



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه‌ی دوره‌ی کارشناسی ارشد مهندسی عمران – گرایش سازه

بررسی رفتار ساختمان‌های بتن مسلح با میلگرد آلیاژ حافظه دار (SMA)

استاد راهنما:

دکتر سید مسعود میر طاهری

استاد مشاور:

دکتر نادر فنائی

دانشجو:

حسین خورشیدی

پائیز ۱۳۹۲

الله الرحمن الرحيم

تقدیم بہ

پدر نزر کووار

و

مادر مہربانم









بہ پاس زحمات بی پایان و دعای خیرشان



تاسیس ۱۳۰۷  
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

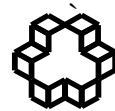
### تائید هیات داوران

هیات داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان **بررسی رفتار قاب های بتنی مسلح شده با آلیاژ حافظه دار** توسط آقای حسین خورشیدی ، صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد در مهندسی عمران گرایش سازه مورد تائید قرار می دهند.

	امضاء	آقای دکتر سید مسعود میرطاهری	۱- استاد راهنما
	امضاء	آقای دکتر	۲- استاد راهنما
	امضاء	آقای دکتر نادر فنائی	۳- استاد مشاور
	امضاء	آقای دکتر عبدالرضا سروقد مقدم	۴- ممتحن خارجی
	امضاء	آقای دکتر	۵- ممتحن خارجی
	امضاء	آقای دکتر رضا کرمی محمدی	۶- ممتحن داخلی
	امضاء	آقای دکتر	۷- ممتحن داخلی
	امضاء	آقای دکتر رضا کرمی محمدی	۸- نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه

دانشکده عمران

تاریخ:



## اظهارنامه دانشجو

شماره:

تاریخ:

اینجانب حسین خورشیدی دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش سازه دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در پایان‌نامه با

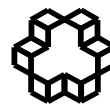
عنوان

### بررسی رفتار ساختمان های بتن مسلح با میلگرد آلیاژ حافظه دار (SMA)

با راهنمایی استاد محترم جناب آقای دکتر سید مسعود میرطاهری، توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده در این پایان‌نامه مورد تأیید می‌باشد، و در مورد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. بعلاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان‌نامه تا کنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان‌نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو:

تاریخ:



- ۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن می باشد. هرگونه کپی برداری بصورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می باشد.  
ضمناً متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.
- ۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.  
همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مراجع مجاز نمی باشد.

## تشکر و قدردانی

پس از حمد و سپاس بیکران خداوند متعال که توفیق برداشتن گامی دیگر در راه آموختن را به من عنایت فرمود، بر خود لازم می دانم از زحمات بی دریغ استاد راهنمای گرانقدرم، جناب آقای دکتر سید مسعود میرطاهری و حمایت ها و راهنمایی های دلسوزانه استاد مشاور ارجمندم، جناب آقای دکتر نادر فنائی کمال قدردانی و سپاسگزاری را بعمل آورم. همچنین از جناب آقای مهندس حمید رحمانی سامانی به خاطر راهنمایی هایشان در طی انجام پایان نامه تشکر می نمایم.

## چکیده

استفاده از آلیاژهای حافظه دار سوپراالاستیک (SMAs) به عنوان میلگرد در سازه‌های بتنی در میان پژوهشگران به تدریج در حال افزایش است. به دلیل تفاوت خواص مکانیکی SMA در مقایسه با فولاد معمولی، استفاده از میلگرد SMA در بتن ممکن است تغییراتی در پاسخ سازه، تحت بارهای لرزه‌ای به وجود آورد. در این مطالعه، تأثیر استفاده از میلگردهای SMA در سازه‌های بتنی بر روی ساختمان‌های بتن مسلح ۳، ۶ و ۸ طبقه به روش تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته است. برای هر ساختمان سه نحوه متفاوت میلگردگذاری در نظر گرفته شده است: ۱- تمام میلگردها از جنس فولاد معمولی، ۲- در ناحیه مفاصل پلاستیک تیر، میلگردها از جنس SMA و در سایر قسمت‌ها از جنس فولاد معمولی و ۳- میلگرد SMA در تمام طول تیر و میلگرد فولادی در دیگر قسمت‌ها. در هر سه مورد، میلگرد ستون از جنس فولاد معمولی می باشد. به منظور بدست آوردن عملکرد لرزه ای سازه های بتنی با میلگرد SMA، تحلیل دینامیکی افزایشی با استفاده از ده رکورد معروف زمین لرزه، برای هر سه نحوه میلگرد گذاری انجام شده است. سپس منحنی های شکنندگی با استفاده از خروجی های تحلیل IDA و با توجه به تعاریف FEMA356 برای سطوح عملکردی IO، LS و CP محاسبه و ترسیم گردید. نتایج به دست آمده از تحلیل‌هانشان می دهد، در قاب های سه طبقه شتاب طیفی متناظر با خرابی قاب ها تقریبا یکسان است، اما در مورد قاب های ۶ و ۸ طبقه این مقدار برای قاب‌های با فولاد معمولی بیش تر می باشد. همچنین در تمامی مدل ها، در تمامی سطوح عملکردی با افزایش ارتفاع احتمال شکست سازه افزایش می یابد.

**کلید واژه:** ساختمان‌های بتن مسلح، آلیاژ حافظه دار سوپراالاستیک، تحلیل دینامیکی افزایشی، منحنی‌های شکنندگی



## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست جدول‌ها.....	ل
فهرست شکل‌ها.....	م
<b>فصل ۱- مقدمه و کلیات.....</b>	<b>۱</b>
۱-۱- معرفی و تاریخچه.....	۲
۱-۲- لزوم استفاده از روشهای نوین برای کنترل سازه‌ها.....	۳
۱-۳- نایتینول نمونه‌ای از مواد حافظه دار.....	۴
۱-۴- کاربردها.....	۵
۱-۵- تحقیقات انجام شده پیشین.....	۶
۱-۶- لزوم انجام این مطالعه.....	۲۳
۱-۷- نحوه انجام پایان نامه.....	۲۵
۱-۸- سامان دهی مطالب پایان نامه.....	۲۵
<b>فصل ۲- معرفی آلیاژ حافظه دار شکلی.....</b>	<b>۲۷</b>
۲-۱- مقدمه.....	۲۸
۲-۲- مشخصات آلیاژ حافظه دار شکلی.....	۲۸
۲-۲-۱- ریز ساختار آلیاژهای حافظه دار شکلی.....	۲۹
۲-۲-۲- تبدیلات فازی.....	۳۰
۲-۲-۳- اثر حافظه شکلی.....	۳۱
۲-۲-۲-۱- اثر حافظه دار یک طرفه.....	۳۲
۲-۲-۲-۲- اثر حافظه دار دو طرفه.....	۳۴
۲-۲-۲-۴- اثر سوپرالاستیک.....	۳۵
۲-۲-۲-۵- رفتار مکانیکی.....	۳۶
۲-۳- پیچیدگی‌های رفتاری آلیاژهای حافظه دار شکلی.....	۳۷
۲-۳-۱- دما.....	۳۷
۲-۳-۲- ابعاد نمونه.....	۳۸
۲-۳-۳- تعداد چرخه‌های بارگذاری.....	۳۹
۲-۳-۴- سرعت بارگذاری.....	۳۹
۲-۴- آلیاژهای حافظه دار شکلی تجاری.....	۴۰
۲-۴-۱- آلیاژ حافظه شکلی نایتینول.....	۴۰
۲-۴-۲- آلیاژهای حافظه دار پایه مس.....	۴۲

فصل ۳ - معرفی روش تحلیل دینامیکی افزایشی.....	۴۴
۱-۳- مقدمه.....	۴۵
۱-۱-۳- روش استاتیکی خطی.....	۴۵
۲-۱-۳- روش دینامیکی خطی.....	۴۶
۳-۱-۳- روش استاتیکی غیر خطی (بار افزون).....	۴۶
۴-۱-۳- روش دینامیکی غیر خطی.....	۴۷
۲-۳- تحلیل دینامیکی افزایشی.....	۴۸
۱-۲-۳- معیار شدت لرزه ای (IM).....	۵۱
۲-۲-۳- معیار شدت خسارت (DM).....	۵۱
۳-۲-۳- ضریب مقیاس (SF).....	۵۲
۴-۲-۳- انتخاب رکوردهای زلزله.....	۵۲
۵-۲-۳- نحوه مقیاس کردن شتاب نگاشتها.....	۵۳
۳-۳- تعیین حالت حدی خرابی.....	۵۵
۴-۳- خصوصیات یک منحنی IDA.....	۵۸
۵-۳- خلاصه سازی منحنی های IDA.....	۵۹
فصل ۴ - معرفی مدل های مورد مطالعه.....	۶۱
۱-۴- مقدمه.....	۶۲
۲-۴- مشخصات سازه ها.....	۶۲
۳-۴- محاسبه طول مفصل پلاستیک.....	۶۵
۴-۴- روش های مدل سازی ویژگی های غیر خطی هندسی و مصالح.....	۶۶
۱- روش پلاستیسیته متمرکز.....	۶۷
۲- روش پلاستیسیته گسترده.....	۶۷
۵-۴- معرفی نرم افزار OpenSees.....	۶۹
۱-۵-۴- انواع مدل های رفتاری مصالح در برنامه.....	۷۱
۲-۵-۴- انواع مدل های مقاطع در برنامه.....	۷۲
۱-۲-۵-۴- مقاطع الاستیک.....	۷۲
۲-۲-۵-۴- مقاطع تک محوری.....	۷۲
۳-۲-۵-۴- مقاطع الیافی.....	۷۲
۳-۵-۴- انواع المان های موجود در برنامه.....	۷۳
۴-۵-۴- انواع الگوریتم های حل مسائل غیر خطی موجود در برنامه.....	۷۴
۶-۴- مدل سازی قاب های دو بعدی در نرم افزار OpenSees.....	۷۴
۱-۶-۴- مدل مصالح مورد استفاده جهت مدل سازی.....	۷۵
۱-۱-۶-۴- مصالح بتنی Concrete02.....	۷۵
۲-۱-۶-۴- مصالح فولادی Steel02.....	۷۷
۳-۱-۶-۴- مصالح آلیاژ حافظه دار SMA.....	۷۸
۲-۶-۴- المان ها و مقاطع مورد استفاده جهت مدل سازی اعضای سازه ای.....	۸۰

۸۰	تعریف جرم در سازه.....	۳-۶-۴
۸۱	مدلسازی میرایی.....	۴-۶-۴
۸۱	تبدیل سیستم مختصات کلی و جزئی المان ها.....	۵-۶-۴
۸۲	روش انتقال خطی .....	۱-۵-۶-۴
۸۲	روش انتقال P- $\Delta$ .....	۲-۵-۶-۴
۸۲	روش انتقال Corotational.....	۳-۵-۶-۴
۸۲	کنترل صحت مدلسازی و کارکرد نرم افزار OpenSees .....	۷-۴
۸۴	مقایسه اقتصادی مدل های مورد مطالعه .....	۸-۴
<b>فصل ۵- ارزیابی عملکرد لرزه ای قاب های بتنی با میلگردهایی از جنس آلیاژ حافظه دار . ۸۵</b>		
۸۶	مقدمه .....	۱-۵
۸۶	شتاب نگاشت های استفاده شده .....	۲-۵
۸۷	تعیین حالت های حدی خرابی .....	۳-۵
۸۸	دسته منحنی های IDA حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی قاب های مورد بررسی .....	۴-۵
۹۲	خلاصه سازی دسته منحنی های IDA .....	۵-۵
۱۰۱	آنالیز خرابی و منحنی های شکنندگی .....	۶-۵
<b>فصل ۶- نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات..... ۱۲۴</b>		
۱۲۵	نتایج .....	۱-۶
۱۲۷	پیشنهاداتی برای کارهای آینده .....	۲-۶
۱۲۸	پیوست ۱- شتابنگاشت های مورد استفاده در پایان نامه .....	
۱۳۳	پیوست ۲- نمودارهای طیف فوریه شتابنگاشت های مورد استفاده .....	
۱۳۸	فهرست مراجع .....	

## فهرست جدول‌ها

صفحه

عنوان

جدول ۱-۲: مشخصات آلیاژهای حافظه دار شکلی نیکل تیتانیوم [۲۶].....	۴۱
جدول ۲-۲: آلیاژهای حافظه دار شکلی نیکل تیتانیوم در مقابل فولاد ساختمانی معمولی [۲۶].....	۴۱
جدول ۳-۲: مشخصات فیزیکی آلیاژهای حافظه دار [۶].....	۴۲
جدول ۴-۲: مشخصات مکانیکی آلیاژهای حافظه دار [۶].....	۴۳
جدول ۱-۴: مشخصات مصالح استفاده شده در تحلیل‌های المان محدودی [۳۶].....	۶۴
جدول ۲-۴: ابعاد و نحوه آرماتور ستون‌ها [۳۶].....	۶۵
جدول ۳-۴: ابعاد و نحوه آرماتور تیرها [۳۶].....	۶۵
جدول ۴-۴: مقایسه زمان تناوب مود اول سازه‌های مدلسازی شده.....	۸۳
جدول ۵-۴: مقایسه اقتصادی مدل‌های مورد مطالعه.....	۸۴
جدول ۱-۵: مشخصات رکوردهای زلزله استفاده شده در تحلیل دینامیکی افزایشی مدل‌ها.....	۸۷
جدول ۲-۵: مقادیر شتاب طیفی بر حسب $g$ در پیوند اصلی سازه برای قاب سه طبقه Steel.....	۱۰۲
جدول ۳-۵: مقادیر شتاب طیفی بر حسب $g$ در پیوند اصلی سازه برای قاب سه طبقه Steel-SMA.....	۱۰۲
جدول ۴-۵: مقادیر شتاب طیفی بر حسب $g$ در پیوند اصلی سازه برای قاب سه طبقه SMA.....	۱۰۳
جدول ۵-۵: مقادیر شتاب طیفی بر حسب $g$ در پیوند اصلی سازه برای قاب شش طبقه Steel.....	۱۰۳
جدول ۶-۵: مقادیر شتاب طیفی بر حسب $g$ در پیوند اصلی سازه برای قاب شش طبقه Steel-SMA.....	۱۰۴
جدول ۷-۵: مقادیر شتاب طیفی بر حسب $g$ در پیوند اصلی سازه برای قاب شش طبقه SMA.....	۱۰۴
جدول ۸-۵: مقادیر شتاب طیفی بر حسب $g$ در پیوند اصلی سازه برای قاب هشت طبقه Steel.....	۱۰۵
جدول ۹-۵: مقادیر شتاب طیفی بر حسب $g$ در پیوند اصلی سازه برای قاب هشت طبقه Steel-SMA.....	۱۰۵
جدول ۱۰-۵: مقادیر شتاب طیفی بر حسب $g$ در پیوند اصلی سازه برای قاب هشت طبقه SMA.....	۱۰۶
جدول ۱۱-۵: پارامترهای توزیع لوگ نرمال $(\lambda, \beta)$ برای هر سه سطح عملکردی سازه‌های مورد مطالعه.....	۱۰۶
جدول ۱۲-۵: مقادیر $S_a$ متناظر با احتمالات وقوع مختلف در سطح عملکردی IO.....	۱۲۲
جدول ۱۳-۵: مقادیر $S_a$ متناظر با احتمالات وقوع مختلف در سطح عملکردی LS.....	۱۲۲
جدول ۱۴-۵: مقادیر $S_a$ متناظر با احتمالات وقوع مختلف در سطح عملکردی CP.....	۱۲۲
جدول ۱۴-۵: ظرفیت $S_a$ سازه‌های مورد مطالعه.....	۱۲۳

## فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

- شکل ۱-۱: دستگاه های مکانیکی برای آزمایش میلگرد های با اندازه بزرگ (a) آزمایش پیچشی (b) آزمایش خمشی (c) آزمایش کششی (d) آزمایش میلگرد های U شکل [۷]..... ۷
- شکل ۱-۲: سیستم جداگر لرزه ای [۹]..... ۸
- شکل ۱-۳: پل چند دهانه با تکیه گاه ساده [۱۰]..... ۹
- شکل ۱-۴: نحوه قرارگیری میلگرد های مقید کننده آلیاژ حافظه دار برای پل چند دهانه با تکیه گاه ساده در کوله و پایه های میانی [۱۰]..... ۹
- شکل ۱-۵: جزئیات اتصال با استفاده از آلیاژ حافظه دار شکلی [۱۱]..... ۱۰
- شکل ۱-۶: قاب برشی یک طبقه و پاسخ آن تحت تحریک تکیه گاهی با دو نوع مهاربند [۱۲]..... ۱۱
- شکل ۱-۷: مدل پل بلند مرتبه بزرگراهی [۱۳]..... ۱۲
- شکل ۱-۸: پاسخ پل با دو سیستم جداگر SMA و NZ تحت زلزله ضعیف [۱۳]..... ۱۳
- شکل ۱-۹: پاسخ پل با دو سیستم جداگر SMA و NZ تحت زلزله متوسط [۱۳]..... ۱۳
- شکل ۱-۱۰: پاسخ پل با دو سیستم جداگر SMA و NZ تحت زلزله شدید [۱۳]..... ۱۳
- شکل ۱-۱۱: پاسخ بار - جابه جایی وسط دهانه تیر های SMA و معمولی [۱۷]..... ۱۵
- شکل ۱-۱۲: پوش نرمال شده شکل پذیری بار - تغییر مکان تیرها تحت بارگذاری چرخه ای معکوس [۱۷]..... ۱۶
- شکل ۱-۱۳: بسته شدن ترک ها بعد از بارگذاری [۱۹]..... ۱۸
- شکل ۱-۱۴: نمونه بتنی و مراحل بارگذاری و باربرداری [۱۸]..... ۱۹
- شکل ۱-۱۵: سمت چپ: سیستم متصل کننده پیچ دار استفاده شده در تیرها، سمت راست: سیستم متصل کننده قفل شونده پیچی استفاده شده در دیوار برشی [۲۰]..... ۲۰
- شکل ۱-۱۶: سمت چپ: نحوه ترک خوردن تیر های SMA و سمت راست: نحوه ترک خوردن تیر های متداول [۲۰]..... ۲۱
- شکل ۱-۱۷: (a) جزئیات آرماتور قطعات JBC-1 و JBC-2 و (b) جزئیات وصله قطعه JBC-2 و (c) غلاف جدا متصل کننده قفل شونده پیچی برای اتصال میلگرد SMA به میلگرد فولادی [۳]..... ۲۳
- شکل ۱-۲: نمایش طرح کلی ریز ساختار نمونه ای از آلیاژ حافظه دار شکلی [۲۴]..... ۲۹
- شکل ۲-۲: رفتار SMA ها در حالت بدون تنش و تحت تأثیر تغییرات دما [۲۵]..... ۳۱
- شکل ۲-۳: نمونه ای از منحنی تنش - کرنش SMA با اثر حافظه شکلی [۲۶]..... ۳۲
- شکل ۲-۴: الف: رفتار شماتیک جسم در حالت حافظه یک طرفه - ب: نمودار تنش - کرنش - دما در حالت حافظه یک طرفه..... ۳۳
- شکل ۲-۵: الف: رفتار شماتیک جسم در حالت حافظه دو طرفه - ب: نمودار تنش - کرنش - دما در حالت حافظه دو طرفه [۲۷]..... ۳۴
- شکل ۲-۶: نمونه ای از منحنی تنش - کرنش SMA با اثر سوپرلاستیک [۲۶]..... ۳۶
- شکل ۲-۷: رابطه سه بعدی تنش، کرنش و دما در رفتار مکانیکی آلیاژ حافظه دار..... ۳۷
- شکل ۲-۸: رفتار سوپرلاستیک آلیاژ های حافظه دار در دماهای مختلف [۸]..... ۳۸

- شکل ۲-۹: رفتار سوپراالاستیک مواد حافظه دار شکلی تحت تأثیر ابعاد نمونه [۲۹]..... ۳۸
- شکل ۲-۱۰: اثر تعداد چرخه های بارگذاری بر روی رفتار سوپراالاستیک [۸]..... ۳۹
- شکل ۲-۱۱: اثر سرعت بارگذاری بر روی اثر سوپراالاستیک آلیاژهای حافظه دار شکلی [۸]..... ۴۰
- شکل ۳-۱: نحوه توزیع نیروی جانبی در روش تحلیل استاتیکی غیر خطی..... ۴۶
- شکل ۳-۲: منحنی تک رکورده IDA..... ۴۹
- شکل ۳-۳: دسته منحنی های IDA برای قاب ۳ طبقه Steel (همین پایان نامه)..... ۵۰
- شکل ۳-۴: تعیین نقطه ظرفیت سازه روی منحنی IDA، [۳۰]..... ۵۰
- شکل ۳-۵: نمودارهای IDA تک رکورده برای یک ساختمان مهاربندی تحت چهار رکورد زلزله مختلف [۳۰] ۵۸
- شکل ۴-۱: ساختمان بتن مسلح ۶ طبقه، (a) پلان و (b) ارتفاع [۳۶]..... ۶۴
- شکل ۴-۲: مقطع طولی آرماتور گذاری تیر [۳۶]..... ۶۵
- شکل ۴-۳: نمودار تنش- کرنش بتن ۰۲ با نرم شوندگی کششی خطی [۳۸]..... ۷۶
- شکل ۴-۴: مدل رفتار چرخه های تنش- کرنش مصالح بتن ۰۲ [۳۸]..... ۷۶
- شکل ۴-۵: نمودار تنش- کرنش مصالح فولاد ۰۲ [۳۸]..... ۷۷
- شکل ۴-۶: مدل رفتار چرخه های تنش- کرنش مصالح فولاد ۰۲ [۳۸]..... ۷۸
- شکل ۴-۷: نمودار تنش- کرنش مصالح آلیاژ حافظه دار شکلی (SMA) در نرم افزار OpenSees..... ۷۹
- شکل ۵-۱: دسته منحنی های IDA برای قاب ۳ طبقه Steel..... ۸۸
- شکل ۵-۲: دسته منحنی های IDA برای قاب ۳ طبقه Steel-SMA..... ۸۹
- شکل ۵-۳: دسته منحنی های IDA برای قاب ۳ طبقه SMA..... ۸۹
- شکل ۵-۴: دسته منحنی های IDA برای قاب ۶ طبقه Steel..... ۹۰
- شکل ۵-۵: دسته منحنی های IDA برای قاب ۶ طبقه Steel-SMA..... ۹۰
- شکل ۵-۶: دسته منحنی های IDA برای قاب ۶ طبقه SMA..... ۹۱
- شکل ۵-۷: دسته منحنی های IDA برای قاب ۸ طبقه Steel..... ۹۱
- شکل ۵-۸: دسته منحنی های IDA برای قاب ۸ طبقه Steel-SMA..... ۹۲
- شکل ۵-۹: دسته منحنی های IDA برای قاب ۸ طبقه SMA..... ۹۲
- شکل ۵-۱۰: دسته منحنی های خلاصه شده IDA برای قاب ۳ طبقه Steel..... ۹۳
- شکل ۵-۱۱: دسته منحنی های خلاصه شده IDA برای قاب ۳ طبقه Steel-SMA..... ۹۴
- شکل ۵-۱۲: دسته منحنی های خلاصه شده IDA برای قاب ۳ طبقه SMA..... ۹۴
- شکل ۵-۱۳: دسته منحنی های خلاصه شده IDA برای قاب ۶ طبقه Steel..... ۹۵
- شکل ۵-۱۴: دسته منحنی های خلاصه شده IDA برای قاب ۶ طبقه Steel-SMA..... ۹۵
- شکل ۵-۱۵: دسته منحنی های خلاصه شده IDA برای قاب ۶ طبقه SMA..... ۹۶
- شکل ۵-۱۶: دسته منحنی های خلاصه شده IDA برای قاب ۸ طبقه Steel..... ۹۶
- شکل ۵-۱۷: دسته منحنی های خلاصه شده IDA برای قاب ۸ طبقه Steel-SMA..... ۹۷
- شکل ۵-۱۸: دسته منحنی های خلاصه شده IDA برای قاب ۸ طبقه SMA..... ۹۷
- شکل ۵-۱۹: مقادیر میانه منحنی های IDA قاب های ۳ طبقه..... ۹۸
- شکل ۵-۲۰: مقادیر میانه منحنی های IDA قاب های ۶ طبقه..... ۹۸
- شکل ۵-۲۱: مقادیر میانه منحنی های IDA قاب های ۸ طبقه..... ۹۹
- شکل ۵-۲۲: مقادیر میانه منحنی های IDA قاب های Steel..... ۹۹

- شکل ۵-۲۳: مقادیر میانه منحنی های IDA قاب های Steel-SMA ..... ۱۰۰
- شکل ۵-۲۴: مقادیر میانه منحنی های IDA قاب های SMA ..... ۱۰۰
- شکل ۵-۲۵: منحنی های شکنندگی برای قاب سه طبقه Steel در سه سطح عملکردی ..... ۱۰۷
- شکل ۵-۲۶: منحنی های شکنندگی برای قاب سه طبقه Steel-SMA در سه سطح عملکردی ..... ۱۰۷
- شکل ۵-۲۷: منحنی های شکنندگی برای قاب سه طبقه SMA در سه سطح عملکردی ..... ۱۰۸
- شکل ۵-۲۸: منحنی های شکنندگی برای قاب شش طبقه Steel در سه سطح عملکردی ..... ۱۰۸
- شکل ۵-۲۹: منحنی های شکنندگی برای قاب شش طبقه Steel-SMA در سه سطح عملکردی ..... ۱۰۹
- شکل ۵-۳۰: منحنی های شکنندگی برای قاب شش طبقه SMA در سه سطح عملکردی ..... ۱۰۹
- شکل ۵-۳۱: منحنی های شکنندگی برای قاب هشت طبقه Steel در سه سطح عملکردی ..... ۱۱۰
- شکل ۵-۳۲: منحنی های شکنندگی برای قاب هشت طبقه Steel-SMA در سه سطح عملکردی ..... ۱۱۰
- شکل ۵-۳۳: منحنی های شکنندگی برای قاب هشت طبقه SMA در سه سطح عملکردی ..... ۱۱۱
- شکل ۵-۳۴: منحنی های شکنندگی برای قاب های سه طبقه در سطح عملکردی IO ..... ۱۱۲
- شکل ۵-۳۵: منحنی های شکنندگی برای قاب های سه طبقه در سطح عملکردی LS ..... ۱۱۲
- شکل ۵-۳۶: منحنی های شکنندگی برای قاب های سه طبقه در سطح عملکردی CP ..... ۱۱۳
- شکل ۵-۳۷: منحنی های شکنندگی برای قاب های شش طبقه در سطح عملکردی IO ..... ۱۱۳
- شکل ۵-۳۸: منحنی های شکنندگی برای قاب های شش طبقه در سطح عملکردی LS ..... ۱۱۴
- شکل ۵-۳۹: منحنی های شکنندگی برای قاب های شش طبقه در سطح عملکردی CP ..... ۱۱۴
- شکل ۵-۴۰: منحنی های شکنندگی برای قاب های هشت طبقه در سطح عملکردی IO ..... ۱۱۵
- شکل ۵-۴۱: منحنی های شکنندگی برای قاب های هشت طبقه در سطح عملکردی LS ..... ۱۱۵
- شکل ۵-۴۲: منحنی های شکنندگی برای قاب های هشت طبقه در سطح عملکردی CP ..... ۱۱۶
- شکل ۵-۴۳: منحنی های شکنندگی برای قاب های Steel در سطح عملکردی IO ..... ۱۱۷
- شکل ۵-۴۴: منحنی های شکنندگی برای قاب های Steel در سطح عملکردی LS ..... ۱۱۷
- شکل ۵-۴۵: منحنی های شکنندگی برای قاب های Steel در سطح عملکردی CP ..... ۱۱۸
- شکل ۵-۴۶: منحنی های شکنندگی برای قاب های Steel-SMA در سطح عملکردی IO ..... ۱۱۸
- شکل ۵-۴۷: منحنی های شکنندگی برای قاب های Steel-SMA در سطح عملکردی LS ..... ۱۱۹
- شکل ۵-۴۸: منحنی های شکنندگی برای قاب های Steel-SMA در سطح عملکردی CP ..... ۱۱۹
- شکل ۵-۴۹: منحنی های شکنندگی برای قاب های SMA در سطح عملکردی IO ..... ۱۲۰
- شکل ۵-۵۰: منحنی های شکنندگی برای قاب های SMA در سطح عملکردی LS ..... ۱۲۰
- شکل ۵-۵۱: منحنی های شکنندگی برای قاب های SMA در سطح عملکردی CP ..... ۱۲۱

**فصل اول**

**مقدمه و کلیات**



## ۱-۱- معرفی و تاریخچه

اولین مشاهدات از رفتار حافظه دار شکلی در سال ۱۹۳۲ توسط اولاندر<sup>۱</sup> در مطالعه‌اش درباره اثر لاستیک مانند<sup>۲</sup> در نمونه های طلا کادمیم و در سال ۱۹۳۸ توسط گرینگر و مورادیان<sup>۳</sup> در مطالعه خود بر روی آلیاژهای برنج (مس و روی) می‌باشد. سال‌ها بعد (۱۹۵۱) چانگ و رید<sup>۴</sup> برای اولین بار این اصطلاح بازیابی شکل<sup>۵</sup> را به کار بردند. آن‌ها همچنین آلیاژ های طلا - کادمیم مشغول به کار شدند. در سال ۱۹۶۲ ویلیام بوهرلر<sup>۶</sup> و همکارانش در آزمایشگاه مهمات نیروی دریایی آمریکا اثر حافظه شکلی را در آلیاژ نیکل و تیتانیوم (Ni-Ti) کشف کردند و نام ماده را به دلیل محل کارشان نایتینول (NiTiNOL<sup>۷</sup>) گذاشتند [۱].

در سال ۱۹۶۷، بولر و همکارانش تحقیقات گسترده خود را بر روی نایتینول و کاربردهای تجاری فراوان در صنایع ارائه دادند. از جمله کاربردهای مطرح شده ساخت کویلینگ توسط شرکت رایچم<sup>۸</sup> برای اتصال لوله های هیدرولیکی می‌باشد. که در صنایع هوایی و نیروی دریایی ایالات متحده و همچنین در حوزه های نفتی دریای شمال مورد استفاده قرار گرفت.

در سال ۱۹۸۰ میلادی مایکل و هاوت<sup>۹</sup> با انتشار مقاله ای از نتایج تحقیقات خودشان بر روی آلیاژ برنج، آن را به عنوان ماده جدید حافظه دار معرفی کردند [۲].

---

<sup>1</sup> Olander

<sup>2</sup> Rubber like effect

<sup>3</sup> Greninger and Mooradian

<sup>4</sup> Chang and Read

<sup>5</sup> Shape recovery

<sup>6</sup> William J. Buehler

<sup>7</sup> For Nickel-Titanium Naval Ordnance Laboratory

<sup>8</sup> Raychem

<sup>9</sup> Micheal and Hawt

## ۱-۲- لزوم استفاده از روش‌های نوین برای کنترل سازه‌ها

ساختمان‌ها و پل‌ها در نواحی با خطر لرزه ای زیاد مستعد خرابی‌های شدید و فروپاشی به دلیل تغییرشکل‌های جانبی زیاد در حین زلزله می‌باشند. به ویژه، المان‌های تیر-ستون در سازه‌های بتنی مسلح<sup>۱</sup> (RC) به شدت آسیب پذیر هستند و به عنوان ضعیف‌ترین اتصال در چنین سیستم‌های سازه ای به حساب می‌آیند [۳].

آیین نامه‌های طراحی لرزه ای حاضر، تاکید دارند که سازه‌های مقاوم در برابر زلزله به اندازه کافی به وسیله جزئیات آرماتور گذاری مناسب در نواحی بحرانی شکل پذیر باشند تا از رفتار الاستیک سازه تحت زلزله‌های متوسط مطمئن شوند. هرچند که ساخت سازه‌هایی که بتوانند تحت حرکت‌های شدید زمین، به صورت الاستیک عمل کنند بسیار دشوار و پرهزینه است. در طراحی لرزه ای مرسوم سازه‌های RC، انتظار می‌رود که آرماتورها به حد تسلیم برسند تا با تغییر شکل‌های دائمی آرماتورهای فولادی پس از تسلیم و خرابی بتن غیر محصور، انرژی مستهلک گردد. متعاقباً، در طی زمین لرزه‌های با مقیاس بزرگ، خرابی‌های شدید زیر سازه، فروپاشی ساختمان‌ها، بسته شدن پل‌ها، اخلاف در عملکرد گروه‌های امداد و نجات و در نهایت آسیب‌های جدی اقتصادی را نتیجه می‌دهد. در حالی که اگر سازه‌ها بعد از چنین زمین لرزه‌هایی قابل سرویس دهی باشند، از بسیاری از این فجایع جلوگیری می‌شود. سیستم‌های هوشمند برای سازه‌های عمرانی، سیستم‌هایی هستند که به طور خودکار می‌توانند مشخصات سازه ای را در پاسخ به اختلالات خارجی و یا بارهای شدید غیر منتظره بر ضد ایمنی سازه، افزایش عمر سازه و خدمت پذیری آن تعدیل کنند. یک تکنولوژی کلیدی در تحقق این هدف، توسعه و به کارگیری مصالح هوشمند است که می‌توانند در سازه‌ها بکار گرفته شوند.

---

<sup>1</sup> Reinforced Concrete

آلیاژ حافظه دار<sup>۱</sup> (SMA) سوپراالاستیک<sup>۲</sup> ماده‌ی ویژه‌ای است که قادر به تحمل تغییر شکل‌های غیر الاستیک بزرگ می‌باشد که شکل اصلی خود را با برداشت تنش باز می‌یابد، بنابراین می‌تواند نقطه‌ی روشنی برای مشکل تغییر شکل‌های دائمی باشد.

چنین المان‌های تیر-ستون مسلح شده با آلیاژ حافظه دار به مهندسان سازه اجازه می‌دهند تا اتصالات RC را به گونه‌ای طراحی کنند که خرابی کم و کاهش تعمیرات پس از زمین لرزه را دارا باشند. آلیاژ حافظه دار مدول الاستیسیته و حلقه‌های هیسترتیک نسبتاً کوچک‌تری در مقایسه با فولاد دارد، بنابراین استفاده از آلیاژ حافظه دار در مقاطع RC ممکن است تغییرات قابل توجهی در رفتار سازه‌های RC را نتیجه دهد. از این رو اهمیت کاربردی در طراحی آن‌ها دارد [۴].

### ۱-۳ - نایتینول نمونه‌ای از مواد حافظه‌دار

اگر چه انواع مختلفی از آلیاژهای حافظه دار وجود دارد، اما یکی از این مواد که بیش‌تر در دسترس است و خواص و رفتار مناسب دارد، آلیاژ نیکل-تیتانیوم است. این آلیاژ از ترکیب اتمی مساوی نیکل و تیتانیوم ساخته می‌شود و هر دو خاصیت سوپراالاستیک و حافظه‌داری را دارد. آلیاژ نیکل-تیتانیوم در بارگذاری سیکلی خصوصیات پایداری دارد، هم‌چنین مقاومت بالایی در برابر خوردگی از خود نشان می‌دهد.

اغلب یک فلز دیگر به نیکل و تیتانیوم اضافه می‌کنند تا خصوصیات رفتاری این آلیاژ را بهبود دهند و هم‌چنین از نظر مصرف تجاری بهینه شود.

---

<sup>1</sup> Shape Memory Alloy

<sup>2</sup> SuperElastic

دلیل اصلی گران بودن این مواد در کاربردهای مهندسی، تولید سخت و مشکل و نیاز به ماشین آلات پیشرفته و گران قیمت است. با این وجود، نیکل تیتانیوم به دلیل داشتن رفتار مناسب، امروزه بیشترین کاربرد را به عنوان ماده حافظه دار دارد [۵].

## ۱-۴- کاربردها

آلیاژهای حافظه دار دارای کاربرد های وسیعی در زمینه های مختلف صنعتی، تجاری، پزشکی می باشند. از جمله کاربردهای آن می توان به نیروی محرکه موتور های گرمایی، بال های هوشمند هواپیما، قاب عینک، مهاربندهای ارتودنسی و پروتزهای ارتوپدی اشاره کرد. که اساس کار و نحوه عملکرد کاربرد های مختلف آن معرفی می گردد [۶].

### - بازیابی آزاد<sup>۱</sup>

این نوع از آلیاژهای حافظه دار هنگامی که در فاز مارتنزیت هستند تغییر شکل می دهند. تنها عملی که نیاز است تا آنها را به شکل قبلی (اصلی) بازگرداند گرم کردن است. یکی از کاربردهای اصلی آن در فیلتر های لخته خون است.

### - بازیابی مقید<sup>۲</sup>

از بازیابی شکل کامل جلوگیری شده است. این بدین معنی است که آلیاژ تنشی را در المان های مقید شده ایجاد می کند. بارزترین مثال از این نوع محصولات در اتصالات لوله های هیدرولیکی می باشد. این نوع از اتصالات اولین بار برای جنگنده های F-14 ساخته شد.

---

<sup>1</sup> Free recovery

<sup>2</sup> Constrained recovery