

# سازه‌های بتنی مسلح شده با

# میلگرد FRP

تألیف

آنتونیو نانی

آنتونیو دی لوکا

هانی جواهری زاده

ترجمه

جواد نجفی

مسعود متولی

امیر حسین محمدی

هانی جواهری زاده



شماره مسلسل ۱۰۲۸۷

شماره انتشار ۴۱۳۸

### انتشارات دانشگاه تهران

Nanni, Antonio	: نانی، آنتونیو	سرشناسه
: سازه‌های بتنی مسلح شده با میلگرد FRP / تألیف آنتونیو نانی، آنتونیو دی‌لوکا، هانی جواهری‌زاده؛ ترجمه جواد نجفی... [و دیگران].		عنوان و نام پدیدآور
: تهران: دانشگاه تهران، مؤسسه انتشارات، ۱۳۹۸.		مشخصات نشر
: ظ، ۴۲۶ص: مصور.		مشخصات ظاهری
: انتشارات دانشگاه تهران؛ شماره انتشار ۴۱۳۸.		فروست
: 978-964-03-7385-9		شابک
: فیبا		وضعیت فهرست‌نویسی
Reinforced Concrete With FRP Bar: عنوان اصلی: [2014], Mechanics and Design.		یادداشت
: ترجمه جواد نجفی، مسعود متولی، امیرحسین محمدی، هانی جواهری‌زاده.		یادداشت
Reinforced Concrete	: بتن مسلح	موضوع
Reinforcing Bars	: میلگردگذاری	موضوع
Fiber Reinforced Concrete	: بتن تقویت شده با الیاف	موضوع
Polymer- Impregnated Concrete	: بتن پلیمری	موضوع
DeLuca, Antonio	: دی‌لوکا، آنتونیو	شناسه افزوده
Jawaheri Zadeh, Hany	: جواهری‌زاده، هانی، ۱۳۵۷- مترجم	شناسه افزوده
	: نجفی، جواد، ۱۳۴۰- مترجم	شناسه افزوده
	: متولی، مسعود، ۱۳۴۱- مترجم	شناسه افزوده
University of Tehran. Press	: دانشگاه تهران. مؤسسه انتشارات.	شناسه افزوده
TA۴۴۴	: ۱۳۹۸	رده‌بندی کنگره
	: ۶۲۰/۱۳۷	رده‌بندی دیویی
	: ۵۹۴۰۸۰۸	شماره کتابشناسی ملی

این کتاب مشمول قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان است. تکثیر کتاب به هر روش اعم از فتوکپی، ریسوگرافی، تهیه فایل‌های pdf، لوح فشرده، بازنویسی در وبلاگ‌ها، سایت‌ها، مجله‌ها و کتاب، بدون اجازه کتبی ناشر مجاز نیست و موجب پیگرد قانونی می‌شود و تمامی حقوق برای ناشر محفوظ است.  
(این کتاب با کاغذ حمایتی به چاپ رسیده است.)



عنوان: سازه‌های بتنی مسلح‌شده با میلگرد FRP  
تألیف: آنتونیو نانی - آنتونیو دی‌لوکا - هانی جواهری‌زاده  
ترجمه: جواد نجفی - مسعود متولی - امیرحسین محمدی - هانی جواهری‌زاده  
ویرایش ادبی: فرشاد رضوان  
نوبت چاپ: اول  
تاریخ انتشار: ۱۳۹۸  
شمارگان: ۲۰۰ نسخه  
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران  
چاپ و صحافی: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران

«مسئولیت صحت مطالب کتاب با مترجمان است»

بها: ۶۰۰۰۰۰ ریال

خیابان کارگر شمالی - خیابان شهید فرشی مقدم - مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران  
پست الکترونیک: press@ut.ac.ir - تارنما: http://press.ut.ac.ir  
پخش و فروش: تلفکس ۸۸۳۳۸۷۱۲

# بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

## فهرست

پیشگفتار مترجمان.....	ش
مقدمه.....	ض
درباره مؤلفان.....	غ
<b>بخش اول - مواد و روش های اندازه گیری.....</b>	<b>۱</b>
<b>فصل اول - معرفی.....</b>	<b>۳</b>
۱-۱- پیشینه.....	۳
۲-۱- میلگردهای GFRP.....	۴
۳-۱- بتن مسلح با میلگرد FRP.....	۶
۴-۱- پذیرش میلگردهای FRP از نظر مراجع رسمی صنعت ساختمان.....	۹
۱-۴-۱- ملاحظات حوزه کاربرد.....	۹
۵-۱- نقش معیار پذیرش از ICC-ES.....	۱۰
۶-۱- کاربردها.....	۱۲
منابع.....	۲۳
<b>فصل دوم - مشخصات مصالح.....</b>	<b>۲۹</b>
۱-۲- معرفی.....	۲۹
۲-۲- میلگردهای FRP.....	۲۹
۳-۲- اجزای تشکیل دهنده میلگرد FRP: الیاف و ماتریس رزینی.....	۲۹
۱-۳-۲- الیاف.....	۳۰
۲-۳-۲- ماتریس ها.....	۳۲
۴-۲- تولید با روش پالترورژن.....	۳۴
۱-۴-۲- زمان ژل بودن و دمای اوج حرارت زایی.....	۳۷
منابع.....	۳۹

۴۱	فصل سوم - مشخصات میلگردهای FRP
۴۱	۱-۳- مشخصات فیزیکی و مکانیکی میلگردهای FRP
۴۵	۲-۳- روش‌های آزمایش
۴۶	۱-۲-۳- روش‌های آزمون در ASTM
۵۲	۲-۲-۳- روش‌های آزمون ACI440
۵۵	۳-۳- تأییدیه و تضمین کیفیت محصولات
۶۱	۱-۳-۳- مواد تشکیل دهنده
۶۲	۲-۳-۳- دمای انتقال شیشه (T <sub>G</sub> )
۶۳	۳-۳-۳- اندازه میلگردها
۶۵	۴-۳-۳- خصوصیات مکانیکی
۶۵	۵-۳-۳- مشخصات دوام
۶۷	۶-۳-۳- میلگردهای دارای خم
۶۸	۴-۳- عملکرد سازه‌های بتنی مسلح با میلگردهای FRP تحت تماس با حریق
۶۹	منابع
۷۵	بخش دوم - تحلیل و طراحی
۷۷	فصل چهارم - خمش
۷۷	فهرست علائم
۸۲	۱-۴- مقدمه
۸۲	۲-۴- مشخصات مصالح
۸۲	۱-۲-۴- مشخصات طراحی FRP
۸۳	۲-۲-۴- مشخصات طراحی بتن
۸۴	۳-۴- رفتار خمشی مقاطع مسلح شده با میلگردهای FRP
۸۴	۱-۳-۴- فرضیات در طرح خمشی عضو
۸۵	۲-۳-۴- الگوهای شکست
۹۲	۳-۳-۴- مقاومت خمشی عضو با شکست فشاری
۹۴	۴-۳-۴- مقاومت خمشی عضو با شکست کششی (گسیختگی در FRP)
۹۵	۵-۳-۴- مقاومت خمشی عضو با شکست کششی به روش ACI440.1R-06 (گسیختگی در FRP)
۹۶	۶-۳-۴- شکل پذیری در اعضای بتنی مسلح شده با میلگردهای FRP

فهرست □ ج

۹۶	۳-۴-۷-مثال‌ها- مقاومت خمشی
۱۰۹	۴-۴-ضرایب کاهش مقاومت خمشی
۱۰۹	۴-۴-۱-روش آیین‌نامه ACI440.1R-06
۱۱۱	۴-۴-۲-روش جدید
۱۱۲	۴-۵-محدودیت‌های میلگردهای FRP
۱۱۲	۴-۵-۱-حداقل میلگرد FRP
۱۱۳	۴-۵-۲-حداکثر میلگرد FRP
۱۱۴	۴-۵-۳-میلگرد حرارت و جمع‌شدگی
۱۱۵	۴-۶-ملاحظات طراحی
۱۱۵	۴-۶-۱-ترکیبات بار (حالت‌های حد نهایی و بهره‌برداری)
۱۱۵	۴-۶-۲-آرایش میلگردهای FRP در چندلایه
۱۱۷	۴-۶-۳-بازتوزیع (بازپخش) لنگر
۱۱۸	۴-۶-۴-میلگرد FRP فشاری در عضو خمشی
۱۲۰	۴-۶-۵-ملاحظات ویژه بر روی ظرفیت خمشی اعضای مسلح‌شده با FRP ناشی از آتش‌سوزی
۱۲۳	منابع

فصل پنجم - طراحی اعضای تحت اثر توأم خمش و فشار ۱۲۵

فهرست علائم ۱۲۵

۱۲۹	۵-۱-مقدمه
۱۲۹	۵-۲-استفاده از میلگردهای FRP به‌عنوان میلگرد فشاری
۱۳۱	۵-۳-محدودیت‌های کلی طراحی برای ستون‌های بتنی مسلح‌شده با FRP
۱۳۱	۵-۴-ستون‌های بتنی مسلح تحت بار محوری
۱۳۱	۵-۴-۱-ستون‌های بتنی با میلگرد فولادی
۱۳۳	۵-۴-۲-ستون‌های بتنی مسلح‌شده با FRP
۱۳۶	۵-۵-توصیه‌های طراحی برای ستون‌های مسلح‌شده با میلگردهای GFRP
۱۳۶	۵-۵-۱-حداقل میلگرد طولی
۱۳۷	۵-۵-۲-یکنواختی بین GFRP و بتن تحت بار فشاری
۱۳۸	۵-۵-۳-محدودیت کرنش کششی GFRP
۱۳۸	۵-۵-۴-محدودیت حداکثر فاصله میلگردهای عرضی

ح □ سازه‌های بتنی مسلح شده با میلگرد FRP

۱۳۹	.....	۵-۵-۵-سختی اصلاح‌شده ستون‌ها
۱۴۲	.....	۵-۵-۶-اثر لاغری
۱۴۳	.....	۵-۶-عضو تحت اثر توأم فشاری و خمشی
۱۴۴	.....	۵-۶-۱-منحنی اندرکنش مقاطع مستطیلی شکل
۱۴۷	.....	۵-۶-۲-منحنی اندرکنش ستون‌های با مقاطع دایره‌ای
۱۵۰	.....	۵-۶-۳-چند مسئله - منحنی اندرکنش P-M
۱۵۲	.....	۵-۷-ضریب کاهش مقاومت برای ترکیب بارهای محوری و خمشی
۱۵۵	.....	۵-۸-ستون تحت بار محوری و خمش دومحوره
۱۵۸	.....	منابع

۱۶۱	.....	فصل ششم - طراحی برشی
۱۶۱	.....	فهرست علائم
۱۶۳	.....	۶-۱-مقدمه
۱۶۳	.....	۶-۲-عملکرد برشی در اعضای بتنی مسلح‌شده با میلگرد عرضی FRP در مقایسه با فولاد
۱۶۴	.....	۶-۳-طراحی برشی اعضای بتنی مسلح‌شده با FRP
۱۶۵	.....	۶-۳-۱-سهام بتن در مقاومت برشی، $V_c$
۱۷۱	.....	۶-۳-۲-سهام میلگردهای برشی در مقاومت برشی
۱۷۴	.....	۶-۳-۳-ضریب کاهش مقاومت برشی
۱۷۴	.....	۶-۳-۴-برش اصطکاکی
۱۷۵	.....	۶-۳-۵-تنش‌های برشی ناشی از پیچش
۱۷۷	.....	۶-۴-مثال‌ها
۱۸۹	.....	منابع

۱۹۱	.....	فصل هفتم - طول پیوستگی و وصله
۱۹۱	.....	فهرست علائم
۱۹۲	.....	۷-۱-مقدمه
۱۹۲	.....	۷-۲-مقاومت خمشی اسمی در اثر شکست چسبندگی
۱۹۴	.....	۷-۳-طول مهارتی و پیوستگی
۱۹۴	.....	۷-۳-۱-طول پیوستگی میلگرد مستقیم

فهرست □ خ

۱۹۴ ..... ۲-۳-۷ طول پیوستگی میلگرد دارای خم

۱۹۵ ..... ۴-۷-۴ وصله پوششی

۱۹۶ ..... منابع

فصل هشتم - حالت بهره‌برداری ..... ۱۹۷

فهرست علایم ..... ۱۹۷

۲۰۰ ..... ۱-۸-۱ مقدمه

۲۰۰ ..... ۲-۸-۲ مشخصات مقطع

۲۰۲ ..... ۳-۸-۳ انتخاب ابعاد اولیه عضو

۲۰۴ ..... ۴-۸-۴ کنترل عرض ترک

۲۰۶ ..... ۵-۸-۵ کنترل تغییر مکان (افت)

۲۰۷ ..... ۵-۸-۱-۱ تغییر مکان آنی الاستیک در تیرها و دال‌های یک‌طرفه

۲۱۱ ..... ۵-۸-۲-۱ محاسبه تغییر مکان الاستیک آنی به روش بیشهوف

۲۱۲ ..... ۵-۸-۳-۱ تغییر مکان آنی الاستیک دال دوطرفه

۲۱۳ ..... ۵-۸-۴-۱ اثر خزش بتن بر روی تغییر مکان عضو تحت بار دائمی

۲۱۴ ..... ۶-۸-۱ گسیختگی ناشی از خزش و خستگی در FRP

۲۱۶ ..... منابع

بخش سوم - مثال‌های طراحی ..... ۲۱۷

فصل نهم - طراحی دال یک‌طرفه ..... ۲۱۹

۲۱۹ ..... ۱-۹-۱ معرفی

۲۱۹ ..... ۲-۹-۲ خلاصه طراحی

۲۲۶ ..... ۳-۹-۳ مرحله اول - تعریف هندسه دال و مشخصات بتن

۲۲۶ ..... ۳-۹-۱-۱ هندسه

۲۲۶ ..... ۳-۹-۲-۱ مشخصات بتن

۲۲۷ ..... ۳-۹-۳-۱ تقریب تحلیلی منحنی تنش - کرنش فشاری بتن - مدل Todeschini

۲۲۸ ..... ۴-۹-۴ مرحله دوم - محاسبه بارهای ضریب‌دار

۲۲۹ ..... ۵-۹-۵ مرحله سوم - محاسبه لنگرهای خمشی و نیروهای برشی

۲۳۱ ..... ۶-۹-۶ مرحله چهارم - طراحی میلگردهای اصلی FRP

۲۳۳	۹-۶-۱- حالت اول - تکیه‌گاه خارجی
۲۴۲	۹-۶-۲- حالت دوم - وسط دهانه
۲۴۸	۹-۶-۳- حالت سوم - تکیه‌گاه داخلی
۲۵۵	۹-۶-۴- دیاگرام لنگر خمشی نهایی - دهانه خارجی
۲۵۵	۹-۶-۵- دیاگرام لنگر خمشی نهایی - دهانه داخلی
۲۵۶	۹-۷-۷- مرحله پنجم - کنترل تنش گسیختگی خزش
۲۵۶	۹-۷-۱- حالت اول - تکیه‌گاه خارجی
۲۵۷	۹-۷-۲- حالت دوم - وسط دهانه
۲۵۸	۹-۷-۳- حالت سوم - تکیه‌گاه داخلی
۲۵۹	۹-۸-۸- مرحله ششم - ارزیابی عرض ترک
۲۵۹	۹-۸-۱- حالت اول - تکیه‌گاه خارجی
۲۶۰	۹-۸-۲- حالت دوم - وسط دهانه
۲۶۱	۹-۸-۳- حالت سوم - تکیه‌گاه داخلی
۲۶۲	۹-۹-۹- مرحله هفتم - کنترل حداکثر تغییر مکان وسط دهانه
۲۶۳	۹-۹-۱- حالت اول - تکیه‌گاه خارجی
۲۶۴	۹-۹-۲- حالت دوم - وسط دهانه
۲۶۴	۹-۹-۳- حالت سوم - تکیه‌گاه داخلی
۲۶۶	۹-۱۰-۱۰- مرحله هشتم - کنترل ظرفیت برشی
۲۶۶	۹-۱۰-۱- حالت اول - تکیه‌گاه خارجی
۲۶۷	۹-۱۰-۲- حالت دوم - تکیه‌گاه داخلی
۲۶۷	۹-۱۱-۱۱- مرحله نهم - طراحی میلگردهای FRP حرارت و جمع‌شدگی
۲۶۸	۹-۱۲-۱۲- مرحله دهم - بررسی مقاومت خمشی در برابر آتش‌سوزی طبق رابطه نیگر و همکاران
۲۷۲	منابع

۲۷۳	فصل دهم - طراحی تیر T شکل
۲۷۳	۱۰-۱- معرفی
۲۷۳	۱۰-۲- خلاصه طراحی
۲۷۸	۱۰-۳-۱- مرحله اول - تعریف هندسه تیر و مشخصات بتن
۲۷۸	۱۰-۳-۱- هندسه تیر



۲۷۹	۱۰-۳-۲- مشخصات بتن.....
۲۸۰	۱۰-۳-۳- تقریب تحلیلی منحنی تنش - کرنش فشاری بتن - مدل Todeschini.....
۲۸۱	۱۰-۴-۱- مرحله دوم- محاسبه بارهای ضریبدار.....
۲۸۳	۱۰-۵-۱- مرحله سوم - محاسبه لنگرهای خمشی و نیروهای برشی.....
۲۸۴	۱۰-۶-۱- مرحله چهارم - طراحی میلگردهای اصلی FRP برای تأمین ظرفیت خمشی.....
۲۸۶	۱۰-۶-۱- حالت اول - تکیه‌گاه خارجی.....
۲۹۷	۱۰-۶-۲- حالت دوم - وسط دهانه.....
۳۰۶	۱۰-۶-۳- حالت سوم - تکیه‌گاه داخلی.....
۳۱۴	۱۰-۷-۱- مرحله پنجم- کنترل تنش گسیختگی خزش.....
۳۱۴	۱۰-۷-۱- حالت اول - تکیه‌گاه خارجی.....
۳۱۵	۱۰-۷-۲- حالت دوم- وسط دهانه.....
۳۱۶	۱۰-۷-۳- حالت سوم- تکیه‌گاه داخلی.....
۳۱۷	۱۰-۸-۱- مرحله هشتم- ارزیابی عرض ترک.....
۳۱۷	۱۰-۸-۱- حالت اول - تکیه‌گاه خارجی.....
۳۱۸	۱۰-۸-۲- حالت دوم- وسط دهانه.....
۳۱۹	۱۰-۸-۳- حالت سوم- تکیه‌گاه داخلی.....
۳۲۰	۱۰-۹-۱- مرحله هفتم- کنترل حداکثر تغییر مکان وسط دهانه.....
۳۲۵	۱۰-۱۰-۱- مرحله هشتم- طراحی میلگردهای FRP برای ظرفیت برشی.....
۳۲۸	۱۰-۱۱-۱- مرحله نهم- محاسبه مشارکت FRP در مقاومت پیچشی تیر.....
۳۳۱	منابع.....

### ۳۳۳ فصل یازدهم - طراحی دال دو طرفه.....

۳۳۳	۱۱-۱- معرفی.....
۳۳۴	۱۱-۲- خلاصه طراحی.....
۳۳۹	۱۱-۳-۱- مرحله اول - تعریف هندسه تیر و مشخصات بتن.....
۳۳۹	۱۱-۳-۱- هندسه دال.....
۳۳۹	۱۱-۳-۲- مشخصات بتن.....
۳۴۰	۱۱-۳-۳- تقریب تحلیلی منحنی تنش - کرنش فشاری بتن - مدل Todeschini.....
۳۴۰	۱۱-۴-۱- مرحله دوم- محاسبه بارهای ضریبدار.....

۳۴۲	۱۱-۵- مرحله سوم- محاسبه لنگرهای خمشی و نیروهای برشی
۳۴۳	۱۱-۶- مرحله چهارم- طراحی میلگردهای اصلی FRP برای تأمین ظرفیت خمشی
۳۴۴	۱۱-۶-۱- کنترل ضخامت دال
۳۴۵	۱۱-۶-۲- میلگرد FRP حرارت و جمع‌شدگی
۳۴۶	۱۱-۶-۳- ظرفیت خمشی دال
۳۴۸	۱۱-۶-۴- مقاومت خمشی با استفاده از ضرایب جدیداً پیشنهادشده
۳۵۰	۱۱-۶-۵- بررسی مقاومت خمشی با توجه به طول مهاری در تکیه‌گاه خارجی
۳۵۲	۱۱-۶-۶- طول گیرایی برای میلگردهای لنگر خمشی مثبت
۳۵۲	۱۱-۶-۷- وصله پوششی کششی
۳۵۲	۱۱-۶-۸- میلگردهای ویژه در گوشه‌ها
۳۵۳	۱۱-۶-۹- کنترل مقاومت برشی
۳۵۳	۱۱-۷- مرحله پنجم- کنترل تنش گسیختگی خزش
۳۵۴	۱۱-۸- مرحله ششم- ارزیابی عرض ترک
۳۵۵	۱۱-۹- مرحله هفتم- کنترل حداکثر تغییر مکان وسط دهانه
۳۵۶	۱۱-۱۰- مرحله هشتم- ارزیابی برش منگنه‌ای (بدون در نظر گرفتن تیرهای پیرامونی)
۳۵۶	۱۱-۱۰-۱- کنترل دال در ستون A <sub>۱</sub>
۳۵۷	۱۱-۱۰-۲- کنترل دال در ستون B <sub>۱</sub>
۳۵۸	۱۱-۱۰-۳- کنترل دال در ستون B <sub>۲</sub>
۳۵۹	منابع

۳۶۱	فصل دوازدهم- طراحی ستون
۳۶۱	۱۲-۱- معرفی
۳۶۳	۱۲-۲- خلاصه طراحی
۳۷۰	۱۲-۳- مرحله اول- تعریف هندسه ستون و مشخصات بتن
۳۷۰	۱۲-۳-۱- هندسه ستون
۳۷۱	۱۲-۳-۲- مشخصات بتن
۳۷۱	۱۲-۴- مرحله دوم- محاسبه بارهای نهایی
۳۷۳	۱۲-۵- مرحله سوم- طراحی میلگردهای طولی FRP
۳۷۶	۱۲-۵-۱- نقطه اول- فشار خالص

فهرست □ ز

۳۷۷	۱۲-۵-۲- نقطه دوم- انطباق تار خنثی با پایین ترین تار مقطع
۳۷۸	۱۲-۵-۳- نقطه سوم- تار خنثی داخل مقطع ( $c_{bal} \leq c < h$ )
۳۸۰	۱۲-۵-۴- نقطه چهارم- مقطع متعادل
۳۸۲	۱۲-۵-۵- نقطه پنجم- انطباق تار خنثی روی بالاترین تار مقطع
۳۸۳	۱۲-۵-۶- نقطه ششم- کشش خالص
۳۸۵	۱۲-۶- مرحله چهارم - طراحی میلگردهای برشی FRP
۳۸۸	۱۲-۷- مرحله پنجم- کنترل تنش گسیختگی خزش
۳۹۰	منابع

فصل سیزدهم- طراحی پی منفرد مربعی شکل ۳۹۱

۳۹۱	۱۳-۱- معرفی
۳۹۲	۱۳-۲- خلاصه طراحی
۳۹۵	۱۳-۳- مرحله اول- تعریف مشخصات بتن
۳۹۵	۱۳-۳-۱- مشخصات بتن
۳۹۶	۱۳-۳-۲- تقریب تحلیلی منحنی تنش - کرنش فشاری بتن - مدل Todeschini
۳۹۷	۱۳-۴- مرحله دوم - محاسبه نیروهای محوری و لنگر خمشی در حالت بهره برداری
۳۹۸	۱۳-۵- مرحله سوم- تحلیل اولیه
۳۹۸	۱۳-۵-۱- طراحی ابعاد پی
۳۹۹	۱۳-۵-۲- بررسی اثرات خروج از مرکزی
۴۰۰	۱۳-۵-۳- فشار نهایی در زیر پی
۴۰۲	۱۳-۵-۴- طراحی عمق پی
۴۰۸	۱۳-۶- مرحله چهارم- طراحی میلگردهای FRP برای تحمل لنگر خمشی
۴۱۳	۱۳-۷- مرحله پنجم- بررسی شکست ناشی از خزش
۴۱۴	۱۳-۸- مرحله ششم- بررسی عرض ترک
۴۱۵	۱۳-۹- مرحله هفتم- بررسی مجدد مقاومت برشی
۴۱۷	منابع

فهرست واژگان ۴۱۹



## پیشگفتار مترجمان

بتن مسلح از متداول‌ترین مصالح برای ساخت سازه‌ها در جهان محسوب می‌شود. این سازه‌ها شامل گستره وسیعی از ساختمان‌های مسکونی کوچک تا برج‌های بلند، پل‌ها، سازه‌های صنعتی و نفتی و پتروشیمی بندرها، سازه‌های دریایی، سدها و کانال‌های انتقال آب، تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، آب‌شیرین‌کن‌ها، کولینگ‌تاورها و ... است.

بتن مسلح از دو عنصر اصلی بتن و میلگردهای مسلح‌کننده یا آرماتور تشکیل می‌شود. در سال‌های اخیر پیشرفت‌های فراوانی در بهبود کیفیت بتن به‌دست آمده است و هر سال مواد و روش‌های جدیدی برای افزایش کیفیت و دوام بتن ارائه می‌شود.

در سال‌های اولیه شاهد بهبود کیفیت مصالح فولادی میلگردهای مسلح‌کننده بتن از نظر ساخت و شکل ظاهری و همچنین مشخصات مکانیکی بودیم؛ ولی در سال‌های گذشته پیشرفت‌های کمتری در مشخصات آرماتورهای فولادی اتفاق افتاده است. با این حال محققان کشورهای مختلف برای یافتن مصالح دیگری به‌عنوان میلگردهای مسلح‌کننده بتن تلاش‌های بسیاری کرده‌اند. هم‌اکنون یکی از مناسب‌ترین مصالح برای ساخت میلگردهای مسلح‌کننده بتن، کامپوزیت‌های FRP است.

در کتاب حاضر تلاش می‌کنیم که مهم‌ترین اطلاعات مورد نیاز در زمینه شناخت این نوع مصالح، استانداردها و تست‌های آن و نیز نحوه کاربرد آن در ساخت سازه‌ها را به همراه محاسبات سازه‌ای به‌صورت یکجا به علاقه‌مندان ارائه کنیم. این کتاب که به همت آقای پرفسور نانی<sup>۱</sup> و همکاران ایشان تهیه شده، در حال حاضر یکی از بهترین منابع موجود در این زمینه است.

گروه ترجمه امیدوار است ارائه این کتاب به زبان فارسی قدمی پیشرو در دانش فنی کاربرد میلگردهای کامپوزیت FRP در سازه‌های بتنی در ایران باشد.

بی‌شک هیچ اثری خالی از نقص نیست لطفاً در صورتی که خطایی مشاهده کردید و یا اگر پیشنهادی داشتید، پیغام خود را به آدرس زیر ارسال کنید:

«amirh.mohammadi@ut.ac.ir»



## مقدمه

با گذشت بیش از ۲۲ سال از تشکیل کمیتهٔ ACI 440 (انستیتو بتن آمریکا) به‌عنوان بخش تخصصی استفاده از سیستم FRP در سازه‌های بتنی و نزدیک به نیم سده تحقیق و تجربه، هم‌اکنون شاهد کاربرد روزافزون میلگردهای FRP در سازه‌های بتنی در سراسر جهان هستیم. به‌تازگی کمیتهٔ ACI 440 شروع به تهیهٔ یک آیین‌نامهٔ طراحی با لحن الزام‌آور کرده است. این آیین‌نامه در کنار سایر مدارک، از جمله گزارش‌ها، راهنماها، ملاحظات ویژه، دستورالعمل‌های انجام دادن آزمایش ASTM و ملاحظات ویژهٔ مربوط به مصالح، نه‌تنها در آمریکای شمالی بلکه در سرتاسر جهان به رشد استفاده از میلگردهای FRP کمک خواهد کرد. انگیزهٔ اصلی متخصصان و کارفرمایان برای استفاده از مصالح FRP، دوام در سازه‌های بتنی است.

مخاطبان اصلی این کتاب مهندسان و مجریان هستند. در این کتاب مباحث فنی ACI شامل مفاهیم اولیه در ارتباط با طراحی و عملکرد اعضای بتنی مسلح‌شده با میلگردهای FRP و جزئیات مربوط به نحوهٔ مسلح‌سازی مطرح شده است. دانشجویان و محققان نیز می‌توانند از اطلاعات ارزشمند این کتاب در امور تحصیلی یا تحقیقاتی خویش بهره‌مند شوند. این کتاب مبحث میلگردهای FRP استفاده‌شده در داخل بتن (مدفون در بتن) و بدون نیروهای پیش‌تنیدگی را دربر می‌گیرد، لذا مطالب مربوط به روش‌های مسلح‌سازی در نزدیک سطح (NSM<sup>1</sup>) یا وجود نیروهای پیش‌تنیدگی در میلگرد، از محدودهٔ بحث کتاب خارجند. در حین تألیف این کتاب فرض بر این بوده است که خوانندگان با مبحث سازه‌های بتنی (طراحی، تحلیل و اجرا) و همچنین فناوری بتن آشنایی دارند. این کتاب با روندی مشابه سازه‌های بتنی مرسوم، به سه بخش تقسیم شده است.

### بخش اول: مصالح و روش‌های آزمایش

در فصل اول به تاریخچه، وضعیت فعلی کاربردهای این محصول و ادامهٔ تحقیقات مربوط به آن در جهان پرداخته شده و همچنین به راهنماهای طراحی موجود و کارهای علمی و پروژه‌های مرتبط ارجاع داده شده است.

در ادامهٔ این فصل به معرفی ملاحظاتی در خصوص محدودیت استفاده از این مصالح (که اغلب به دلیل عدم تجربهٔ کافی است و نه مباحث مهندسی) پرداخته شده است. در نهایت این فصل با معرفی چند پروژهٔ انجام‌گرفته به پایان می‌رسد.

در **فصل دوم** اطلاعاتی در خصوص مشخصات و خصوصیات مواد تشکیل‌دهنده مصالح FRP ارائه می‌شود. با توجه به هدف اصلی کتاب، تنها مطالب فنی که طراحان و مجریان بیشتر به آن نیاز دارند، گردآوری و به مباحث علمی جامع‌تر ارجاع داده شد. همچنین به آزمایش‌ها و معیارهای کنترل کیفیت موردنیاز در اجرای پروژه‌ها پرداختیم. در ادامه انواع میلگردهای FRP (که در داخل بتن استفاده می‌شوند) معرفی شده‌اند.

در **فصل سوم** روش‌های موجود برای اندازه‌گیری و انجام دادن آزمایش‌ها، برای تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی میلگردهای FRP تشریح شده‌اند. به مطالب علمی که شاید کمتر در بخش‌های اجرایی استفاده شوند و همچنین استانداردهای موجود ASTM نیز ارجاع داده شده است. در انتها آزمایش‌ها و معیارهای کنترل کیفیت مورد نیاز معرفی شده‌اند.

### بخش دوم: تحلیل و طراحی

**فصل چهارم** مطالب مربوط به اعضای خمشی را دربر می‌گیرد و رفتار خمشی اعضا را با جزییات شرح می‌دهد. اعضای خمشی از جمله تیرها، دال‌های یک و دوطرفه و پی‌های منفرد هستند. بحث قابلیت اعتماد در سازه‌ها و به‌دست آوردن ضرایب کاهش مقاومت در این فصل مطرح شده‌اند. مثال‌های این فصل تنها برای کمک به درک مطالب آن است، در حالی که در بخش سوم کتاب مسائل جامع‌تری ارائه شده‌اند.

**فصل پنجم** به اعضای محوری - خمشی می‌پردازد. تاکنون در آیین‌نامه‌ها و راهنماهای موجود، به موضوع طراحی و کاربرد میلگردهای FRP در ستون‌ها توجه نشده، به همین دلیل در این فصل مقدمات لازم برای کاربرد میلگردهای FRP در ستون‌های بتنی ارائه شده است. در بخش سوم کتاب مثال طراحی ستون‌های مسلح‌شده با FRP ارائه شدند که به فهم مطالب این فصل کمک خواهد کرد. اعضای محوری (ستون) با شکل مقطع مستطیلی و دایره‌ای و همچنین دیوارهای برشی در این فصل پوشش داده شده‌اند.

**فصل ششم** کتاب به طرح برشی اعضای بتنی مسلح‌شده با میلگردهای FRP اختصاص دارد. در این فصل با مراحل طرح برشی اعضای چون تیر، ستون و دیوار آشنا می‌شویم. این فصل با بحث پیچش در تیر تکمیل شده است. مثال‌های این فصل تنها برای کمک به درک مطالب فصل هستند، در حالی که در بخش سوم کتاب مسئله‌های جامع‌تری در این ارتباط ارائه شده است.

**فصل هفتم** مطالبی چون طول مهاری، طول وصله و کیفیت چسبندگی را دربرگرفته است. بحث میلگردهای دارای خم و قلاب نیز در این فصل پوشش داده شده‌اند. در این بخش همچنین اهمیت



مقاومت چسبندگی میلگرد و بتن مشخص و تأثیر آن بر مقاومت خمشی عضو بررسی شده است. همچنین در این فصل کتاب مطالب تکمیلی طراحی، برای مثال‌های بخش سوم کتاب ارائه شده‌اند.

**فصل هشتم** به بررسی وضعیت بهره‌برداری اعضای خمشی اختصاص دارد. در این فصل حدود مجاز برای شرایط بهره‌برداری معرفی و با ارائه روش‌های محاسباتی، مراحل کنترل این حدود تشریح شده است. همچنین از این فصل کتاب به‌منظور تکمیل طراحی اعضا در مثال‌های بخش سوم کتاب استفاده شده است.

### بخش سوم: مثال‌های طراحی

در بخش سوم، یک ساختمان دوطبقه با کاربری مربوط به مرکز درمانی و به‌منظور طراحی اعضای مختلف یک سازه، در نظر گرفته شده است. در این بخش سقف طبقه دوم (دال یک‌طرفه در فصل نهم و دال دوطرفه در فصل هشتم)، تیرهای داخلی (فصل یازدهم)، ستون طبقه اول (فصل دوازدهم) و پی منفرد (فصل سیزدهم) برای طراحی انتخاب شده‌اند. تصمیم بر این بود که مفاهیم تجربی طراحی اعضای کلیدی یک ساختمان به‌وسیله نرم‌افزار Mathcad<sup>®</sup> نشان داده شوند، عبارات ریاضی در این ابزار قوی محاسباتی با آنچه در کتاب آمده یکسان است<sup>۱</sup> و به این ترتیب خواننده می‌تواند قدم‌به‌قدم در جریان روند طراحی قرار بگیرد. همچنین خواننده می‌تواند از این مثال‌های حل‌شده، به‌عنوان نمونه در پروژه‌های خود استفاده کند.

ایده نوشتن این کتاب سال‌ها پیش توسط دانشجویان و همکاران من در صنعت ساختمان با هدف تسهیل استفاده از میلگردهای FRP در ساختمان‌های بتنی و همچنین نشر تجربیات به‌دست‌آمده از پروژه‌های متعدد دیگر مطرح شد. از تمام افرادی که مستقیم یا غیرمستقیم در به سرانجام رساندن این کتاب مشارکت داشته‌اند، به‌ویژه داگ گرمل<sup>۲</sup>، فوبیو متا<sup>۳</sup> و رناتو پارتی<sup>۴</sup> قدردانی می‌شود.

---

۱. مترجم: در ترجمه این کتاب فرمول‌ها نیز فارسی شده‌اند. برای استفاده از بخش سوم در نرم‌افزار می‌توانید به کتاب زبان اصلی مراجعه کنید.

2. Doug Gremel  
3. Fobio Matta  
4. Renato Parretti



## درباره مؤلفان

**آنتونیو نانی**<sup>۱</sup> دارای القاب و رتبه‌های PhD, PE, FACI, FASCE, FIIFC است. او به‌عنوان مهندس سازه به مصالح ساختمانی، عملکرد سازه‌های آنها و کاربردشان در مصارف ساختمانی علاقه دارد. علاقه اصلی او به زیرساخت‌های مهندسی عمران، پایداری و نوسازی است. در ۲۸ سال گذشته، ایشان به‌عنوان محقق اصلی در پروژه‌های آژانس‌های فدرال، ایالتی و صنایع خصوصی تجربیاتی در زمینه بتن و سیستم‌های پیشرفته کامپوزیتی کسب کرده‌اند. در این مدت تلاش‌های مداوم او در زمینه تحقیقات مواد بر روی کمیته‌های مختلف ACI از جمله کمیته 325، 437، 440، 544، 549 و 562 تأثیرات شگرفی داشت. او همچنین در کمیته اجرایی بخش مواد ASCE فعالیت داشته و به‌عنوان سردبیر مجله مصالح عمرانی<sup>۲</sup> و همچنین عضو هیأت تحریریه در نشریات فنی دیگر فعالیت می‌کند. وی بیش از ۶۰ دانشجوی تحصیلات تکمیلی در درجات کارشناسی ارشد و دکتری را راهنمایی کرده و با همکاری دانشجویان کارشناسی ارشد ۱۷۵ مقاله و دکتری ۳۰۰ مقاله علمی ژورنالی و کنفرانسی را به چاپ رسانده است. دکتر نانی بین فعالیت‌هایش در دانشگاه و صنعت تعادل خوبی را نگه داشته و در همین خصوص چندین جایزه کسب کرده است. از جمله در سال ۲۰۱۳ جایزه‌ای با عنوان Henry L. Michel "Award از ASCE" برای پیشرفت پژوهشی صنعت و در سال ۱۹۹۷ جایزه‌ای با عنوان "Engineering News-Record Award of Excellence" (یکی از ۲۵ خبرنگاران برتر در صنعت ساختمان) را کسب کرد. او در ایتالیا و ایالات فلوریدا، پنسیلوانیا، میزوری و اوکلاهامای ایالات متحده آمریکا دارای پروانه مهندسی (PE) است.

**آنتونیو دی لوکا**<sup>۳</sup> مدرک دکتری خود را در رشته مهندسی سازه از دانشگاه میامی در کورال گیبلز فلوریدا<sup>۴</sup> دریافت کرد. او مدرک کارشناسی عمران و کارشناسی ارشد مهندسی سازه و ژئوتکنیک را از دانشگاه ناپل، فدوریکای II ایتالیا<sup>۵</sup> گرفت. وی پس از پایان دوره دکتری خود، دوره کوتاهی را در دانشگاه میامی به‌عنوان دوره پسادکتری طی کرد. علایق تحقیقاتی او به سیستم مواد پایدار و فناوری ساخت سازه‌های جدید و بهسازی متمرکز است. پیش از اینکه او به شرکت "سیمپسون گامپرتز و هگر"<sup>۶</sup> ملحق شود، به‌عنوان یک مهندس ارشد در گروه عیب‌یابی شرکت Walter P Moore, Inc دالاس

---

1. Antonio Nanni  
2. ASCE Journal of Materials in Civil Engineering  
3. Antonio De Luca  
4. University of Miami, Coral Gables, Florida  
5. University of Naples, Federico II, Italy  
6. Simpson Gumpertz & Heger

ف □ سازه‌های بتنی مسلح شده با میلگرد FRP

تگزاس فعالیت می‌کرد. در این مدت در ارتباط با تعمیر و طرح بهسازی، ارزیابی سازه‌ای و معماری و ارزیابی غیرمخرب سازه‌های بتنی تجربیاتی را کسب کرد.

**هانی جواهری‌زاده**<sup>۱</sup> دکتری خود را در رشته مهندسی سازه از دانشکده عمران، معماری و مهندسی محیط زیست دانشگاه میامی، کورال گیبلز فلوریدا دریافت کرد. وی مدرک کارشناسی عمران را از دانشگاه تهران و مدرک کارشناسی ارشد خود را از دانشگاه صنعتی شریف اخذ کرده است. علایق او موضوعاتی همچون کاربرد کامپوزیت‌ها به‌عنوان تقویت‌کننده‌های داخلی و خارجی است.