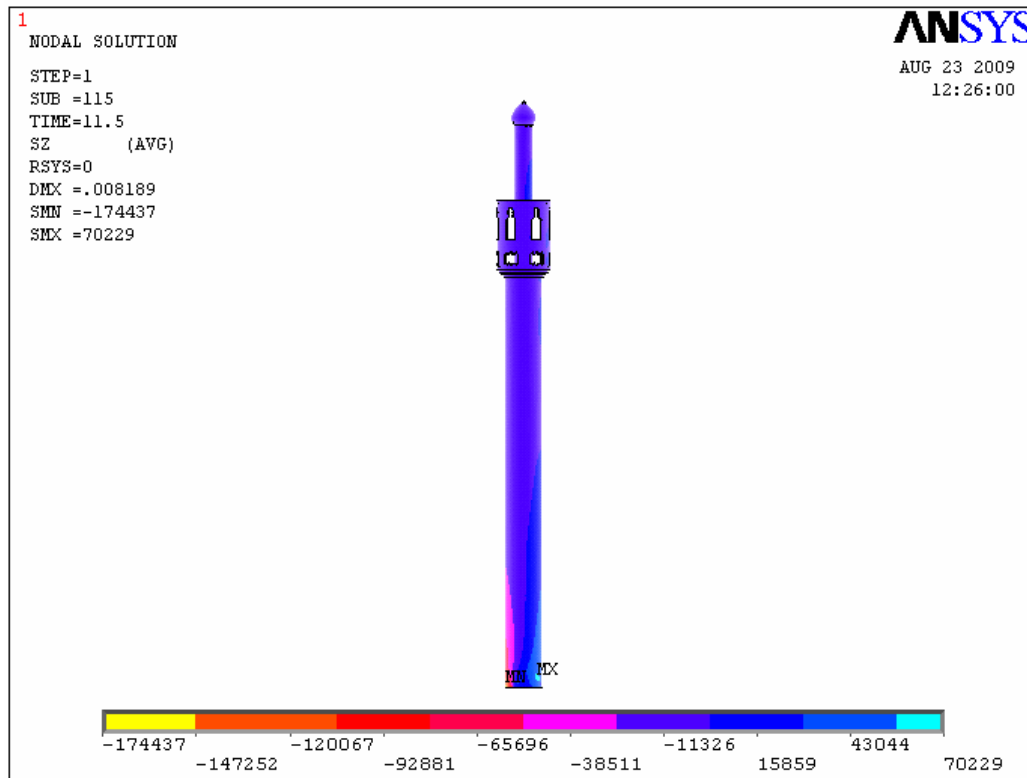


شکل (۵-۶): تنش برشی در ثانیه ۱۱/۵ (شروع ترک خوردگی) قبل از مقاوم سازی

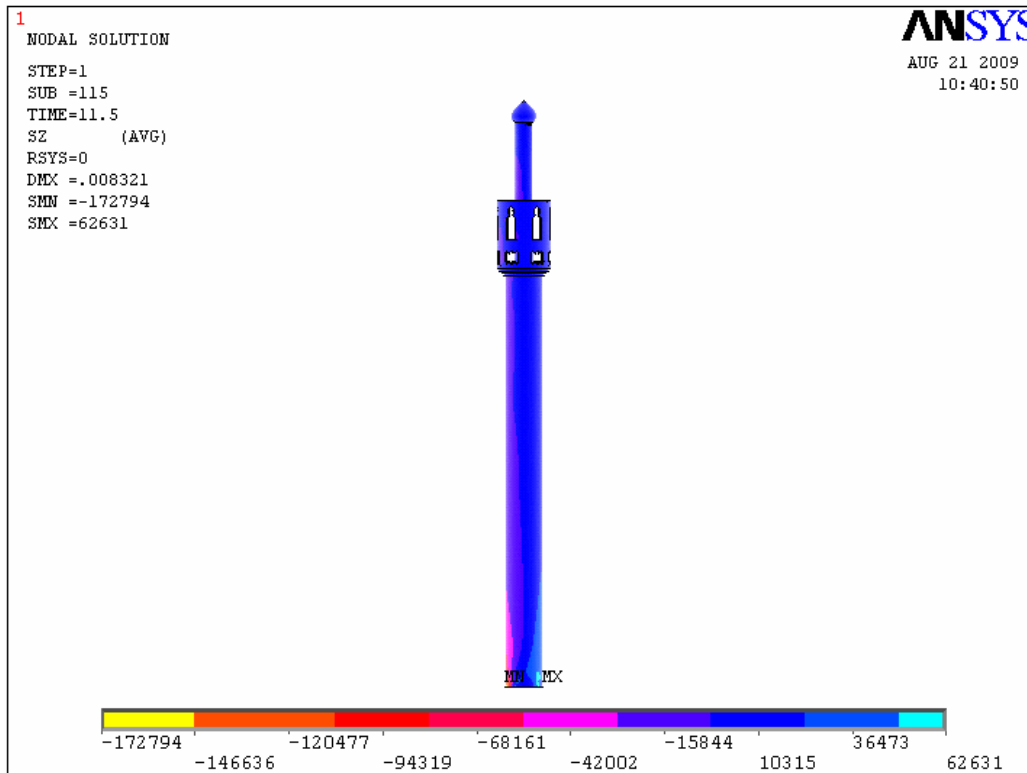


شکل (۶-۶): تنش برشی در ثانیه ۱۱/۵ (شروع ترک خوردگی) بعد از مقاوم سازی

۶-۱-۴ تنش قائم در جهت یک در ثانیه ۱۱/۵ زلزله بم



شکل (۶-۷): تنش قائم در ثانیه ۱۱/۵ (شروع ترک خوردگی) قبل از مقاوم سازی

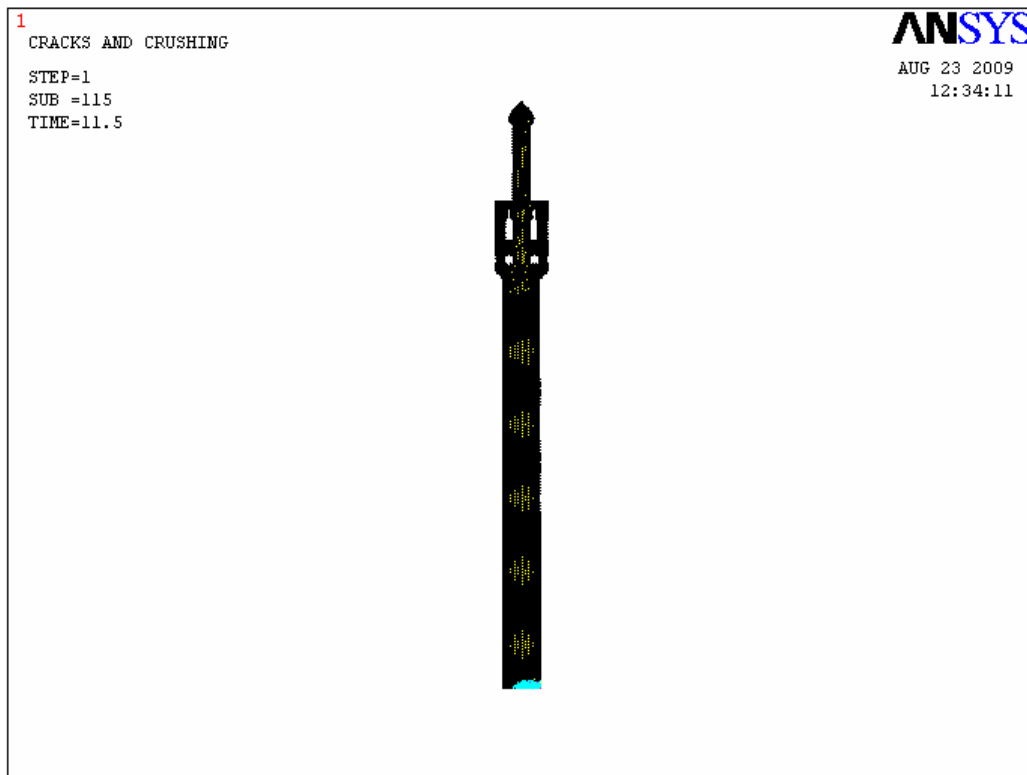


شکل (۶-۸): تنش قائم در ثانیه ۱۱/۵ (شروع ترک خوردگی) بعد از مقاوم سازی

۶-۱-۵- ترک خوردگی مناره در ثانیه ۱۱/۵ زلزله بیم



شکل (۶-۹): شروع ترک خوردگی مناره در ثانیه ۱۱/۵ قبل از مقاوم سازی



شکل (۶-۱۰): شروع ترک خوردگی مناره در ثانیه ۱۱/۵ بعد از مقاوم سازی

جدول (۶-۱): تنش های قبل و بعد از مقاوم سازی زلزله بم در تانیه ۱۱/۵

بعد از مقاوم سازی		قبل از مقاوم سازی		نوع تنش
مینیمم	ماکزیمم	مینیمم	ماکزیمم	
-۱۷۲۷۹۴	۶۲۶۳۱	-۱۷۴۴۳۷	۷۰۲۲۹	تنش قائم
-۲۷۰۱۴	۲۸۹۸۹	-۳۱۸۶۴	۳۲۶۵۸	تنش برشی
-۵۳۷۹۶	۱۲۴۳۰۱	-۵۳۷۷۸	۱۳۸۴۵۳	تنش اصلی ۱

واحد تنش ها بر حسب پاسکال می باشد ($1 \text{ Pa} = 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$).

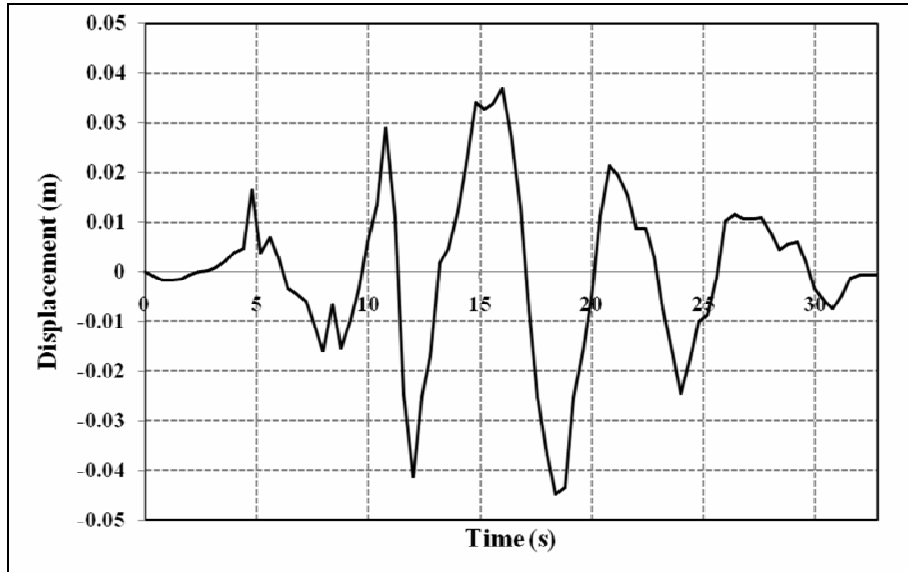
در تنش قائم و تنش اصلی ماکزیمم برای کشش و مینیمم برای فشار می باشد.
تنش ها و ترک خوردگی های نشان داده شده در لحظه واگرا شدن حل می باشد.

۲-۶- نتایج تحلیل تاریخچه زمانی زلزله طبس

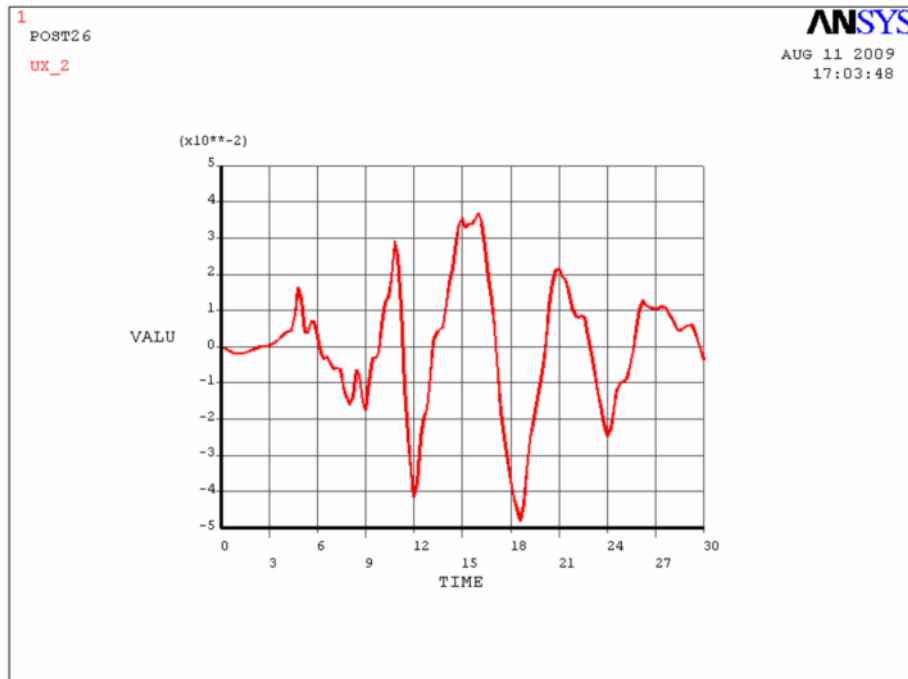
در این قسمت نتایج حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی برای زلزله طبس ارائه می شود.

۱-۲-۶- زلزله طبس

مقادیر زلزله طبس خروجی از نرم افزار SeismoSignal و تغییر مکان اعمال شده به پای مناره در شکل زیر آمده است:

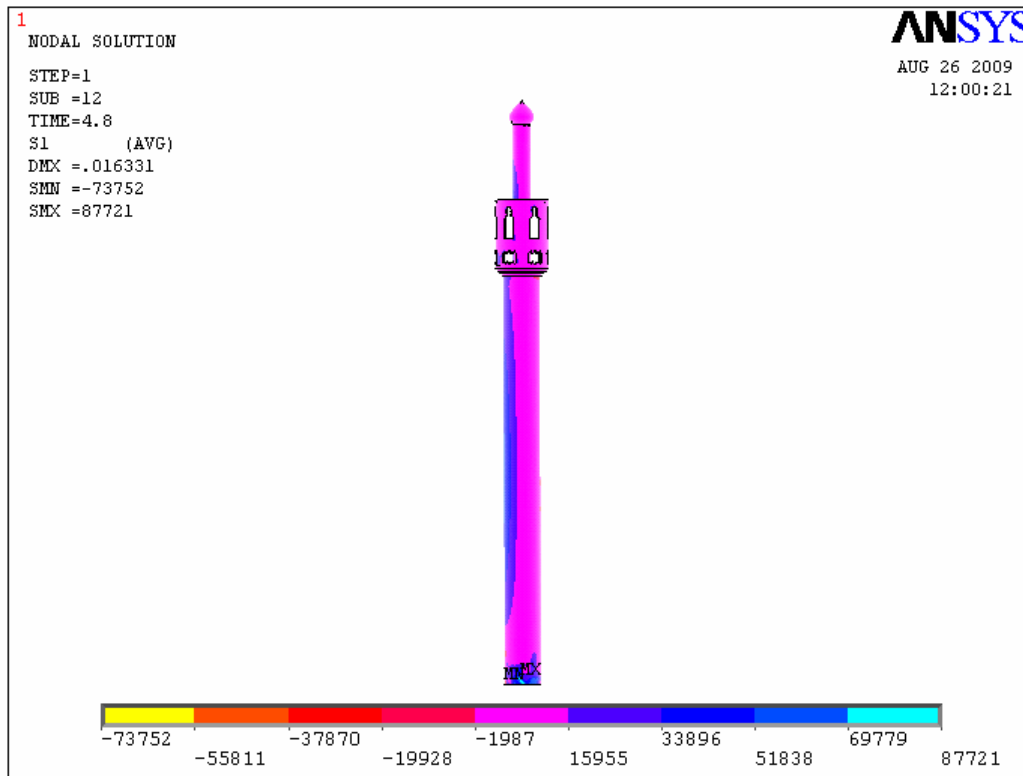


شکل (۶-۱۱): زلزله طبس بر حسب تغییر مکان زمان خروجی از SeismoSignal

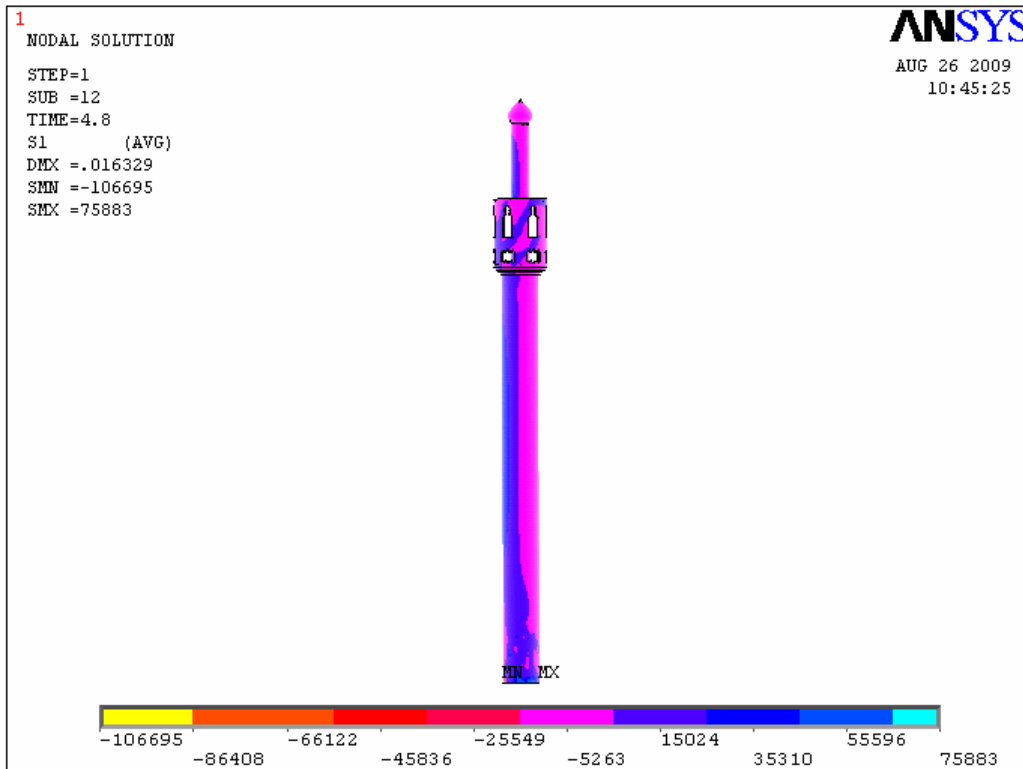


شکل (۶-۱۲): زلزله طبس اعمال شده به تکیه گاه سازه

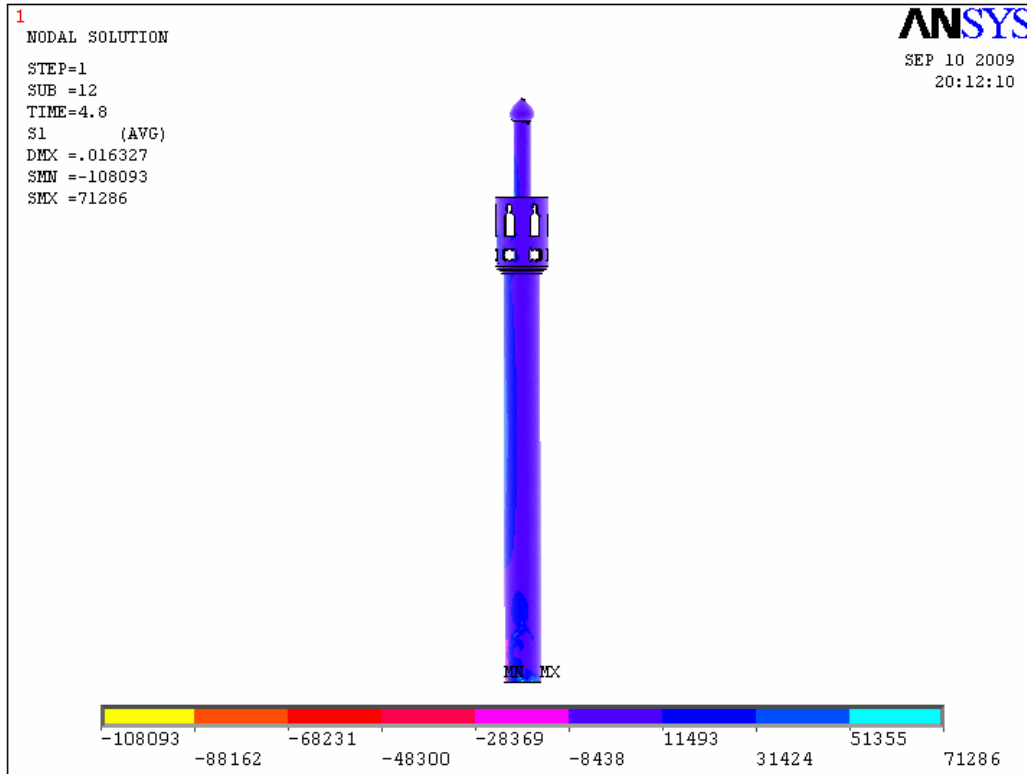
۶-۲-۲- تنش اصلی در جهت یک در ثانیه ۴/۸ زلزله طبرس



شکل (۶-۱۳): تنش اصلی جهت یک در ثانیه ۴/۸ قبل از مقاوم سازی

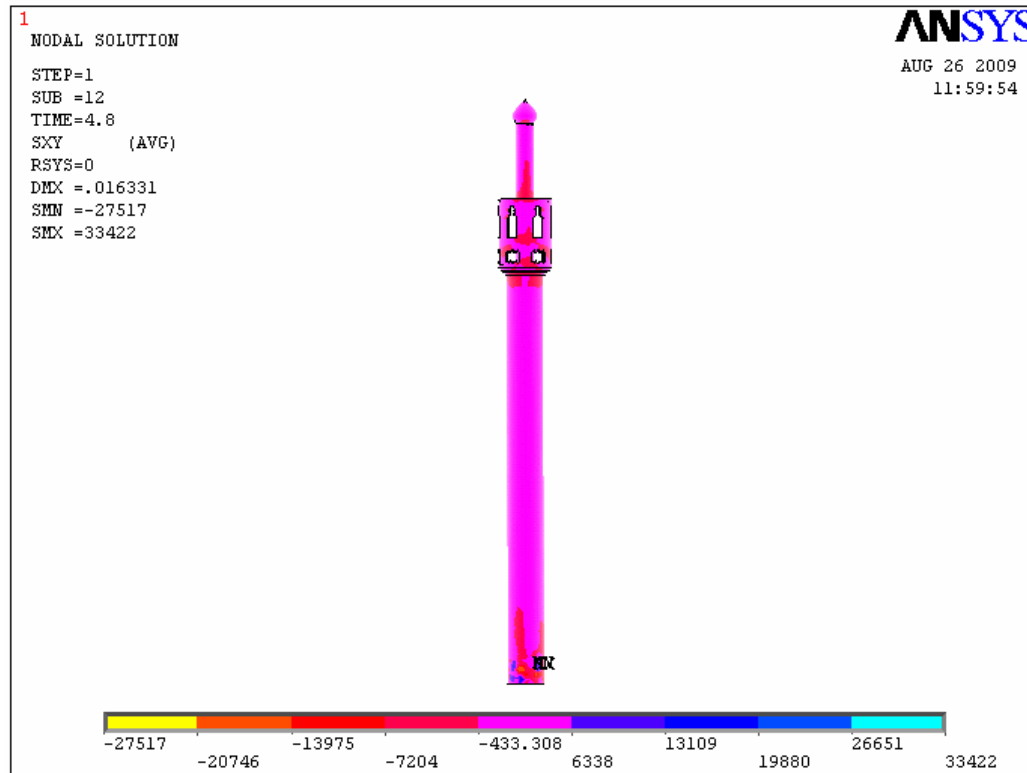


شکل (۶-۱۴): تنش اصلی جهت یک در ثانیه ۴/۸ بعد از مقاوم سازی با دو لایه FRP

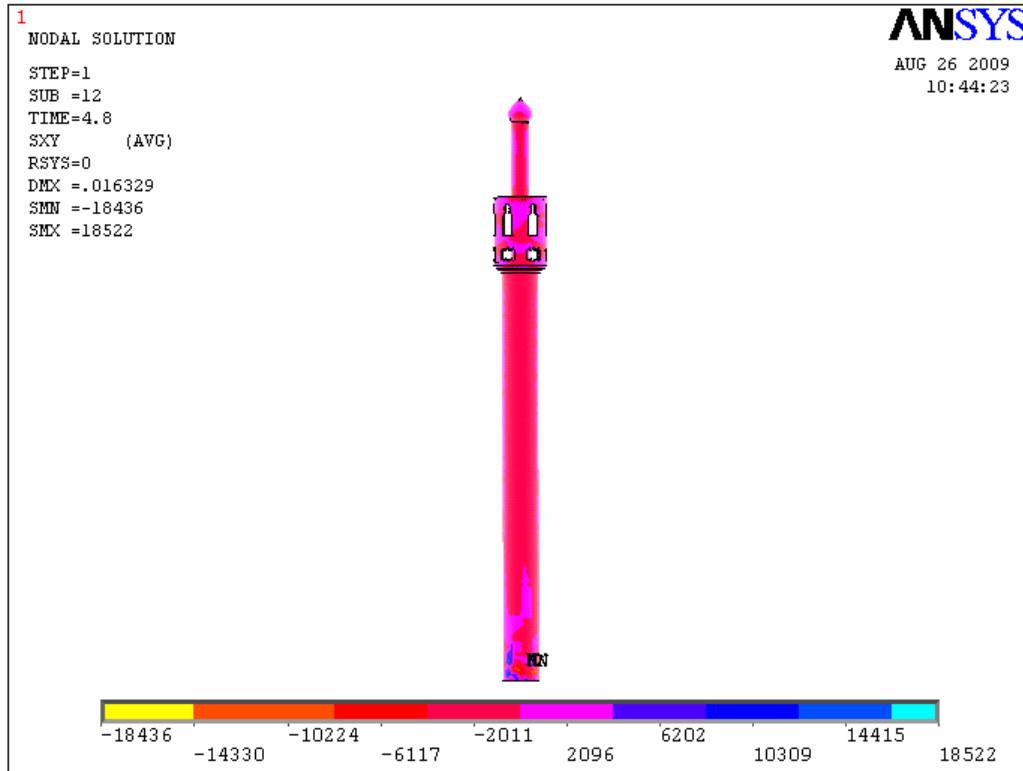


شکل (۶-۱۵): تنش اصلی جهت یک در ثانیه ۴/۸ بعد از مقاوم سازی با چهار لایه FRP

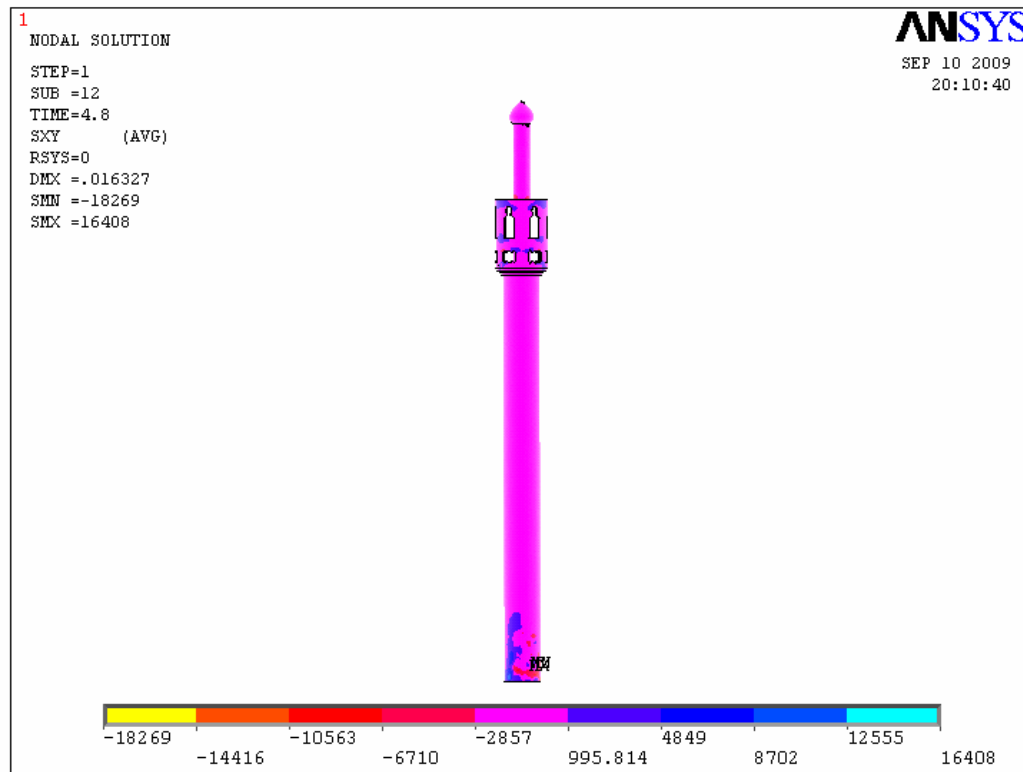
۶-۲-۳- تنش برشی در ثانیه ۴/۸ زلزله طبرس



شکل (۶-۱۶): تنش برشی در ثانیه ۴/۸ قبل از مقاوم سازی

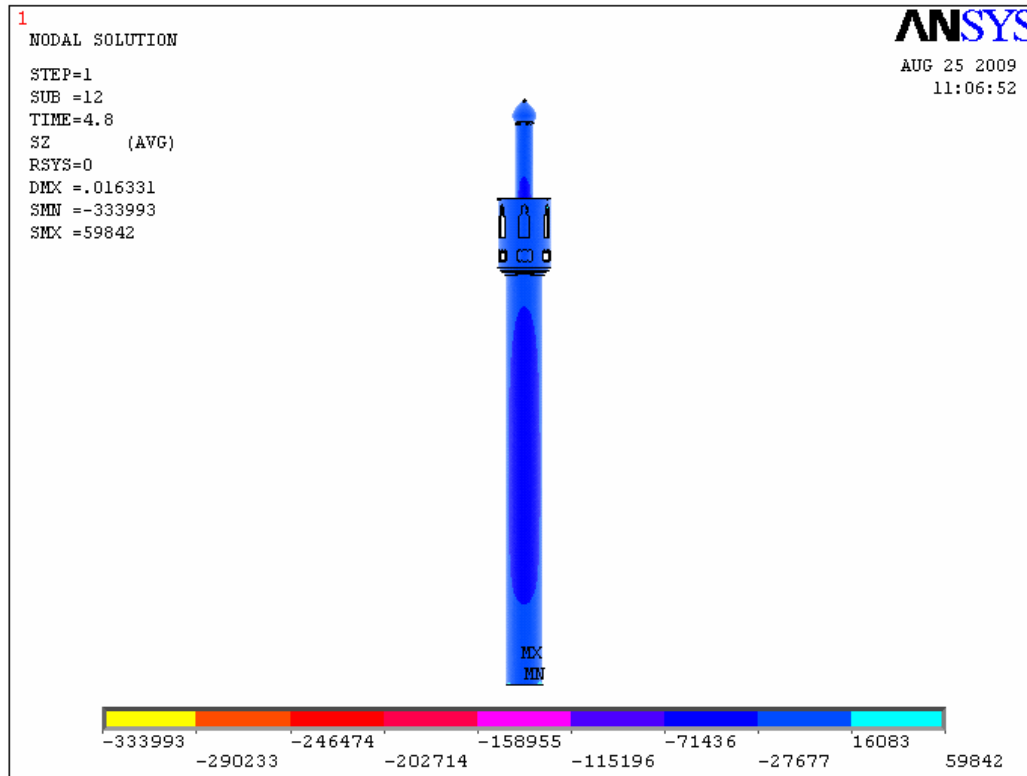


شکل (۶-۱۷): تنش برشی در ثانیه ۴/۸ بعد از مقاوم سازی با دو لایه FRP

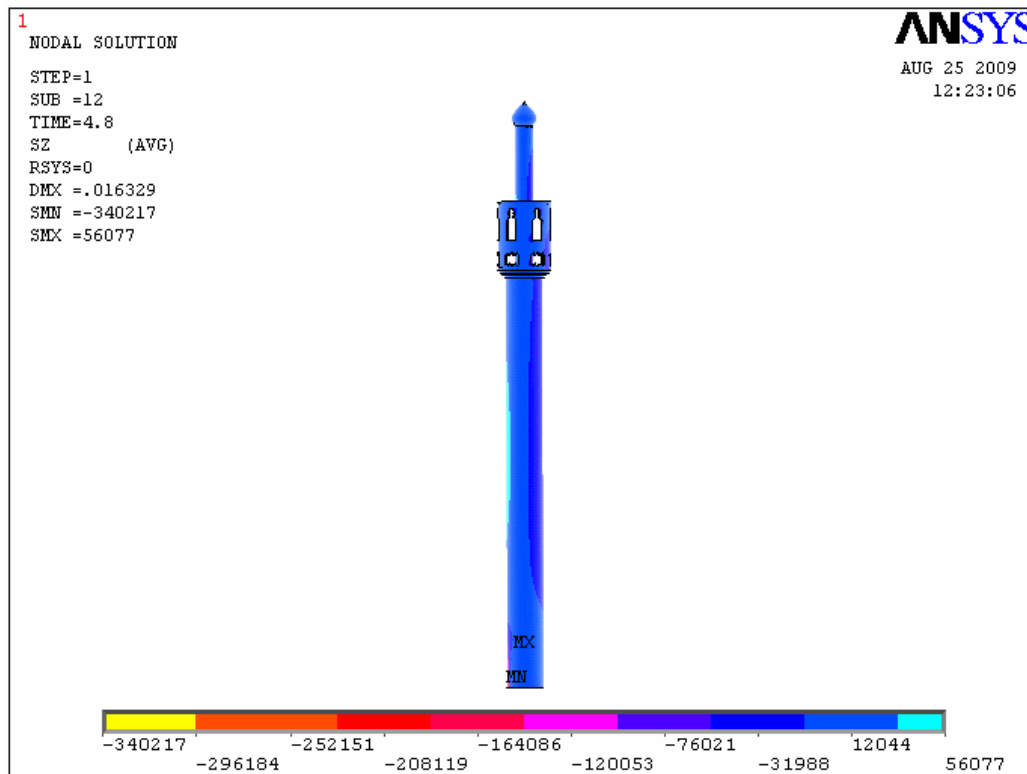


شکل (۶-۱۸): تنش برشی در ثانیه ۴/۸ بعد از مقاوم سازی با چهار لایه FRP

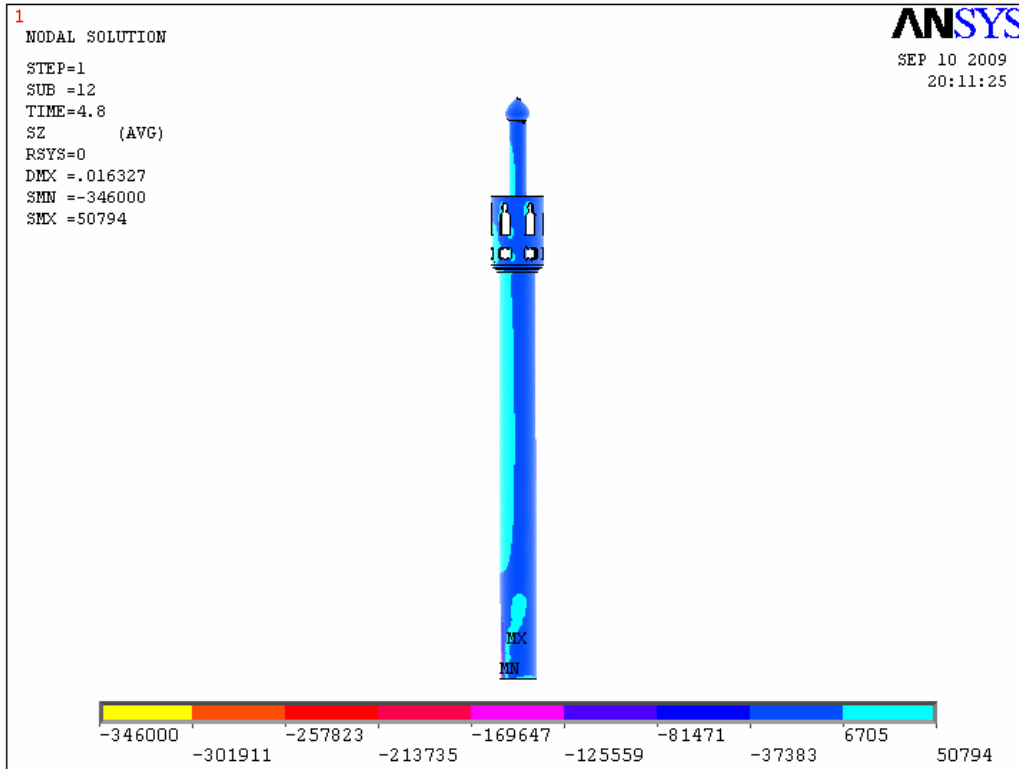
۴-۲-۶- تنش قائم در ثانیه ۴/۸ زلزله طبس



شکل (۶-۱۹): تنش قائم در ثانیه ۴/۸ قبل از مقاوم سازی



شکل (۶-۲۰): تنش قائم در ثانیه ۴/۸ بعد از مقاوم سازی با دو لایه FRP



شکل (۶-۲۱): تنش قائم در ثانیه ۴/۸ بعد از مقاوم سازی با چهار لایه FRP

۶-۲-۵- ترک خوردگی مناره در ثانیه ۴/۸ زلزله طبس



شکل (۶-۲۲): شروع ترک خوردگی مناره در ثانیه ۴/۸ قبل از مقاوم سازی



شکل (۶-۲۳): شروع ترک خوردگی مناره در ثانیه ۴/۸ بعد از مقاوم سازی با دو لایه FRP



شکل (۶-۲۴): شروع ترک خوردگی مناره در ثانیه ۴/۸ بعد از مقاوم سازی با چهار لایه FRP

جدول (۶-۲): تنش های قبل و بعد از مقاوم سازی زلزله طبس در تائیه ۴/۸

بعد از مقاوم سازی (چهار لایه)		بعد از مقاوم سازی (دو لایه)		قبل از مقاوم سازی		نوع تنش
مینیمم	ماکزیمم	مینیمم	ماکزیمم	مینیمم	ماکزیمم	
-۱۷۲۷۹۴	۶۲۶۳۱	-۳۴۰۲۱۷	۵۶۰۲۷	-۳۳۳۹۹۳	۵۹۸۴۲	تنش قائم
-۲۷۰۱۴	۲۸۹۸۹	-۱۸۴۳۶	۱۸۵۲۲	-۲۷۵۱۷	۳۳۴۲۲	تنش برشی
-۵۳۷۹۶	۱۲۴۳۰۱	-۱۰۶۶۹۵	۷۵۸۸۳	-۷۳۷۵۲	۸۷۷۲۱	تنش اصلی ۱

واحد تنش ها بر حسب پاسکال می باشد ($1 \text{ Pa} = 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$).

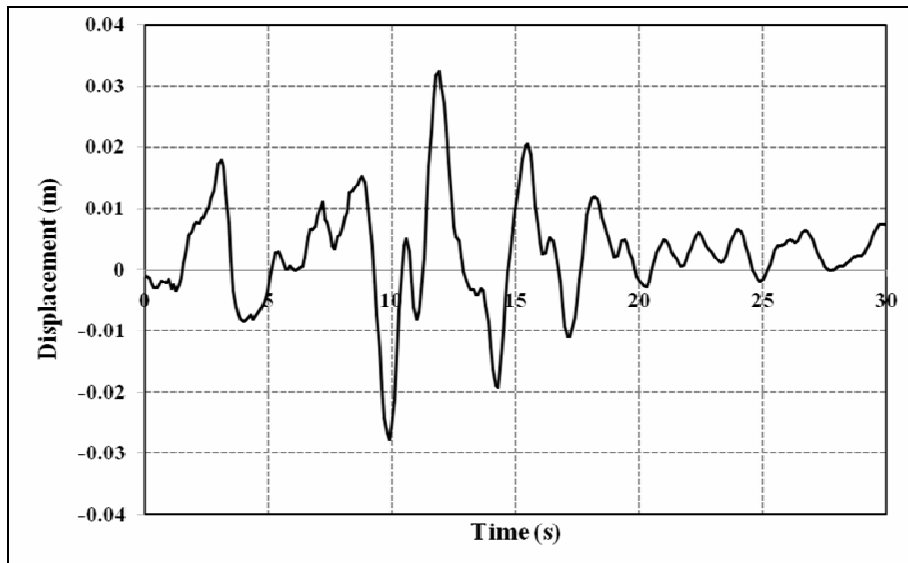
در تنش قائم و تنش اصلی ماکزیمم برای کشش و مینیمم برای فشار می باشد.
تنش ها و ترک خوردگی های نشان داده شده در لحظه واگرا شدن حل می باشد.

۳-۶- نتایج تحلیل تاریخچه زمانی زلزله زرنند

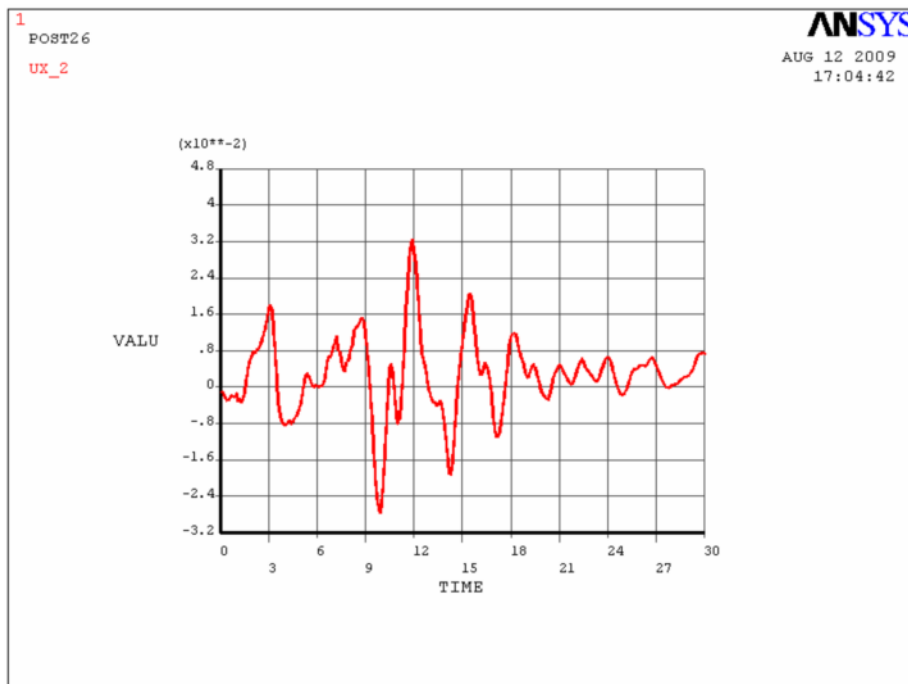
در این قسمت نتایج حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی برای زلزله زرنند ارائه می شود.

۱-۳-۶- زلزله زرنند

مقادیر زلزله زرنند خروجی از نرم افزار SeismoSignal و تغییر مکان اعمال شده به پای مناره در شکل زیر آمده است:

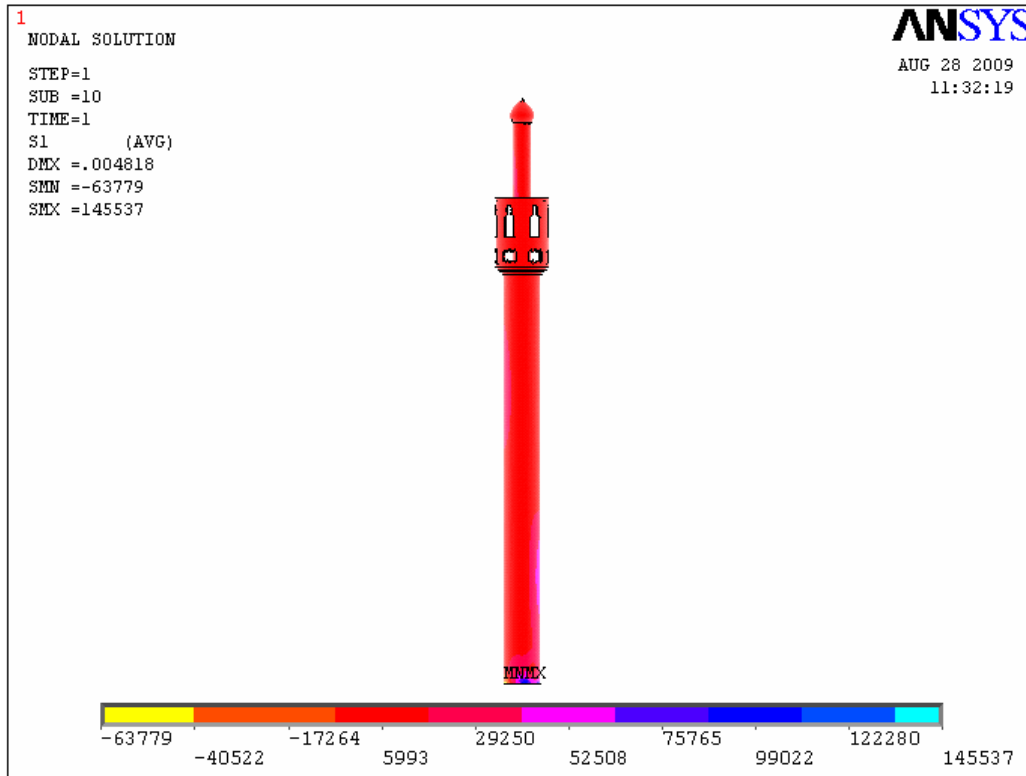


شکل (۶-۲۵): زلزله زرنند بر حسب تغییر مکان زمان خروجی از SeismoSignal

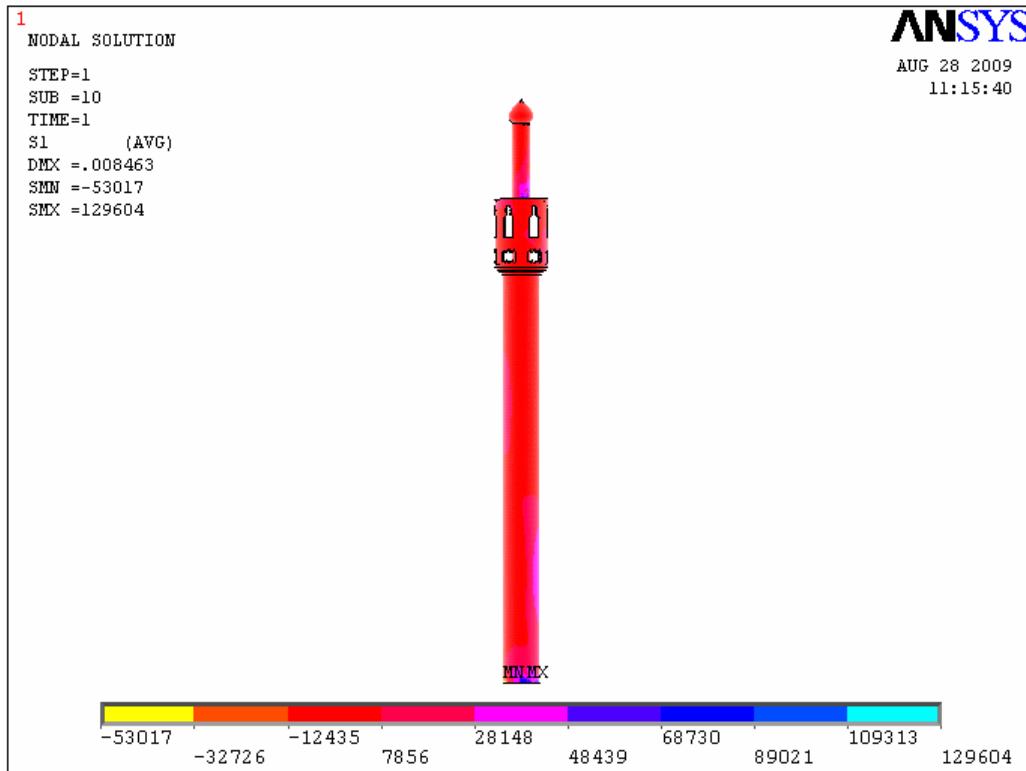


شکل (۶-۲۶): زلزله زرنند اعمال شده به تکیه گاه سازه

۲-۳-۶- تنش اصلی در جهت یک در ثانیه ۱ زلزله زرد

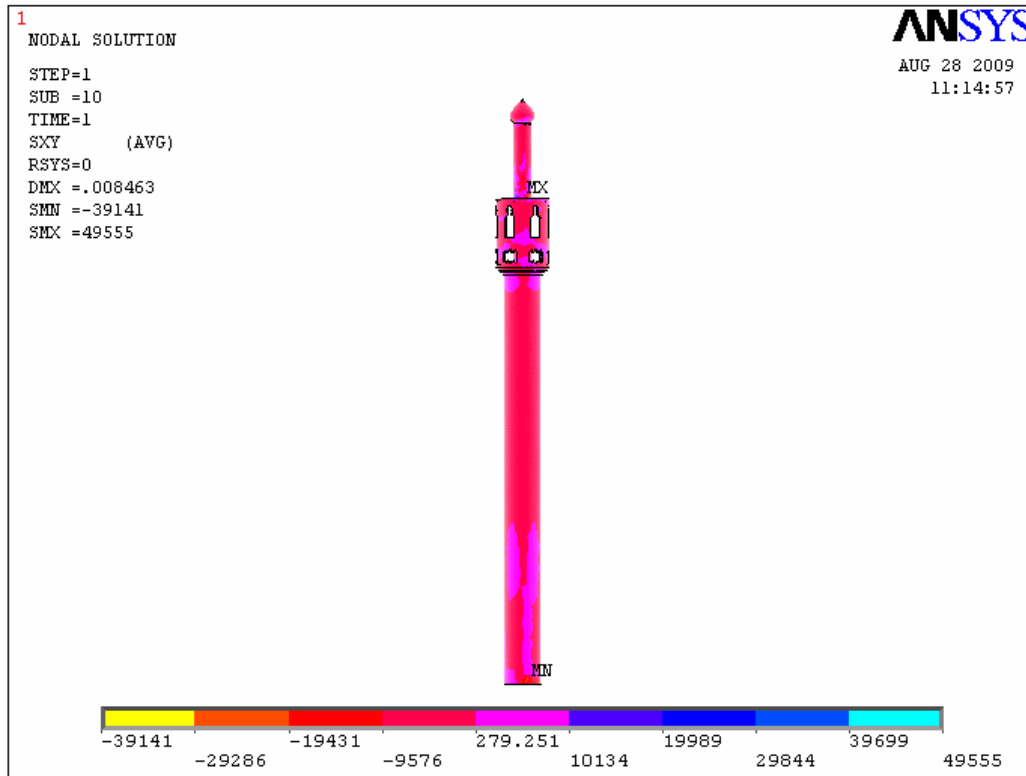


شکل (۲۷-۶): تنش اصلی جهت یک در ثانیه ۱ قبل از مقاوم سازی

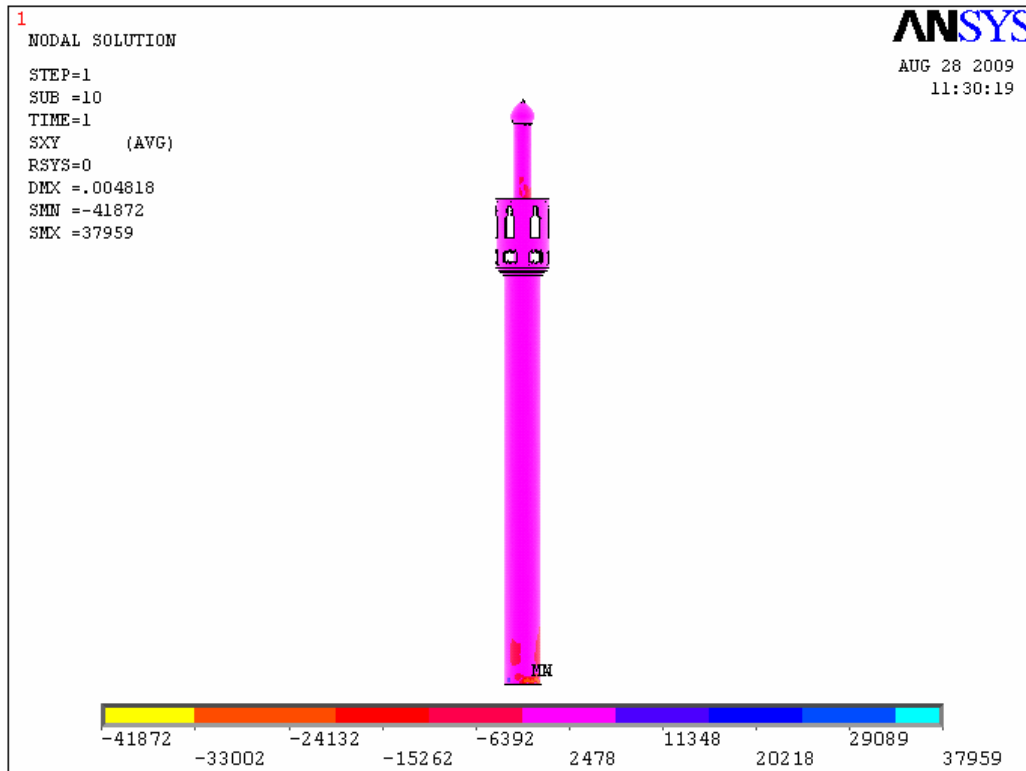


شکل (۲۸-۶): تنش اصلی جهت یک در ثانیه ۱ بعد از مقاوم سازی

۳-۳-۶- تنش برشی در ثانیه ۱ زلزله زرد

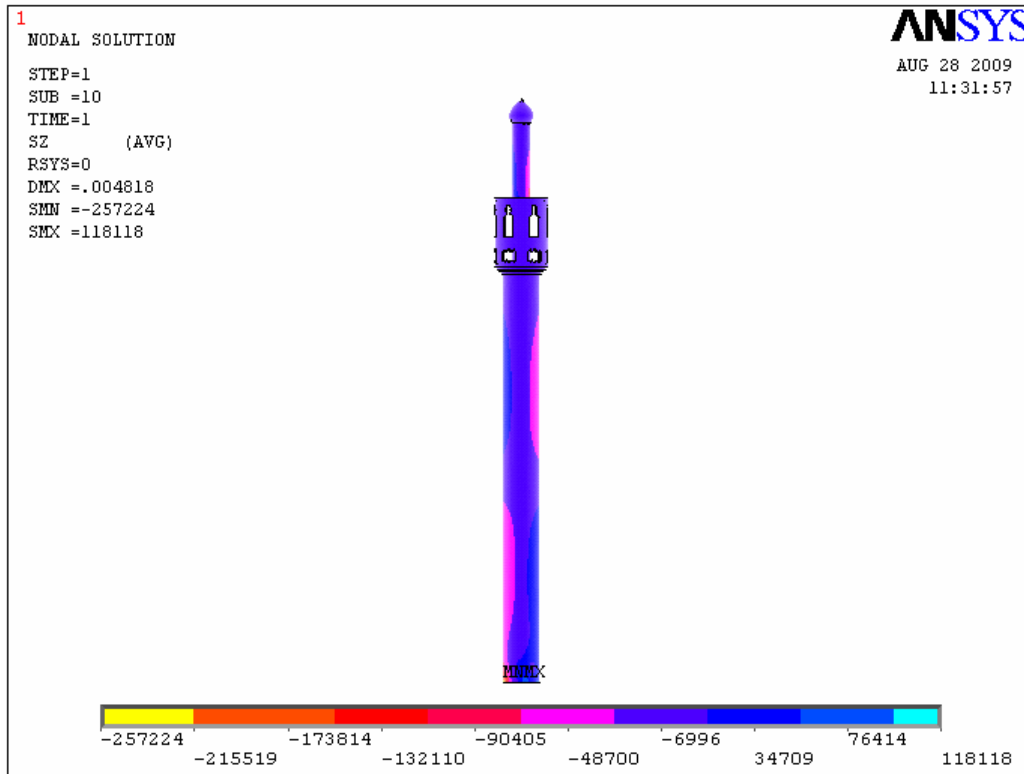


شکل (۶-۲۹): تنش برشی در ثانیه ۱ قبل از مقاوم سازی

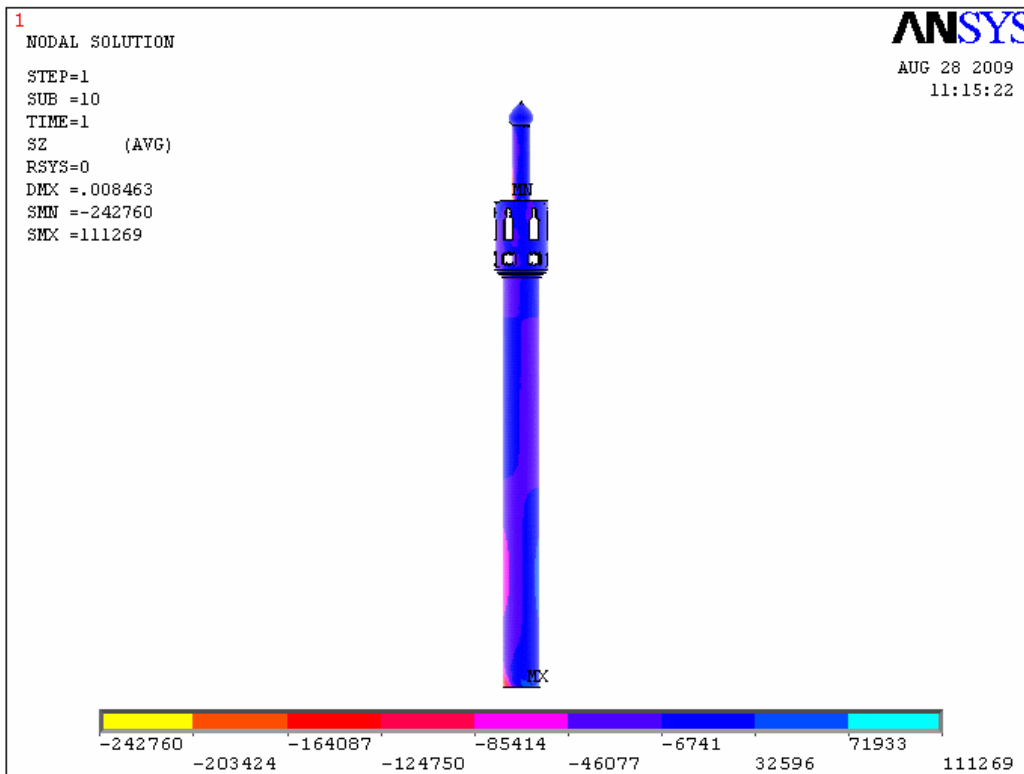


شکل (۶-۳۰): تنش برشی در ثانیه ۱ بعد از مقاوم سازی

۴-۳-۶ تنش قائم در ثانیه ۱ زلزله زرنده

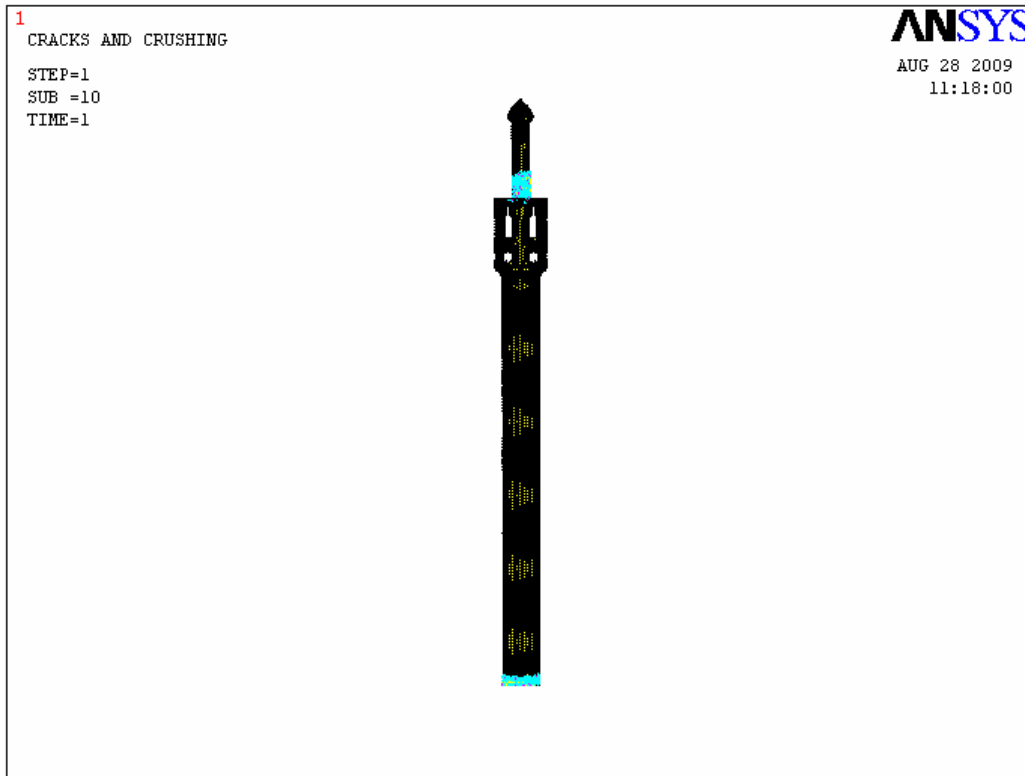


شکل (۳۱-۶): تنش قائم در ثانیه ۱ قبل از مقاوم سازی

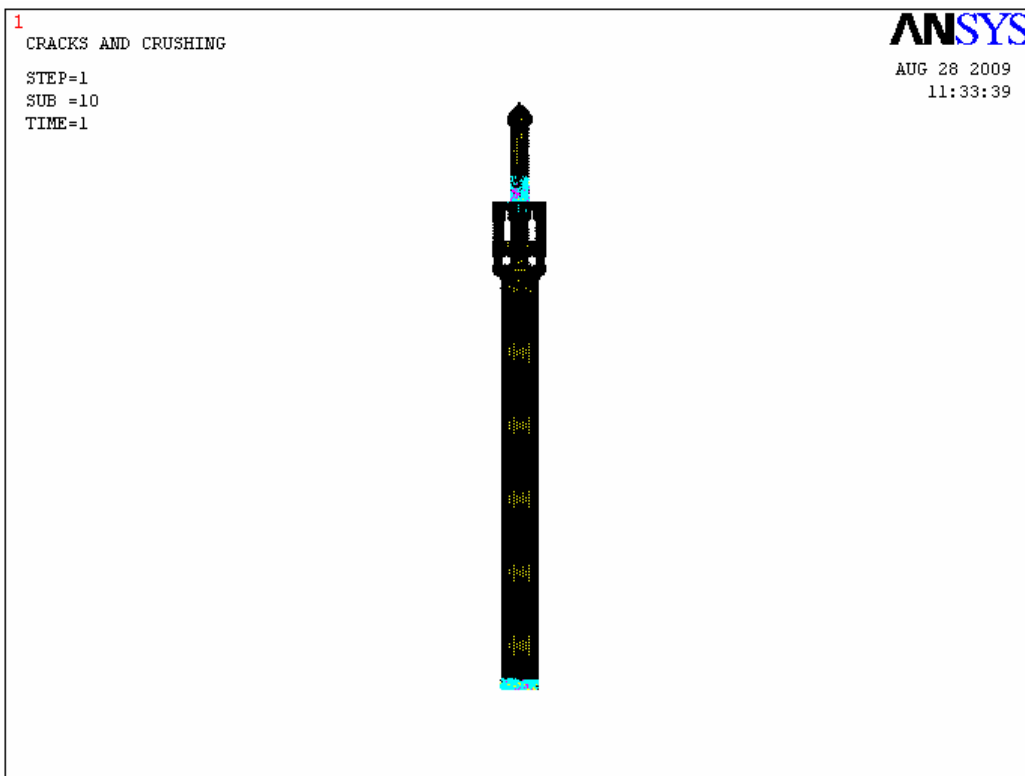


شکل (۳۲-۶): تنش قائم در ثانیه ۱ بعد از مقاوم سازی

۵-۳-۶ - ترک خوردگی در ثانیه ۱ زلزله زرد



شکل (۳۳-۶): ترک خوردگی مناره در ثانیه ۱ قبل از مقاوم سازی



شکل (۳۴-۶): ترک خوردگی مناره در ثانیه ۱ بعد از مقاوم سازی

جدول (۳-۶): تنش های قبل و بعد از مقاوم سازی زلزله زرنند در تانیه ۱

بعد از مقاوم سازی		قبل از مقاوم سازی		نوع تنش
مینیمم	ماکزیمم	مینیمم	ماکزیمم	
-۲۴۲۷۶۰	۱۱۱۲۶۹	-۲۵۷۲۲۴	۱۱۸۱۱۸	تنش قائم
-۴۱۸۷۲	۳۷۹۵۹	-۳۹۱۴۱	۴۹۵۵۵	تنش برشی
-۵۳۰۱۷	۱۲۹۶۰۴	-۶۳۷۷۹	۱۴۵۵۳۷	تنش اصلی ۱

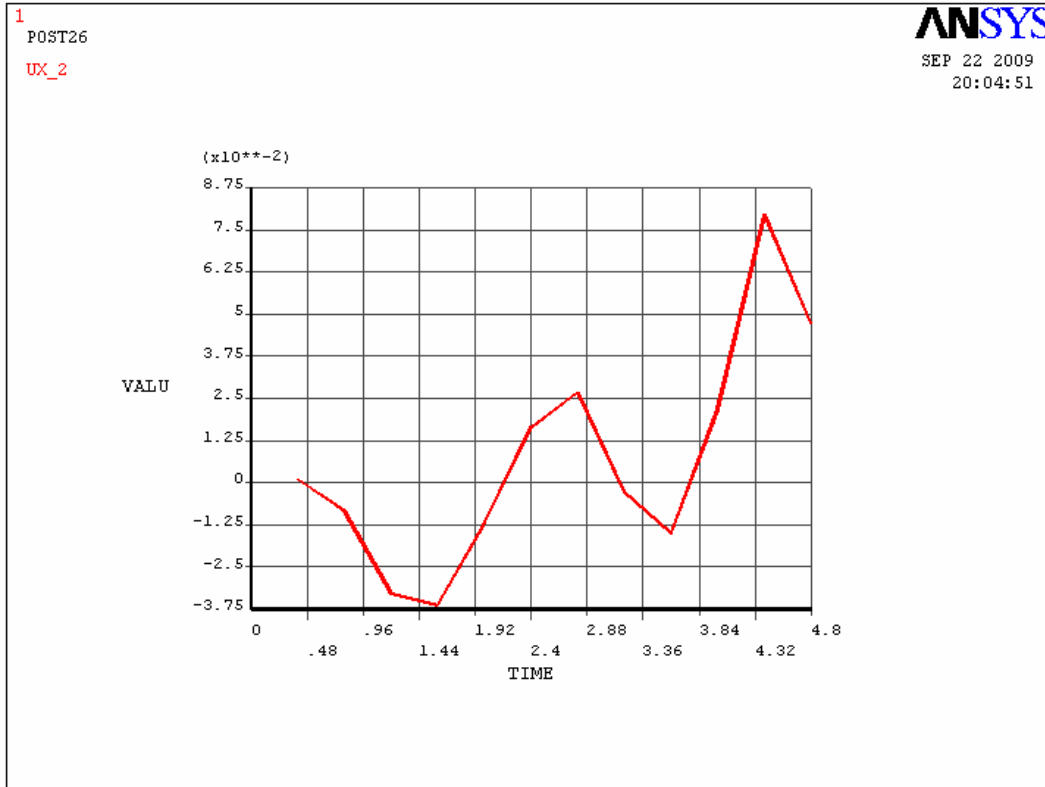
واحد تنش ها بر حسب پاسکال می باشد ($1 \text{ Pa} = 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$).

در تنش قائم و تنش اصلی ماکزیمم برای کشش و مینیمم برای فشار می باشد.
تنش ها و ترک خوردگی های نشان داده شده در لحظه واگرا شدن حل می باشد.

۴-۶- بررسی پایداری مناره تحت زلزله طبس:

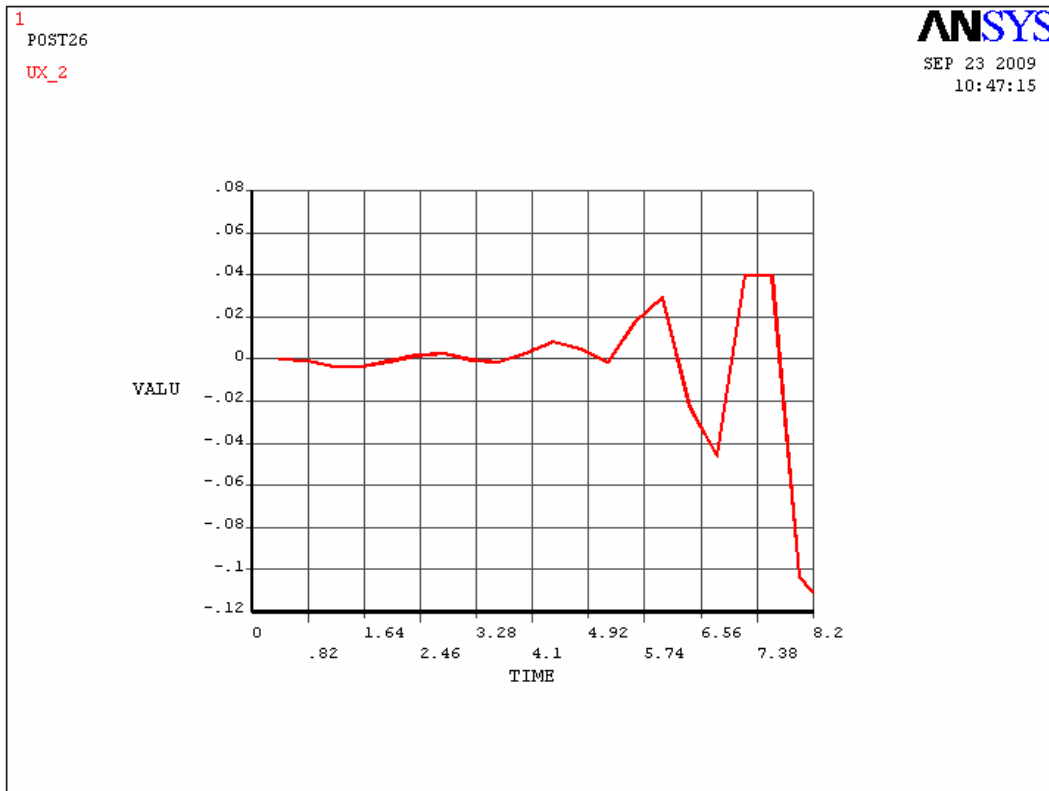
با توجه به آنالیز تاریخیچه زمانی زلزله طبس، با در نظر گرفتن عدم ادامه آنالیز پس از واگرا شدن حل در تنظیمات آنالیز نتایج زیر حاصل گردید:

- قبل از مقاوم سازی تحلیل تا ثانیه ۴/۸ ادامه و پس از آن با ناپایداری و ایجاد ترک در جدار پایین مناره و عدم تحمل کشش در قسمت های ترک خورده حل واگرا شده و آنالیز متوقف می گردد که تغییر مکان نوک مناره به صورت شکل زیر بدست آمده است:



شکل (۳۵-۶): تغییر مکان نوک مناره تا قبل از واگرایی حل (ثانیه ۴/۸) قبل از مقاوم سازی

- پس از مقاوم سازی تحلیل تا ثانیه ۸/۲ ادامه و پس از آن با ناپایداری مناره حل واگرا شده و آنالیز متوقف می گردد که تغییر مکان نوک مناره به صورت شکل زیر بدست آمده است:



شکل (۶-۳۶): تغییر مکان نوک مناره تا قبل از واگرایی حل (ثانیه ۸/۲) بعد از مقاوم سازی

فصل هفتم:

نتیجه گیری و

پیشنادهای آتی

۱-۷- نتیجه‌گیری

با توجه به آنالیز تاریخیچه زمانی غیرخطی برای سه زلزله بم و طبس و زرنند نتایج زیر حاصل گردید:

- ۱- زلزله بم:
 - میزان کاهش تنش‌ها در ثانیه ۱۱/۵ با توجه به جدول (۱-۶) حدوداً ۱۰ درصد می‌باشد.
 - ۲- زلزله طبس:
 - با توجه به اینکه در این زلزله دو بار مقاوم‌سازی با دو و چهار لایه انجام شد نتایج به صورت زیر بدست آمد:
 - میزان کاهش تنش‌ها در ثانیه ۴/۸ با توجه به جدول (۲-۶) برای مقاوم‌سازی با دو لایه برای تنش قائم کششی حدود ۷ درصد و برای تنش برشی حدود ۴۰ درصد و برای مقاوم‌سازی با چهار لایه برای تنش قائم فشاری حدود ۴۷ درصد و برای تنش برشی حدود ۱۸ درصد می‌باشد.
 - ۳- زلزله زرنند:
 - میزان کاهش تنش‌ها با توجه به جدول (۳-۶) برای تنش قائم حدود ۶ درصد و برای تنش برشی حدود ۲۳ درصد می‌باشد.
 - ۴- بررسی پایداری مناره تحت زلزله طبس:
 - قبل از مقاوم‌سازی تحلیل تا ثانیه ۴/۸ ادامه و پس از آن با ناپایداری و ایجاد ترک در جدار پایین مناره و عدم تحمل کشش در قسمت‌های ترک‌خورده حل و آگرا شده و آنالیز متوقف می‌گردد و پس از مقاوم‌سازی تحلیل تا ثانیه ۸/۲ ادامه و پس از آن با ناپایداری مناره حل و آگرا شده و آنالیز متوقف می‌گردد.

۲-۲- پیشنهادهایی برای کارهای آتی

- با توجه به کارهای انجام شده در این پایان‌نامه توصیه می‌شود پژوهشگران در ادامه تحقیق حاضر بر روی سازه مورد مطالعه موارد زیر را مد نظر قرار دهند:
۱. با در نظر گرفتن اثرات چسب بین لایه مصالح بنایی و FRP می‌توان مدل دقیق‌تری از رفتار سازه ارائه نمود.
 ۲. با مدل کردن سردر و جزئیات متصل به مناره‌ها می‌توان رفتار دقیق‌تری از مناره‌ها بدست آورد.
 ۳. در تحقیق‌های آتی مقاوم‌سازی در قسمت فوقانی مناره انجام شود.

مراجع

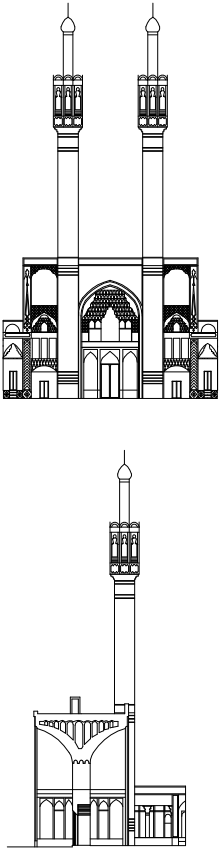
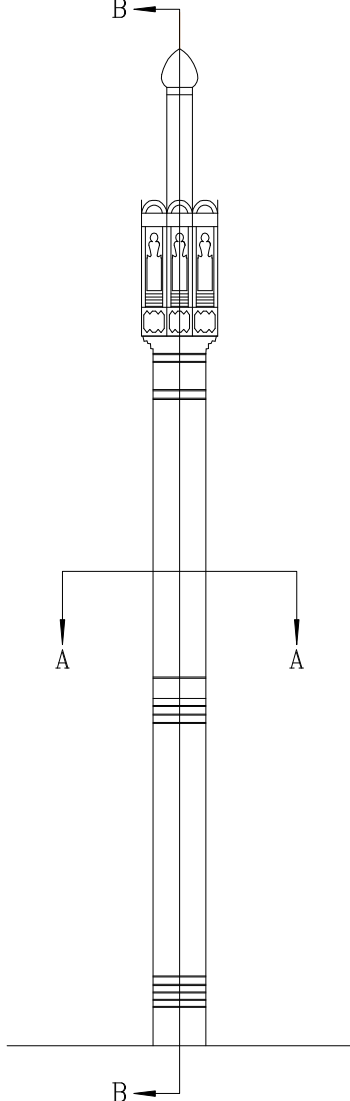
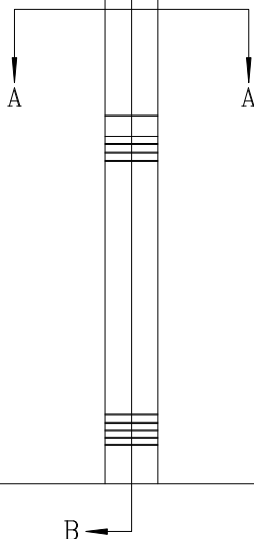

مراجع

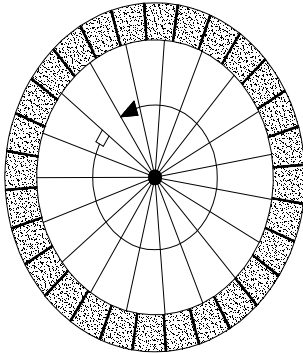
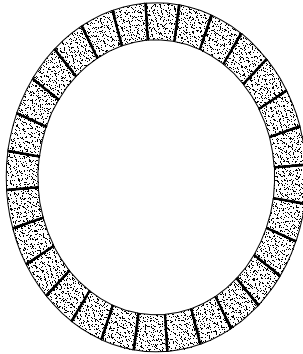
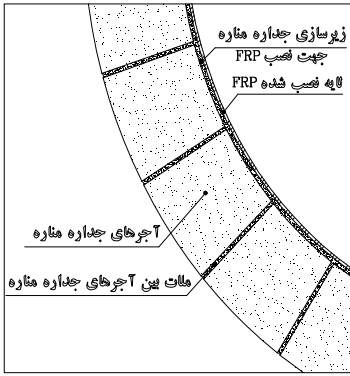
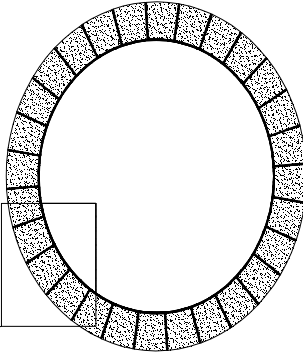
- [۱] - تسنیمی، ع.، "رفتار دیوارهای آجری در استاندارد ۲۸۰۰"، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۰.
- [۲] - مگردچیان، آ.، "دینامیک سازه‌ها و مهندسی زلزله"، روزبهان، ۱۳۸۵.
- [۳] - رهایی، ع.، زمردیان، آ.، "ترمیم و تقویت سازه‌های بتن مسلح با الیاف پلیمری مرکب"، دانشگاه تفرش، ۱۳۸۴.
- [4] - Matthews & Rawlings, "Composite Materials: Engineering and Science", 1994.
- [5] - H. Dumininghaus, "Plastics for engineers: Materials, Properteis, Aplications", 1992, Hanser.
- [6] - K. Kircher, "Chemical reactions in plastics processing", Hanser, 1987.
- [7] - A. Nanni, "Masonry Strengthening", USA, University of Missouri Rolla (UMR), 2005.
- [۸] - "دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های بنایی غیرمسلح موجود (نشریه ۳۷۶)", سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۸۶.
- [۹] - خدابنده امیری، ع.، "مقاوم‌سازی بناهای تاریخی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه علوم و فنون مازندران، ۱۳۷۵.
- [۱۰] - علیزاده نوذری، م.، "اثر زلزله بر ساختمان‌های با مصالح بنایی و روش‌های مقاوم‌سازی آنها"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه علوم و فنون مازندران، ۱۳۷۷.
- [۱۱] - مشکئی، ح.، "ارائه فرایند مقاوم‌سازی لرزه‌ای بناهای تاریخی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۸۱.
- [۱۲] - باستانی پاریزی، "آثار تاریخی کرمان"، ۱۳۳۵.
- [۱۳] - مرکز کرمان شناسی، "کرمان در یک نگاه"، ۱۳۷۸.
- [۱۴] - سازمان میراث فرهنگی استان کرمان، آرشیو نقشه‌های بنای شاه نعمت الله ولی ماهان.
- [۱۵] - جاهدمطلق، ح. نوبان، م. اشراقی، م.، "اجزاء محدود ANSYS"، دانشگاه تهران، ۱۳۸۳.
- [16] - ANSYS10. References and Manual: Basic analysis procedure guide, "ANSYS advanced analysis technqe guide- ANSYS operation guide- ANSYS modeling & meshing guide-ANSYS structural

analysis guide- ANSYS commands reference- ANSYS theory reference- ANSYS v.11.

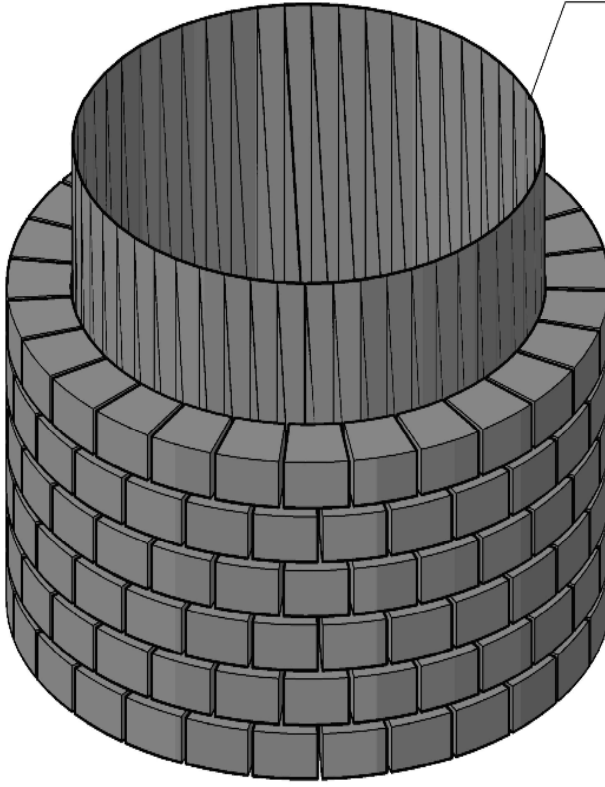
- [۱۷] - نیکوئی، م.، "آسیب پذیری و نحوه مقاوم سازی ساختمان شاه نعمت الله ولی ماهان"، پایان نامه کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان، ۱۳۸۶.
- [۱۸] - شهریار احمدی، ی.، "مقاوم سازی تیرهای بتن مسلح با استفاده از الیاف پلیمری مسلح FRP"، پایان نامه کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ۱۳۸۶.
- [۱۹] - "آیین نامه طرح ساختمان ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰"، ویرایش سوم، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، وزارت مسکن و شهرسازی، تهران، ۱۳۸۰.

پوست

1	2	3	4																				
Rev No: Revision Note:		Date:	Signature Check																				
A	<p>Note:</p> <p>MATERIAL PROPERTIES</p> <p>The Mechanical Properties Are As Shown:</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Material Type</th> <th>Elastic Modulus(GPa)</th> <th>Ultimate Strain(%)</th> <th>Thickness (mm)</th> <th>Number of Layer</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CARBON FIBER</td> <td>181</td> <td>0.9</td> <td>0.13</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table>		Material Type	Elastic Modulus(GPa)	Ultimate Strain(%)	Thickness (mm)	Number of Layer	CARBON FIBER	181	0.9	0.13	2	A										
Material Type	Elastic Modulus(GPa)	Ultimate Strain(%)	Thickness (mm)	Number of Layer																			
CARBON FIBER	181	0.9	0.13	2																			
B			B																				
C			C																				
D			D																				
E			E																				
F	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Item Ref</td> <td>Quantity</td> <td>Title/Name, Designation, Material, Dimension etc</td> <td>Article No./Reference</td> </tr> <tr> <td>Designed by:</td> <td>Checked by:</td> <td>Approved by-date:</td> <td>File Name: Date: Scale:</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Client:</td> <td colspan="2">Title:</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;"> <p>دانشگاه شهید باهنر کرمان</p> </td> <td colspan="2" style="text-align: center;"> <p>RETROFITTING OF SHAH NEMATOLLAH MINARET WITH FRP SYSTEM</p> </td> </tr> <tr> <td colspan="2">Edition:</td> <td colspan="2">Sheet: 1/4</td> </tr> </table>		Item Ref	Quantity	Title/Name, Designation, Material, Dimension etc	Article No./Reference	Designed by:	Checked by:	Approved by-date:	File Name: Date: Scale:	Client:		Title:		<p>دانشگاه شهید باهنر کرمان</p>		<p>RETROFITTING OF SHAH NEMATOLLAH MINARET WITH FRP SYSTEM</p>		Edition:		Sheet: 1/4		F
Item Ref	Quantity	Title/Name, Designation, Material, Dimension etc	Article No./Reference																				
Designed by:	Checked by:	Approved by-date:	File Name: Date: Scale:																				
Client:		Title:																					
<p>دانشگاه شهید باهنر کرمان</p>		<p>RETROFITTING OF SHAH NEMATOLLAH MINARET WITH FRP SYSTEM</p>																					
Edition:		Sheet: 1/4																					
1			4																				

1	2	3	4																
Rev No:	Revision Note:	Date:	Signature																
<p>Note:</p> <h3 style="margin:0;">MATERIAL PROPERTIES</h3> <p>The Mechanical Properties Are As Shown:</p> <table border="1" style="margin:0 auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Material Type</th> <th>Elastic Modulus(GPa)</th> <th>Ultimate Strain(%)</th> <th>Thickness (mm)</th> <th>Number of Layer</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CARBON FIBER</td> <td>181</td> <td>0.9</td> <td>0.13</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table>				Material Type	Elastic Modulus(GPa)	Ultimate Strain(%)	Thickness (mm)	Number of Layer	CARBON FIBER	181	0.9	0.13	2						
Material Type	Elastic Modulus(GPa)	Ultimate Strain(%)	Thickness (mm)	Number of Layer															
CARBON FIBER	181	0.9	0.13	2															
A	B	C	D																
 <p style="text-align:center;">Section A-A With Stair</p>		 <p style="text-align:center;">Section A-A Without Stair</p>																	
D			E																
E	 <p style="text-align:center;">Section A-A After Retrofitting</p>																		
F	<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Item Ref</td> <td>Quantity</td> <td>Title/Name, Designation, Material, Dimension etc</td> <td>Article No./Reference</td> </tr> <tr> <td>Designed by:</td> <td>Checked by:</td> <td>Approved by-date:</td> <td>File Name: Date: Scale:</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Client: دانشگاه شهید باهنر کرمان</td> <td colspan="2">Title: RETROFITTING OF SHAH NEMATOLLAH MINARET WITH FRP SYSTEM</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Edition:</td> <td>Sheet: 2/4</td> </tr> </table>			Item Ref	Quantity	Title/Name, Designation, Material, Dimension etc	Article No./Reference	Designed by:	Checked by:	Approved by-date:	File Name: Date: Scale:	Client: دانشگاه شهید باهنر کرمان		Title: RETROFITTING OF SHAH NEMATOLLAH MINARET WITH FRP SYSTEM		Edition:			Sheet: 2/4
Item Ref	Quantity	Title/Name, Designation, Material, Dimension etc	Article No./Reference																
Designed by:	Checked by:	Approved by-date:	File Name: Date: Scale:																
Client: دانشگاه شهید باهنر کرمان		Title: RETROFITTING OF SHAH NEMATOLLAH MINARET WITH FRP SYSTEM																	
Edition:			Sheet: 2/4																
1	4																		

1	2	3	4										
Rev No:	Revision Note:	Date:	Signature										
<p>Note:</p> <p>MATERIAL PROPERTIES</p> <p>The Mechanical Properties Are As Shown:</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Material Type</th> <th>Elastic Modulus(GPa)</th> <th>Ultimate Strain(%)</th> <th>Thickness (mm)</th> <th>Number of Layer</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CARBON FIBER</td> <td>181</td> <td>0.9</td> <td>0.13</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table>				Material Type	Elastic Modulus(GPa)	Ultimate Strain(%)	Thickness (mm)	Number of Layer	CARBON FIBER	181	0.9	0.13	2
Material Type	Elastic Modulus(GPa)	Ultimate Strain(%)	Thickness (mm)	Number of Layer									
CARBON FIBER	181	0.9	0.13	2									
A			A										
B			B										
C			C										
D			D										
E			E										
<p>Section B-B Without Stair</p>		<p>Section B-B After Retrofitting</p>											
<p>Client: دانشگاه شهید باهنر کرمان</p>		<p>Title: RETROFITTING OF SHAH NEMATOLLAH MINARET WITH FRP SYSTEM</p>											
<p>Item Ref</p>		<p>Article No./Reference</p>											
<p>Quantity</p>		<p>Scale:</p>											
<p>Title/Name, Designation, Material, Dimension etc</p>		<p>Date:</p>											
<p>Designed by:</p>		<p>File Name:</p>											
<p>Checked by:</p>		<p>Approved by-date:</p>											
<p>Client:</p>		<p>Edition:</p>											
<p>Client:</p>		<p>Sheet: 3/4</p>											
1			4										

1	2	3	4										
Rev No:	Revision Note:	Date:	Signature										
<p>Note:</p> <p>MATERIAL PROPERTIES</p> <p>The Mechanical Properties Are As Shown:</p> <table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Material Type</th> <th>Elastic Modulus(GPa)</th> <th>Ultimate Strain(%)</th> <th>Thickness (mm)</th> <th>Number of Layer</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CARBON FIBER</td> <td>181</td> <td>0.9</td> <td>0.13</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table>				Material Type	Elastic Modulus(GPa)	Ultimate Strain(%)	Thickness (mm)	Number of Layer	CARBON FIBER	181	0.9	0.13	2
Material Type	Elastic Modulus(GPa)	Ultimate Strain(%)	Thickness (mm)	Number of Layer									
CARBON FIBER	181	0.9	0.13	2									
A	B	C	D										
													
E	F	1	4										
Item Ref	Quantity	Title/Name, Designation, Material, Dimension etc		Article No./Reference									
Designed by:	Checked by:	Approved by-date:	File Name:	Date:	Scale:								
Client:			Title:										
<p>دانشگاه شهید باهنر کرمان</p>			<p>RETROFITTING OF SHAH NEMATOLLAH MINARET WITH FRP SYSTEM</p>										
Edition:			Sheet: 4/4										

Abstract

Masonry buildings have a great importance in terms of art and aesthetics. These buildings in the persistent cultural identity are retained and director is also consolidating national unity. In addition, an important factor for heritage tourism and expansion of this industry are in the country.

Heritage value of our magnificent building, but Shah Nematollah Mahan, Kerman province, which the dome and two minarets with a height of 41.6 meters is made. One of the provinces of Kerman province in Iran is earthquake prone and earthquake in 1360 such as Earthquake Golbaf Bam earthquake in 1382 has experienced. This event, of the numerous faults in this area and also the importance of this in terms of history, culture and tourism, resistant making this one of the issues is significant.

For evaluation of this method retrofitting, some analysis on Finite element model of the minaret structural ANSYS software is built, before and after adding FRP composite elements for retrofitting, has been done. The results of this analysis and the analysis and suggestions for the next study in this building are given.

Keywords: History Building, FRP, Retrofitting & Minaret.



Shahid Bahonar University of Kerman

Faculty of Engineering

Department of Civil Engineering

**Retrofitting of Historic Building by Using FRP
(Case Study; Minarets of Shah Nematollah Vali Mahan Building)**

**Supervisor:
M.J. Fadaee**

**Prepared by:
S. Alizadeh**

**A Thesis Submitted as a Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree
of Master of Science in Civil Engineering (M.Sc.)**

September 2009