NABAK COMPOSITE

کاتالوگ جامع فنی و مهندسی
میلگرد کامپوزیتی GFRP اپوراد

A · REV 1.0 · NOV 2026

EPOROD GFRP Rebar — Technical Catalog

راهکار سبک، مقاوم و ضدخوردگی برای مسلح‌سازی بتن









عرضه، مشاوره فنی و پشتیبانی پروژه: **ناباک کامپوزیت** | سازنده: **اپوراد** — شرکت شاهکار فکر توانا

A02

معرفی نابک کامپوزیت و راهنمای این سند

نابک کامپوزیت مرکز فروش، مشاوره فنی و پشتیبانی پروژه میلگردهای کامپوزیتی GFRP ساخت **اپوراد** (شرکت شاهکار فکر توانا) است. ما فاصله میان کارخانه و پروژه را پر می‌کنیم: از انتخاب درست محصول و تهیه مدارک فنی برای مشاور، تا هماهنگی تولید سفارشی، خم‌های کارخانه‌ای و تحویل در کارگاه.

سازنده

اپوراد — شرکت شاهکار فکر توانا؛ تولید به روش پولتروژن با رزین اپوکسی؛ دارای تأیید فنی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی (۱۴۰۲).

نقش نابک کامپوزیت

فروش، مشاوره انتخاب، تأمین دیتاشیت و گزارش‌های آزمون، هماهنگی نقشه خم و برنامه تحویل، پشتیبانی فنی در اجرا.

این سند

مرجع فنی مستقل و بی‌طرف درباره میلگرد GFRP؛ با تفکیک روشن داده‌های سازنده، حدود استاندارد و محاسبات.

این سند برای چه کسانی است؟

- **مهندسان سازه و مشاوران:** مبانی رفتار، طراحی و محدودیت‌ها
- **دفاتر فنی و کنترل کیفیت:** مشخصات، روش‌های آزمون و معیار پذیرش
- **کارفرمایان صنعتی:** شرایطی که GFRP انتخاب مناسبی است و شرایطی که نیست
- **پیمانکاران و ناظران:** حمل، انبارش، نصب و بازرسی

ساختار کاتالوگ

فصل ۱	شناخت محصول و فناوری تولید	A01–A08
فصل ۲	مشخصات هندسی، فیزیکی و مکانیکی	A09–A18
فصل ۳	رفتار در بتن و طراحی سازه‌ای	A19–A26
فصل ۴	مقایسه با فولاد و کاربردها	A27–A32
فصل ۵	استاندارد، اجرا و خرید	A33–A40

مبنای مشخصات فنی

اعلام سازنده

قطرها، وزن هر متر، مقاومت کششی و خواص فیزیکی از جدول مشخصات فنی و لیست تولید اپوراد (۱۴۰۵).

تأیید فنی

حداقل‌های مدول، کرنش، برش، پیوستگی، T_g، پخت، جذب آب و دوام قلیایی طبق تأیید فنی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، شماره ۰۲-۲۵-۲۱۱۷۳.

استاندارد و آیین‌نامه

روش‌های آزمون ASTM، ضوابط طراحی ACI 440 و CSA S806 و مقادیر نوعی مهندسی میلگرد GFRP.

«حداقل» یعنی مقدار تضمین‌شده برای طراحی و پذیرش؛ «نوعی» یعنی مقدار متداول نتایج آزمون. گزارش آزمون هر بچ همراه محموله از طریق نابک کامپوزیت ارائه می‌شود.

حدود مسئولیت اطلاعات

این کاتالوگ سند آموزشی و معرفی محصول است و جایگزین طراحی سازه، گواهی انطباق یا گزارش آزمایشگاه نیست. میلگرد GFRP رفتاری متفاوت از میلگرد فولادی دارد و جایگزینی آن با فولاد فقط پس از طراحی مستقل توسط مهندس دارای صلاحیت، بر پایه آیین‌نامه معتبر (از جمله ACI CODE-440.11 و ضوابط مقررات ملی ساختمان ایران) و تأیید مرجع قانونی پروژه مجاز است.

A03

فهرست مطالب، واحدها و نمادها

فصل ۱ — شناخت محصول و فناوری تولید

A01 جلد
A02 معرفی و راهنمای سند
A03 فهرست و نمادها
A04 میلگرد GFRP چیست؟
A05 تفاوت با سایر میلگردها
A06 مواد اولیه و ساختار داخلی
A07 فرآیند تولید
A08 انواع شکل سطح و آج

فصل ۲ — مشخصات هندسی، فیزیکی و مکانیکی

A09 دسته‌بندی قطرها و کدگذاری
A10 ابعاد و وزن
A11 مقاومت کششی
A12 مدول و رفتار تنش–کرنش
A13 کرنش نهایی و نوع شکست
A14 برش عرضی و جهت‌داری
A15 خواص فیزیکی
A16 رفتار شیمیایی و دوام
A17 رفتار حرارتی و آتش
A18 خواص الکتریکی و مغناطیسی

فصل ۳ — رفتار در بتن و طراحی سازه‌ای

A19 پیوستگی با بتن
A20 طول مهاری و وصله
A21 رفتار خمشی
A22 کنترل ترک‌خوردگی
A23 کنترل خیز
A24 برش، پیچش و آرماتور عرضی
A25 خزش، گسیختگی خزشی و خستگی
A26 دوام بلندمدت

فصل ۴ — مقایسه با فولاد و کاربردها

A27 مقایسه جامع با فولاد
A28 فونداسیون و سازه‌های بتنی
A29 دال، کف و پیش‌ساخته
A30 پل و حمل‌ونقل
A31 سازه‌های دریایی و خورنده
A32 معدن، تونل و صنایع

فصل ۵ — استاندارد، اجرا و خرید

A33 راهنمای انتخاب
A34 حمل، انبارش و نصب
A35 کنترل کیفیت و ردیابی
A36 ماتریس آزمون‌ها
A37 استانداردها
A38 دیتاشیت مادر
A39 پرسش‌های متداول
A40 منابع و تماس

واحدهای به‌کاررفته

کمیت	واحد	تبدیل
تنش و مقاومت	MPa	۱ MPa = ۱ N/mm²
مدول الاستیسیته	GPa	۱ GPa = ۱۰۰۰ MPa
نیرو	kN	۱ kN = ۱۰۰۰ N
جرم واحد طول	g/m و kg/m	۱ kg/m = ۱۰۰۰ g/m
چگالی	g/cm³	۱ g/cm³ = ۱۰۰۰ kg/m³

نمادهای اصلی

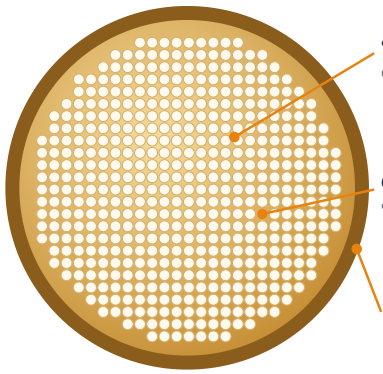
نماد	تعریف
d_b	قطر اسمی میلگرد
A_f	سطح مقطع میلگرد FRP
f_{fu}	مقاومت کششی طراحی
$*f_{fu}$	مقاومت کششی تضمین‌شده (میانگین منهای سه انحراف معیار)
E_f	مدول الاستیسیته کششی
ε_{fu}	کرنش گسیختگی
C_E	ضریب کاهش محیطی
T_g	دمای انتقال شیشه‌ای

A04

میلگرد GFRP چیست؟

نام‌های رایج: میلگرد کامپوزیتی · میلگرد کامپوزیت اپوراد · میلگرد GFRP · میلگرد FRP (اف‌آرپی) · میلگرد فایبرگلاس · آرماتور کامپوزیتی · میلگرد غیرفلزی · Fiberglass Rebar · GFRP Rebar

میلگرد GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) یک عضو کامپوزیتی است که از هزاران رشته پیوسته الیاف شیشه در امتداد طول میلگرد، به‌هم‌پیوسته در یک ماتریس پلیمری سخت‌شده، ساخته می‌شود. این محصول در شرایط تعریف‌شده و بر پایه طراحی معتبر، برای مسلح‌سازی بتن به‌جای میلگرد فولادی یا در کنار آن به کار می‌رود.



شکل A04-1 — شماتیک مقطع عرضی میلگرد GFRP: الیاف پیوسته طولی درون ماتریس پلیمری. تراکم الیاف نمایشی است.

۱ الیاف شیشه

جزء اصلی باربر. استحکام و سختی کششی در جهت طولی عمدتاً از الیاف می‌آید و به نوع، درصد و هم‌راستایی آن‌ها بستگی دارد.

۲ ماتریس پلیمری (رزین)

الیاف را در جای خود نگه می‌دارد، تنش را بین آن‌ها منتقل می‌کند و از الیاف در برابر رطوبت و قلیائیت بتن محافظت می‌کند.

۳ سطح مشترک و سایزینگ

پوشش شیمیایی روی الیاف که چسبندگی الیاف به رزین را تأمین می‌کند و بر برش و دوام اثر دارد.

۴ شکل سطح

آج، پیچش الیاف یا پوشش ماسه، درگیری مکانیکی با بتن و پیوستگی را تعیین می‌کند.

نقش میلگرد در بتن و تفاوت بنیادی GFRP

بتن در فشار مقاوم و در کشش ضعیف است. پس از ترک‌خوردن بتن، نیروی کششی از راه پیوستگی به میلگرد منتقل می‌شود. میلگرد GFRP همین نقش را دارد، اما با دو تفاوت اساسی نسبت به فولاد: **رفتار آن تا گسیختگی تقریباً خطی و الاستیک است و ناحیه تسلیم ندارد**، و **مدول الاستیسیته آن حدود یک‌چهارم فولاد است**. به همین دلیل در طراحی اعضای مسلح به GFRP معمولاً کنترل خیز و عرض ترک حاکم است و فلسفه طراحی با بتن مسلح فولادی تفاوت دارد. این ماده جهت‌دار است؛ استحکام آن در امتداد الیاف بالا و در جهت عرضی بسیار کمتر است، و از این رو در کارگاه خم نمی‌شود.

جدول A04-1 — بازه خواص خانواده میلگردهای GFRP در مقایسه با فولاد (داده مرجع، مشخصه محصول خاصی نیست)

ویژگی	میلگرد GFRP	میلگرد فولادی
مقاومت کششی نهایی (GFRP) / تنش تسلیم (فولاد)	۴۸۳ تا ۱۶۰۰ MPa	۲۷۶ تا ۵۱۷ MPa
مدول الاستیسیته کششی	۳۵ تا ۵۱ GPa	۲۰۰ GPa
کرنش گسیختگی (GFRP) / کرنش تسلیم (فولاد)	۱٫۲ تا ۳٫۱ ٪	۰٫۱۴ تا ۰٫۲۵ ٪
چگالی	۱٫۲۵ تا ۲٫۱۰ g/cm³	حدود ۷٫۹ g/cm³

منابع: ACI 440.1R-15، جدول‌های ۴٫۱ و ۴٫۲٫۱. مشخصات محصول عرضه‌شده در فصل ۲ و دیتاشیت DS-01 آمده است.

A05

تفاوت میلگرد GFRP با سایر میلگردها

انتخاب آرماتور به شرایط محیطی، الزامات سازه‌ای، هزینه چرخه عمر و مقررات پروژه بستگی دارد. جدول زیر مقایسه‌ای کیفی و متوازن میان گزینه‌های رایج است؛ هیچ گزینه‌ای در همه معیارها برتر نیست.

جدول A05-1 — مقایسه کیفی انواع آرماتور بتن

معیار	فولاد کربنی	فولاد اپوکسی‌پوش	فولاد زنگ‌نزن	GFRP	BFRP	CFRP
مقاومت در برابر خوردگی	کم	متوسط؛ وابسته به سلامت پوشش	زیاد	زیاد؛ خوردگی الکتروشیمیایی ندارد	زیاد	بسیار زیاد
مدول الاستیسیته	حدود ۲۰۰ GPa	حدود ۲۰۰ GPa	حدود ۲۰۰ GPa	حدود ۳۵ تا ۶۰ GPa	حدود ۴۵ تا ۶۰ GPa	حدود ۱۲۰ تا ۵۸۰ GPa
شکل‌پذیری و تسلیم	دارد	دارد	دارد	ندارد؛ خطی تا گسیختگی	ندارد	ندارد
خم در کارگاه	ممکن	ممکن با احتیاط	ممکن	ممکن نیست؛ خم کارخانه‌ای	ممکن نیست	ممکن نیست
هدایت الکتریکی و مغناطیسی	رسانا، مغناطیسی	رسانا	رسانا؛ اغلب کم‌مغناطیس	نارسانا، غیرمغناطیسی	نارسانا	رسانای الکتریکی
رفتار در دمای بالا	مناسب	مناسب	مناسب	محدود؛ وابسته به Tg رزین	محدود	محدود
آیین‌نامه طراحی ساختمانی	ACI 318 / مبحث ۹	ACI 318	ACI 318	ACI CODE-440.11، CSA S806	محدود (ASTM D8505)	ACI 440.1R، CSA S806
هزینه اولیه نسبی	کم	متوسط	زیاد	متوسط؛ وابسته به پروژه	متوسط	زیاد

کجا GFRP منطقی است؟

جایی که خوردگی آرماتور عامل اصلی کاهش عمر سازه است (کلراید، نمک یخ‌زدا، فاضلاب، محیط دریایی)، یا جایی که نارسانایی و غیرمغناطیسی بودن الزام دارد (اتاق MRI، تأسیسات برق، سازه‌هایی که باید با دستگاه برش تونل بریده شوند).

کجا GFRP محدودیت دارد؟

اعضایی که به شکل‌پذیری و بازتوزیع لنگر متکی‌اند، سازه‌های با الزام درجه مقاومت آتش، اعضایی که در آن‌ها خیز و ترک به‌شدت محدود است، و هر جا که آیین‌نامه حاکم پروژه استفاده از آن را مجاز نکرده باشد.

منابع: ACI 440.1R-15؛ ACI CODE-440.11-22؛ ASTM D8505/D8505M-25 (میلگرد BFRP و GFRP با مدول بالاتر). اعداد مدول برای BFRP و CFRP بازه عمومی مرجع‌اند.

A06

مواد اولیه و ساختار داخلی

عملکرد میلگرد GFRP حاصل هم‌کاری سه جزء است: الیاف، رزین و سطح مشترک میان آن‌ها. کیفیت هر جزء و سازگاری آن‌ها با یکدیگر، مقاومت، سختی و به‌ویژه دوام بلندمدت محصول را تعیین می‌کند.

الیاف شیشه

رایج‌ترین الیاف در میلگرد GFRP، شیشه نوع E (E-Glass) است. نوع ECR-Glass (شیشه E بدون بور با مقاومت بهتر در برابر خوردگی اسیدی) و الیاف مقاوم در برابر قلیا (AR-Glass) نیز در برخی محصولات به کار می‌روند. الیاف به صورت روونگ پیوسته و موازی با محور میلگرد قرار می‌گیرند و بار کششی را حمل می‌کنند. در میلگردهای استاندارد، سهم جرمی الیاف معمولاً بیش از ۷۰ درصد است.

جدول A06-1 — مقایسه کیفی رزین‌های رایج در میلگرد GFRP

ویژگی	پلی‌استر غیراشباع	وینیل‌استر	اپوکسی
مقاومت در برابر محیط قلیایی	ضعیف؛ برای آرماتور بتن توصیه نمی‌شود	خوب	خوب تا بسیار خوب
جذب رطوبت	نسبتاً زیاد	کم	کم
چسبندگی به الیاف	متوسط	خوب	بسیار خوب
دمای انتقال شیشه‌ای Tg معمول	پایین‌تر	متوسط	متوسط تا بالا؛ وابسته به سیستم پخت
سرعت فرآیند پولتروژن	زیاد	زیاد	کمتر؛ نیازمند کنترل دقیق پخت
جایگاه در استانداردها	خارج از دامنه کاربرد سازه‌ای	رزین مرجع ACI CODE-440.11	در دیگر استانداردها و پروژه‌ها کاربرد دارد

سایزینگ

پوشش شیمیایی روی سطح الیاف که باید با نوع رزین سازگار باشد. سایزینگ نامناسب، چسبندگی الیاف و رزین را ضعیف و نفوذ رطوبت به سطح مشترک را آسان می‌کند.

افزودنی‌ها و پرکننده‌ها

شتاب‌دهنده، سخت‌کننده، عامل جداکننده قالب و گاهی پرکننده معدنی. افزودنی‌ها روی پخت، کیفیت سطح و Tg اثر دارند و مقدار آن‌ها باید کنترل شود.

لایه سطحی

نوار پیچشی الیاف، آج قالب‌گیری‌شده یا ماسه سیلیسی چسبیده با رزین که درگیری مکانیکی با بتن را ایجاد می‌کند.

رزین اپوکسی در میلگرد اپوراد

ماتریس میلگرد اپوراد رزین **اپوکسی** است؛ رزینی با چسبندگی بسیار خوب به الیاف، جذب آب کم و مقاومت مناسب در محیط قلیایی بتن. تأیید فنی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی بر پایه آزمون‌های همین محصول صادر شده است. یادآوری برای طراح: دامنه ACI CODE-440.11-22 به میلگردهای با رزین وینیل‌استر طبق ASTM D7957-22 اشاره دارد؛ در طرح‌های مبتنی بر این آیین‌نامه، پذیرش مصالح در مدارک طرح ثبت شود. طراحی بر پایه ACI 440.1R، CSA S806 و نشریه گ-۱۰۲۰ محدودیت رزین ندارد.

A07

فرآیند تولید میلگرد GFRP

روش اصلی تولید میلگرد GFRP پولتروژن (Pultrusion) است: فرآیندی پیوسته که در آن الیاف آغشته به رزین از میان یک قالب گرم کشیده می‌شوند و با پخت رزین، مقطعی با شکل ثابت به دست می‌آید. کیفیت محصول به کنترل هم‌زمان کشش الیاف، نسبت رزین، دمای قالب، سرعت خط و کیفیت سطح بستگی دارد.



شکل A07-1 — مراحل عمومی تولید میلگرد GFRP به روش پولتروژن. ترتیب و جزئیات مرحله ایجاد سطح در کارخانه‌های مختلف متفاوت است.

نقاط کنترلی حساس

- **آغشته‌سازی کامل:** الیاف خشک یا حباب هوا، مقاومت برشی و دوام را کاهش می‌دهد.
- **دمای قالب و سرعت خط:** پخت ناقص، Tg پایین و جذب رطوبت بیشتر ایجاد می‌کند؛ درجه پخت با ASTM E2160 کنترل می‌شود.
- **هم‌راستایی الیاف:** انحراف الیاف از محور، مقاومت و مدول کششی را کم می‌کند.
- **ایجاد سطح:** نوار پیچشی یا ماسه باید پیش از پخت کامل به مقطع بچسبد تا جدا نشود.
- **کنترل ابعاد و برش:** قطر، دوپهنی و طول هر بچ اندازه‌گیری و ثبت می‌شود.



تجهیزات خط تولید — محصول اپوراد



واحد کشش خط پولتروژن — محصول اپوراد



خط تولید و قالب — محصول اپوراد



کارگاه تولید — محصول اپوراد

A08

انواع شکل سطح و آج

میلگرد GFRP برخلاف فولاد از راه برجستگی‌های نوردی آج نمی‌گیرد؛ شکل سطح در حین تولید ساخته می‌شود و مستقیماً پیوستگی با بتن، طول مهاری و رفتار ترک را تعیین می‌کند. روش‌های رایج در بازار در شکل زیر آمده‌اند. محصول اصلی اپوراد، میلگرد آجدار با آج پیچشی متصل به هسته است.



شکل A08-1 — شماتیک پنج روش متداول ایجاد سطح در میلگرد GFRP (نمایشی، بدون مقیاس).

جدول A08-1 — اثر شکل سطح بر عملکرد

نوع سطح	سازوکار پیوستگی	نکات اجرایی	وضعیت در این محصول
ساده (صاف)	فقط چسبندگی و اصطکاک؛ پیوستگی کم	برای مسلح‌سازی سازه‌ای بتن مناسب نیست؛ در دامنه ASTM D7957-26 قرار ندارد	تولید می‌شود؛ برای کاربردهای غیرسازه‌ای
آجدار	درگیری مکانیکی برجستگی‌ها با بتن	آج باید به هسته متصل باشد و در اثر لغزش جدا نشود	آج پیچشی متصل به هسته (محصول اصلی)
ماسه‌پوش	اصطکاک و درگیری دانه‌های ماسه	کیفیت چسبیدن ماسه مهم است؛ سایش در حمل	سفارش ویژه
پیچش مارپیچی	برجستگی و فرورفتگی ناشی از نوار پیچشی	رایج‌ترین روش در تولید پولتروژن داخلی	میلگرد آجدار اپوراد
ترکیبی	پیچش به همراه ماسه	پیوستگی بالا؛ فرآیند پیچیده‌تر	سفارش ویژه



میلگرد آجدار با الگوی پیچشی — محصول اپوراد



میلگرد ساده و آجدار در قطرهای مختلف — محصول اپوراد

A09

دسته‌بندی قطرها و کدگذاری محصول

میلگرد کامپوزیتی اپوراد در دوازده قطر از ۳ تا ۲۰ میلی‌متر تولید می‌شود (لیست سازنده، ۱۴۰۵/۰۸/۰۹). قطرهای ۳ تا ۱۰ به‌صورت کلاف و شاخه و قطرهای ۱۲ تا ۲۰ به‌صورت شاخه ۶ و ۱۲ متری یا برش سفارشی در کارخانه عرضه می‌شوند.

جدول A09-1 — قطرهای تولیدی و کد محصول

قطر اسمی mm	سطح مقطع اسمی mm²	وزن g/m	نوع سطح	نحوه عرضه	کد محصول	حداقل مقاومت کششی MPa
۳	۷٫۱	۱۸	آجدار	کلاف / شاخه	NB-GF-03-R	۷۵۰
۴	۱۲٫۶	۲۵	آجدار	کلاف / شاخه	NB-GF-04-R	۷۵۰
۵	۱۹٫۶	۳۶	آجدار	کلاف / شاخه	NB-GF-05-R	۷۵۰
۶	۲۸٫۳	۵۲	آجدار	کلاف / شاخه	NB-GF-06-R	۷۵۰
۷	۳۸٫۵	۷۳	آجدار	کلاف / شاخه	NB-GF-07-R	۷۵۰
۸	۵۰٫۳	۹۵	آجدار	کلاف / شاخه	NB-GF-08-R	۷۵۰
۱۰	۷۸٫۵	۱۵۷	آجدار	کلاف / شاخه	NB-GF-10-R	۷۵۰
۱۲	۱۱۳٫۱	۲۰۰	آجدار	شاخه ۶ و ۱۲ m	NB-GF-12-R	۶۵۰
۱۴	۱۵۳٫۹	۳۰۰	آجدار	شاخه ۶ و ۱۲ m	NB-GF-14-R	۶۵۰
۱۶	۲۰۱٫۱	۴۰۰	آجدار	شاخه ۶ و ۱۲ m	NB-GF-16-R	۶۰۰
۱۸	۲۵۴٫۵	۵۰۰	آجدار	شاخه ۶ و ۱۲ m	NB-GF-18-R	۶۰۰
۲۰	۳۱۴٫۲	۶۰۰	آجدار	شاخه ۶ و ۱۲ m	NB-GF-20-R	۶۰۰

ساختار کد محصول

```
NB - GF - dd - S - LLL
```

بخش	معنا	مثال
NB	ناباک کامپوزیت	NB
GF	میلگرد GFRP	GF
dd	قطر اسمی mm	12
S	سطح: R آجدار، S ماسه‌پوش، H مارپیچی، C ترکیبی	R
LLL	طول شاخه به دسی‌متر (اختیاری)	۱۲۰ = m ۱۲

کد محصول در پیش‌فاکتور، برچسب بندیل و گزارش بچ درج می‌شود و ردیابی سفارش را ممکن می‌کند.

شکل‌های عرضه

شاخه مستقیم

طول استاندارد ۶ و ۱۲ متر؛ برش به طول سفارشی در کارخانه.

کلاف

قطرهای ۳ تا ۱۰ میلی‌متر؛ مناسب کف‌سازی، دال روی زمین و قطعات پیش‌ساخته.

خم و خاموت کارخانه‌ای

طبق نقشه خم پروژه؛ مقاومت بخش خم ≤ ۶۰٪ بخش مستقیم.



تنوع قطر و رنگ میلگردهای کامپوزیتی — محصول اپوراد

A10

ابعاد و وزن میلگرد GFRP

وزن هر متر میلگرد GFRP به سطح مقطع واقعی و چگالی آن بستگی دارد. در میلگرد آجدار، «قطر اسمی» لزوماً با قطر بیرونی یا قطر معادل یکی نیست؛ بنابراین وزن دقیق فقط با اندازه‌گیری روی محصول واقعی به دست می‌آید و جدول نظری صرفاً برای برآورد است.

سطح مقطع نظری

$$A = \pi \cdot d^2 / 4$$

A برحسب mm² و d قطر برحسب mm؛ برای مقطع دایره‌ای کامل.

جرم هر متر

$$m = \rho \cdot A \cdot L$$

ρ چگالی (kg/m³)، A سطح مقطع (m²)، L طول (m)؛ برای جرم هر متر L = ۱ m.

جدول A10-1 — هندسه و وزن میلگرد اپوراد

قطر اسمی mm	سطح مقطع اسمی mm²	وزن هر متر g/m	چگالی ظاهری g/cm³	وزن نظری با ρ=۲٫۰ g/m	وزن فولاد هم‌قطر g/m
۳	۷٫۱	۱۸	۲٫۵۵	۱۴	۵۵
۴	۱۲٫۶	۲۵	۱٫۹۹	۲۵	۹۹
۵	۱۹٫۶	۳۶	۱٫۸۳	۳۹	۱۵۴
۶	۲۸٫۳	۵۲	۱٫۸۴	۵۷	۲۲۲
۷	۳۸٫۵	۷۳	۱٫۹۰	۷۷	۳۰۲
۸	۵۰٫۳	۹۵	۱٫۸۹	۱۰۱	۳۹۵
۱۰	۷۸٫۵	۱۵۷	۲٫۰۰	۱۵۷	۶۱۷
۱۲	۱۱۳٫۱	۲۰۰	۱٫۷۷	۲۲۶	۸۸۸
۱۴	۱۵۳٫۹	۳۰۰	۱٫۹۵	۳۰۸	۱۲۰۸
۱۶	۲۰۱٫۱	۴۰۰	۱٫۹۹	۴۰۲	۱۵۷۸
۱۸	۲۵۴٫۵	۵۰۰	۱٫۹۶	۵۰۹	۱۹۹۸
۲۰	۳۱۴٫۲	۶۰۰	۱٫۹۱	۶۲۸	۲۴۶۶

وزن: لیست سازنده (اپوراد، ۱۴۰۵/۰۸/۰۹). چگالی ظاهری = وزن اعلامی ÷ سطح مقطع اسمی. وزن فولاد با ρ = ۷۸۵۰ kg/m³ محاسبه شده است.

مثال محاسبه — قطر ۱۰ میلی‌متر

$A = \pi \times 10^2 / 4 = 78.54\ mm^2 = 78.54 \times 10^{-6}\ m^2$

با فرض چگالی ρ = ۲۰۰۰ kg/m³:

$m = 2000 \times 78.54 \times 10^{-6} \times 1 = \mathbf{0.157\ kg/m}$

برای فولاد هم‌قطر با چگالی ۷۸۵۰، جرم هر متر ۰٫۶۱۷ کیلوگرم است؛ یعنی جرم GFRP حدود **۲۵٪** فولاد هم‌قطر است.

تفسیر درست جدول

- پراکندگی چگالی ظاهری (حدود ۱٫۸ تا ۲٫۰ و برای قطر ۳ حدود ۲٫۵) نشان می‌دهد قطر واقعی یا معادل برخی سایزها با مقدار اسمی متفاوت است.
- سطح مقطع مبنای محاسبه تنش باید به روش غوطه‌وری طبق پیوست ASTM D7205/D7205M اندازه‌گیری شود.
- سبک‌تر بودن به معنای هم‌ارزی عملکرد نیست؛ آرماتور موردنیاز GFRP از طراحی به دست می‌آید، نه از جایگزینی وزنی یا قطری.

A11

مقاومت کششی میلگرد GFRP

مقاومت کششی بیشترین تنشی است که میلگرد پیش از گسیختگی تحمل می‌کند. برخلاف فولاد، میلگرد GFRP «تنش تسلیم» ندارد؛ بنابراین مقاومت کششی همان نقطه گسیختگی است و در طراحی همیشه با ضرایب کاهش و حاشیه اطمینان به کار می‌رود.

تنش کششی

$$f = F / A$$

F نیروی کششی (N)، A سطح مقطع (mm²). انتخاب A (اسمی یا اندازه‌گیری‌شده) طبق روش آزمون و مشخصات محصول، مستقیماً بر نتیجه اثر دارد.

مقاومت تضمین‌شده و طراحی

$$f_{fu}^{*} = f_{u,ave} - 3\sigma$$

$$f_{fu} = C_E \cdot f_{fu}^{*}$$

میانگین منهای سه انحراف معیار؛ C_E ضریب کاهش محیطی (ACI 440.1R-15).

جدول A11-1 — مقاومت کششی میلگرد اپوراد (روش آزمون ASTM D7205 / CSA S807)

قطر mm	A اسمی mm²	وزن g/m	حداقل مقاومت تضمین‌شده MPa	حداقل نیروی کششی kN
۳	۷٫۱	۱۸	۷۵۰	۵٫۳
۴	۱۲٫۶	۲۵	۷۵۰	۹٫۴
۵	۱۹٫۶	۳۶	۷۵۰	۱۴٫۷
۶	۲۸٫۳	۵۲	۷۵۰	۲۱٫۲
۷	۳۸٫۵	۷۳	۷۵۰	۲۸٫۹
۸	۵۰٫۳	۹۵	۷۵۰	۳۷٫۷
۱۰	۷۸٫۵	۱۵۷	۷۵۰	۵۸٫۹
۱۲	۱۱۳٫۱	۲۰۰	۶۵۰	۷۳٫۵
۱۴	۱۵۳٫۹	۳۰۰	۶۵۰	۱۰۰٫۱
۱۶	۲۰۱٫۱	۴۰۰	۶۰۰	۱۲۰٫۶
۱۸	۲۵۴٫۵	۵۰۰	۶۰۰	۱۵۲٫۷
۲۰	۳۱۴٫۲	۶۰۰	۶۰۰	۱۸۸٫۵

حداقل مقاومت هر قطر طبق جدول مشخصات فنی اپوراد؛ برای قطرهایی که جداگانه آزمون نشده‌اند، حداقل قطر آزمون‌شده بزرگ‌تر به‌صورت محافظه‌کارانه منظور شده است. نتایج نوعی آزمون: ۱۳۰۰ MPa (قطر ۶)، ۱۲۰۰ MPa (قطر ۱۰) و ۹۰۰ MPa (قطر ۲۰).

مقادیر طراحی هر قطر (f_{fu} با C_E، حد تنش پایدار و کرنش طراحی) در جدول C03-3 کاتالوگ C و دیتاشیت DS-03 آمده است.

عوامل مؤثر

درصد و هم‌راستایی الیاف، کیفیت آغشته‌سازی و پخت، **اثر اندازه** (کاهش مقاومت با افزایش قطر؛ از ۱۳۰۰ MPa در قطر ۶ به ۹۰۰ MPa در قطر ۲۰)، و دما، رطوبت و قلیائیت در بهره‌برداری.

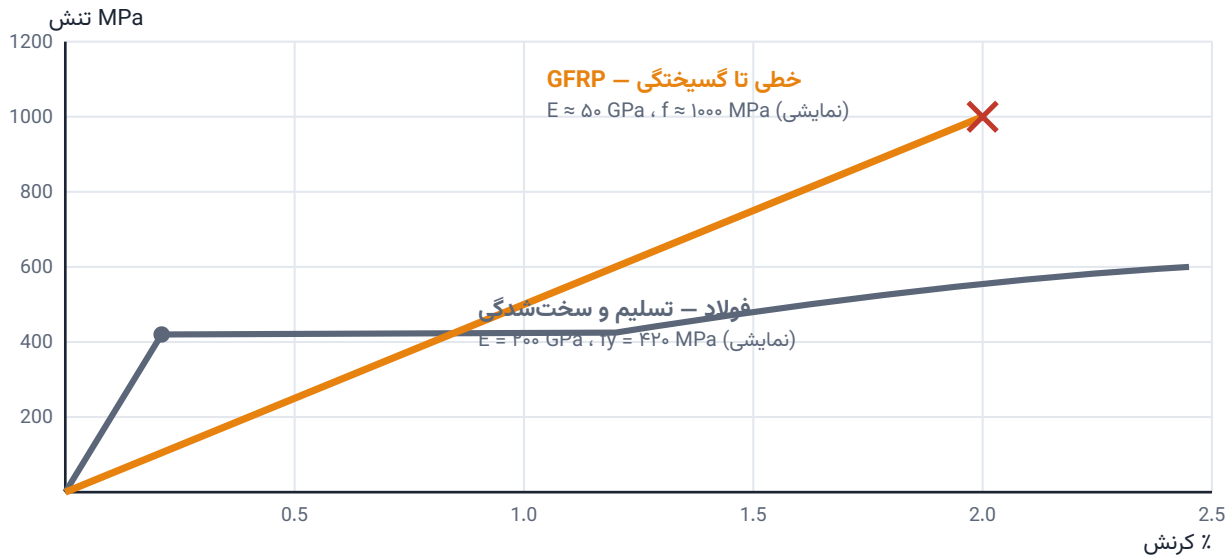
تفاوت با تنش تسلیم فولاد

مقایسه مستقیم «مقاومت کششی GFRP» با «تنش تسلیم فولاد» گمراه‌کننده است. ASTM D7957 برای هر سایز، **نیروی کششی تضمین‌شده** تعیین می‌کند و طراحی بر مبنای همین مقدار و با در نظر گرفتن مدول کمتر انجام می‌شود.

A12

مدول الاستیسیته و رفتار تنش–کرنش

مدول الاستیسیته، سختی میلگرد در برابر کشیده‌شدن است. مدول میلگرد GFRP حدود یک‌چهارم فولاد است؛ یعنی برای یک تنش یکسان، کرنش آن حدود چهار برابر است. همین تفاوت دلیل اصلی بزرگ‌تر بودن عرض ترک و خیز اعضای مسلح به GFRP است.



شکل A12-1 — مقایسه نمایشی رفتار تنش–کرنش فولاد و GFRP. مقادیر نمایشی‌اند و مشخصه محصول خاصی نیستند.

مدول وتری

$$E = \Delta\sigma \,/\, \Delta\varepsilon$$

طبق ASTM D7205/D7205M، مدول به‌صورت وتری میان دو سطح مشخص از ظرفیت نهایی محاسبه می‌شود. مدول مماسی و سکانتی در نقاط دیگر منحنی ممکن است مقدار متفاوتی بدهند.

جدول A12-1 — مدول کششی میلگرد اپوراد

مورد	مقدار
حداقل تضمین‌شده (تأیید فنی مرکز تحقیقات)	GPa ۴۴٫۸
مقدار نوعی (کاتالوگ سازنده)	GPa ۵۰
مقدار مبنای طراحی در این کاتالوگ	GPa ۴۴٫۸
روش آزمون	ASTM D7205 — مدول وتری

پیامدهای مدول کم در طراحی

- کرنش بیشتر در تنش بهره‌برداری؛ ترک‌های عریض‌تر و خیز بیشتر
- سختی مؤثر کمتر مقطع ترک‌خورده (I_{cr})
- طراحی معمولاً با معیارهای بهره‌برداری کنترل می‌شود، نه با مقاومت
- جایگزینی «قطر به قطر» یا «وزن به وزن» با فولاد نادرست است

کدام مدول را در طراحی به کار ببریم؟

برای محاسبه خیز و عرض ترک، حداقل تضمین‌شده ۴۴٫۸ GPa مبنا قرار می‌گیرد؛ این انتخاب محافظه‌کارانه است و مقدار نوعی ۵۰ GPa حاشیه اطمینان اضافی فراهم می‌کند.

منابع: ASTM D7205/D7205M-26؛ CSA S807-19؛ تأیید فنی شماره ۲۱۱۷۳-۲۵-۰۲ مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی (۱۴۰۲)؛ ACI 440.1R-15.

A13

کرنش نهایی و نوع شکست

کرنش نهایی (کرنش گسیختگی) نشان می‌دهد میلگرد پیش از شکستن چقدر کشیده می‌شود. چون رفتار GFRP تا گسیختگی تقریباً خطی است، کرنش نهایی را می‌توان از نسبت مقاومت به مدول تخمین زد؛ اما مقدار معتبر همان است که در آزمون اندازه‌گیری می‌شود.

کرنش نهایی

$$\varepsilon_u = f_u / E$$

فقط تحت فرض رفتار خطی الاستیک تا شکست و با تعریف سازگار f_u و E معتبر است.

مثال — قطر ۱۰ میلی‌متر

εu = 1200 / 50000 = 0.024 = 2.4 %

با مدول ۴۰ GPa همین مقاومت کرنش ٪۳٫۰ می‌دهد. کرنش نوعی میلگرد اپوراد ٪۲٫۱ و حداقل تضمین‌شده آن ٪۱٫۱ است.

رفتار شکست

فولاد پس از تسلیم با تغییرشکل زیاد و قابل مشاهده هشدار می‌دهد. میلگرد GFRP بدون تسلیم و ناگهانی گسیخته می‌شود؛ الیاف به‌صورت جاروئی از هم باز می‌شوند و انرژی ذخیره‌شده یک‌باره آزاد می‌شود. این رفتار ترد، اساس فلسفه طراحی اعضای مسلح به GFRP است.

- **گسیختگی میلگرد (کم‌آرماتور):** ناگهانی و بدون هشدار؛ نامطلوب
- **خردشدن بتن فشاری (پرآرماتور):** تدریجی‌تر و با هشدار بیشتر؛ ترجیح آیین‌نامه‌ها
- بازتوزیع لنگر و مفصل پلاستیک در اعضای مسلح به GFRP مجاز نیست

جدول A13-1 — ضرایب کاهش مقاومت خمشی

حالت شکست	φ	منبع
کنترل‌شده با کشش (گسیختگی FRP)	۰٫۵۵	ACI 440.1R-15
کنترل‌شده با فشار (خردشدن بتن)	۰٫۶۵	ACI 440.1R-15
ناحیه گذار	خطی میان دو مقدار	ACI 440.1R-15
طراحی بر پایه شکست فشاری بتن	۰٫۶۵	تأیید فنی مرکز تحقیقات

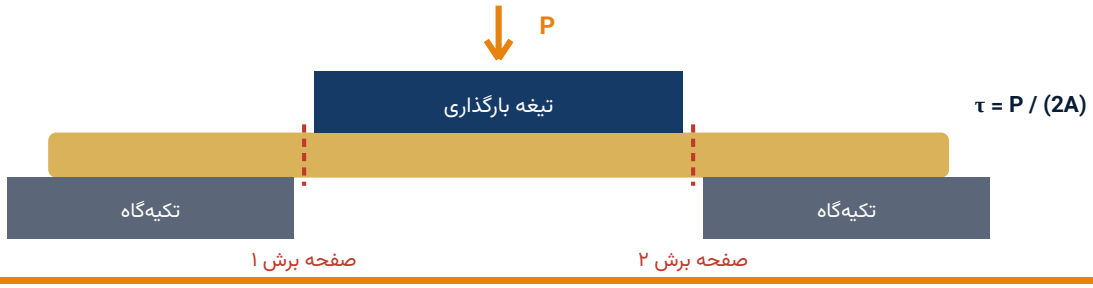
پیامد طراحی

چون کرنش نهایی GFRP بسیار بیشتر از کرنش تسلیم فولاد است، ولی تسلیم ندارد، «شکل‌پذیری» عضو باید از راه طراحی بر پایه خردشدن بتن و ضرایب ایمنی بزرگ‌تر تأمین شود، نه از رفتار میلگرد.

A14

برش عرضی و خواص وابسته به جهت الیاف

میلگرد GFRP ماده‌ای ناهمسان (آنیزوتروپ) است: در امتداد الیاف بسیار مقاوم و در جهت عمود بر الیاف، ضعیف‌تر است. در جهت عرضی، رزین و سطح مشترک الیاف بار را حمل می‌کنند؛ به همین دلیل مقاومت برشی عرضی و عمل داول میلگرد GFRP از فولاد کمتر است.



شکل A14-1 — شماتیک آزمون برش عرضی دوصفحه‌ای طبق ASTM D7617/D7617M.

جدول A14-1 — مقاومت برشی عرضی میلگرد اپوراد

مورد	مقدار
حداقل تضمین‌شده (ASTM D7617)	۱۵۰ MPa
حداقل لازم تأیید فنی (کرانه پایین)	۱۳۱ MPa
حداقل ASTM D7957	۱۳۱ MPa
مقاومت برشی طولی (بین‌لایه‌ای)	وابسته به کیفیت آغشته‌سازی؛ کنترل در آزمون صلاحیت

کرانه پایین = میانگین منهای سه انحراف معیار.

پیامدهای ناهمسانی

- عمل داول (انتقال برش از میان ترک) محدود است؛ آیین‌نامه سهم برشی بتن را کمتر در نظر می‌گیرد.
- خم کردن در کارگاه الیاف را می‌شکند؛ خم فقط کارخانه‌ای و پیش از پخت.
- میلگرد GFRP برای مقاومت فشاری به حساب نمی‌آید؛ در ACI CODE-440.11 سهم فشاری آن معادل بتن اطراف فرض می‌شود.
- ضربه و بار متمرکز عرضی در حمل می‌تواند آسیب پنهان ایجاد کند.

اهمیت برای طراح

مقاومت برشی عرضی، رفتار میلگرد در محل ترک‌های برشی و عمل داول را تعیین می‌کند. آیین‌نامه‌ها به همین دلیل سهم میلگرد GFRP در برش را محدود می‌کنند.

A15

خواص فیزیکی

خواص فیزیکی، کیفیت ساخت میلگرد را نشان می‌دهند: درصد الیاف کافی، تخلخل کم و جذب آب پایین، نشانه آغشته‌سازی کامل و پخت درست است و مستقیماً با دوام بلندمدت ارتباط دارد.

جدول A15-1 — خواص فیزیکی میلگرد اپوراد

ویژگی	روش آزمون	مقدار	حد لازم (تأیید فنی)
چگالی	ASTM D792	۲٫۰ g/cm³	—
محتوای الیاف (جرمی)	ASTM D2584	≥ ۷۵ ٪ جرمی	≥ ۷۰ ٪ جرمی
محتوای الیاف (حجمی)	ASTM D3171	≥ ۵۵ ٪ حجمی	≥ ۵۵ ٪ حجمی
جذب رطوبت ۲۴ ساعته (۵۰ °C)	ASTM D570	≤ ۰٫۲۵ ٪ (نوعی ۰٫۰۶ ٪)	≤ ۰٫۲۵ ٪
جذب رطوبت تا اشباع	ASTM D570	≤ ۱٫۰ ٪	≤ ۱٫۰ ٪
درجه پخت	ASTM E2160	≥ ۹۵ ٪	≥ ۹۵ ٪
ضریب انبساط حرارتی طولی	ASTM E831	۶ تا ۱۰ ×۱۰⁻⁶ /°C	—
ضریب انبساط حرارتی عرضی	ASTM E831	۲۱ تا ۲۳ ×۱۰⁻⁶ /°C	—
تلرانس قطر	اندازه‌گیری مستقیم	طبق ASTM D7957	—

کیفیت ساخت در یک نگاه

درصد بالای الیاف همراه با جذب آب پایین و درجه پخت بالای ۹۵٪، نشانه آغشته‌سازی کامل و پخت درست است؛ همان ویژگی‌هایی که دوام بلندمدت میلگرد در محیط قلیایی بتن را تضمین می‌کنند.

انبساط حرارتی و بتن

ضریب انبساط بتن حدود ۷ تا ۱۱×۱۰⁻⁶ بر درجه است. انبساط طولی GFRP نزدیک به بتن است، اما انبساط عرضی آن بیش از دو برابر بتن است. در پوشش کم و تغییرات دمایی شدید، این اختلاف می‌تواند تنش شکافنده در بتن ایجاد کند؛ یکی از دلایل الزام به پوشش کافی.

منابع: جدول مشخصات فنی اپوراد؛ تأیید فنی شماره ۲۱۱۷۳-۲۵-۰۲، جدول‌های ۱ و ۲؛ ACI 440.1R-15 (ضرایب انبساط).

A16

رفتار شیمیایی و دوام

میلگرد GFRP زنگ نمی‌زند، چون خوردگی الکتروشیمیایی ندارد؛ اما «بی‌نهایت بادوام» هم نیست. الیاف شیشه در محیط قلیایی بتن آسیب‌پذیرند و رزین وظیفه محافظت از آن‌ها را دارد. دوام واقعی به نوع رزین، کیفیت پخت، دما، رطوبت و سطح تنش پایدار بستگی دارد.

جدول A16-1 — رفتار کیفی در محیط‌های مختلف

محیط	سازوکار اصلی تخریب	رفتار کیفی GFRP	ملاحظه
قلیایی بتن (pH ≈ ۱۲٫۵ تا ۱۳٫۵)	حمله یون هیدروکسیل به شیشه از راه نفوذ در رزین	**مناسب؛ حفظ ≥ ۸۵٪ نیرو در آزمون ۹۰ روزه**	ASTM D7705 / ACI 440.3R B.6
کلراید و آب دریا	برای GFRP عامل خوردگی نیست	**مناسب**	مزیت اصلی نسبت به فولاد
نمک یخ‌زدا	برای GFRP عامل خوردگی نیست	**مناسب**	عرشه پل، پارکینگ
فاضلاب و H_2S	اسید سولفوریک بیوژنیک روی بتن	**میلگرد مقاوم؛ بتن باید محافظت شود**	دوام بتن حاکم است
اسیدهای قوی	حمله به رزین و شیشه E	**وابسته به نوع و غلظت اسید**	رزین اپوکسی مقاومت خوبی دارد؛ برای مواد خاص ارزیابی پروژه‌ای
رطوبت و دمای بالا	جذب آب، نرم‌شدن رزین، تخریب سطح مشترک	**تشدیدکننده سایر عوامل**	دمای بهره‌برداری زیر Tg
پرتو فرابنفش (پیش از بتن‌ریزی)	تخریب سطحی رزین	**انبارش طولانی در آفتاب ممنوع**	پوشش در انبار

جدول A16-2 — مقاومت قلیایی (۹۰ روز، ۶۰ °C)

مورد	مقدار
حفظ نیروی کششی — میلگرد اپوراد	≥ ۸۵ ٪ حفظ نیرو
حداقل لازم (ASTM D7705 روش A، تأیید فنی)	≥ ۸۰ ٪
روش آزمون	ACI 440.3R B.6 / ASTM D7705

جدول A16-3 — ضریب کاهش محیطی C_E برای GFRP

شرایط بهره‌برداری	C_E
بتن بدون تماس مستقیم با خاک یا هوای بیرون	۰٫۸
بتن در تماس مستقیم با خاک یا هوای بیرون	۰٫۷

ACI 440.1R-15؛ تأیید فنی مرکز تحقیقات، بند ۶-۱۴.

دوام بلندمدت

آزمون قلیایی شتاب‌یافته در دمای ۶۰ درجه، شدیدترین شرایط محیط بتن را شبیه‌سازی می‌کند. میلگرد اپوراد در این آزمون بیش از ۸۵٪ مقاومت خود را حفظ کرده است؛ در طراحی، اثر بلندمدت محیط با ضریب C_E و حد تنش پایدار منظور می‌شود.

A17

رفتار حرارتی و آتش

نقطه ضعف اصلی میلگرد GFRP، رفتار آن در دمای بالاست. با نزدیک شدن دما به دمای انتقال شیشه‌ای (T_g)، رزین نرم می‌شود؛ ابتدا پیوستگی با بتن و مقاومت برشی کاهش می‌یابد و سپس انتقال بار میان الیاف مختل می‌شود. الیاف شیشه خود دمای بالاتری را تحمل می‌کنند، اما بدون رزین سالم کار نمی‌کنند.

≤ ۱۱۲ °C	≤ ۱۰۰ °C	≤ ۹۵ ٪	پوشش بتن
T_g میلگرد اپوراد	حداقل T_g در تأیید فنی (ASTM E1356)	حداقل درجه پخت (ASTM E2160)	حفاظت در برابر آتش طبق ACI CODE-440.11 بند ۴٫۱۱

رفتار در دماهای بالا

- **زیر T_g:** رفتار مکانیکی پایدار؛ محدوده بهره‌برداری عادی.
- **نزدیک T_g:** افت شدید پیوستگی و برش؛ تنش‌ها به مهارهای انتهایی منتقل می‌شود.
- **بالاتر از T_g:** مقاومت کششی به سالم ماندن انتهای میلگرد در نواحی سردتر بستگی دارد.
- **دمای تجزیه رزین:** از دست رفتن کامل ماتریس.

تأیید فنی تصریح می‌کند دمای میلگرد در داخل بتن نباید از T_g اندازه‌گیری‌شده بیشتر شود.

محدودیت آیین‌نامه‌ای در برابر آتش

ACI CODE-440.11-22 فقط برای سازه‌هایی کاربرد دارد که **درجه مقاومت آتش لازم ندارند**. تأیید فنی مرکز تحقیقات رعایت ضوابط آتش بند ۴-۱۱ همین آیین‌نامه، به‌ویژه ضخامت پوشش بتن، را الزامی دانسته است. هیچ ادعای درجه آتش برای این محصول وجود ندارد.

منابع: ACI CODE-440.11-22، بند ۴٫۱۱؛ تأیید فنی شماره ۲۱۱۷۳-۲۵-۰۲، بندهای ۲، ۶-۱۵ و ۶-۱۶؛ ASTM D7957/D7957M.

A18

خواص الکتریکی و مغناطیسی

الیاف شیشه و رزین‌های پلیمری نارسانای الکتریسیته و غیرمغناطیسی‌اند. این ویژگی، میلگرد GFRP را برای سازه‌هایی که میلگرد فولادی در آن‌ها با میدان‌های مغناطیسی یا جریان‌های الکتریکی تداخل دارد، به گزینه‌ای جدی تبدیل می‌کند.

نارسانایی الکتریکی

میلگرد مسیر جریان الکتریکی یا جریان‌های القایی ایجاد نمی‌کند؛ مناسب پست‌های برق، کف ایستگاه‌ها و نزدیکی تجهیزات حساس.

غیرمغناطیسی بودن

میدان مغناطیسی را مختل نمی‌کند؛ مناسب اتاق‌های MRI، آزمایشگاه‌های اندازه‌گیری مغناطیسی و ریل قطارهای مغناطیسی.

شفافیت الکترومغناطیسی

امواج رادیویی را کمتر از شبکه فولادی تضعیف می‌کند؛ قابل بررسی برای ساختمان‌های مخابراتی و برج‌های آنتن.

هدایت حرارتی کم

پل حرارتی کمتری نسبت به فولاد ایجاد می‌کند؛ مثلاً در اتصال دیوارهای ساندویچی بتنی.

جدول A18-1 – کاربردهای مبتنی بر نارسانایی و غیرمغناطیسی بودن

کاربرد	ویژگی کلیدی	ملاحظه اجرایی
اتاق MRI و تجهیزات پزشکی	غیرمغناطیسی	گره و اسپیسر غیرفلزی
پست برق و سازه‌های مجاور خطوط فشار قوی	نارسانا	حذف حلقه‌های جریان القایی
تأسیسات مخابراتی و رادار	شفافیت الکترومغناطیسی	هماهنگی با طراح تأسیسات
کف کارخانه‌های الکترونیک و آزمایشگاه‌ها	نارسانا و غیرمغناطیسی	گره و اسپیسر غیرفلزی

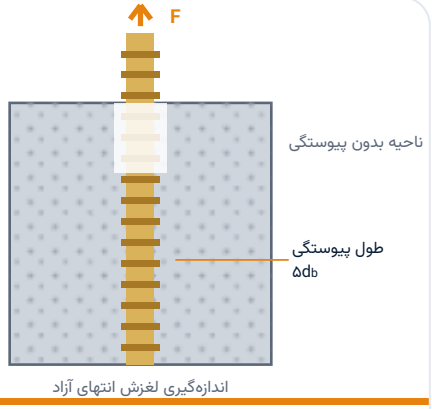
اجرای درست

این ویژگی‌ها در سازه نهایی وقتی کامل حفظ می‌شوند که سیم گره، اسپیسر و میلگردهای مجاور هم فلزی نباشند. در پروژه‌هایی که نارسانایی یا غیرمغناطیسی بودن الزام قراردادی است، همه اتصالات و اسپیسرها غیرفلزی انتخاب شوند.

A19

پیوستگی میلگرد با بتن

پیوستگی، توانایی انتقال نیرو میان میلگرد و بتن است. بدون پیوستگی کافی، میلگرد هرگز به مقاومت کششی خود نمی‌رسد. در میلگرد GFRP پیوستگی به شکل سطح، کیفیت چسبیدن لایه سطحی به هسته و مقاومت برشی رزین وابسته است.



شکل A19-1 — شماتیک آزمون بیرون‌کشیدگی طبق ASTM D7913/D7913M.

جدول A19-1 — مقاومت پیوستگی میلگرد اپوراد (ASTM D7913)

مورد	مقدار
حداقل تضمین‌شده	۸ MPa
مقدار نوعی	بیش از ۱۵ MPa
حداقل لازم تأیید فنی	≤ ۷٫۶ MPa

عوامل مؤثر بر پیوستگی

- **شکل سطح:** عمق و گام آج، چسبیدن ماسه، پیوستگی لایه سطحی با هسته
- **مقاومت بتن:** با افزایش مقاومت فشاری بیشتر می‌شود
- **پوشش و فاصله:** پوشش کم موجب شکافتن بتن می‌شود
- **محصورشدگی:** خاموت و آرماتور عرضی، شکافتن را به تأخیر می‌اندازد
- **قطر میلگرد:** میلگرد قطورتر تنش پیوستگی میانگین کمتری دارد
- **دما:** نزدیک T_g پیوستگی به‌شدت افت می‌کند

تفاوت با فولاد

در فولاد، آج نوردی جزئی از هسته است. در GFRP، لایه سطحی ممکن است در اثر لغزش از هسته جدا شود؛ بنابراین حالت شکست پیوستگی (شکافتن بتن، بیرون‌کشیدگی یا جداشدن لایه سطحی) باید در گزارش آزمون ثبت شود. ضریب وابسته به پیوستگی k_b در محاسبه عرض ترک نیز از همین رفتار ناشی می‌شود.



شبکه میلگرد GFRP پیش از بتن‌ریزی — محصول اپوراد

A20

طول مهاری و طول وصله

طول مهاری، کمترین طولی است که میلگرد باید درون بتن قرار گیرد تا تنش طراحی را بدون بیرون‌کشیدگی یا شکافتن بتن منتقل کند. به دلیل پیوستگی و مدول متفاوت، طول مهاری میلگرد GFRP با فولاد هم‌قطر برابر نیست و نباید از جدول‌های فولادی برداشته شود.

رابطه طول مهاری میلگرد مستقیم در کشش — ACI 440.1R-15 (SI)

$$\ell_d = \left[\alpha \cdot f_{fr} / (0.083\sqrt{f'_c}) - 340 \right] / \left[13.6 + C / d_b \right] \cdot d_b$$

این رابطه برای نشان دادن پارامترهای مؤثر آمده است. طراحی پروژه باید با رابطه، ضرایب و محدودیت‌های ویرایش معتبر آیین‌نامه حاکم (ACI CODE-440.11، CSA S806 یا راهنمای نشریه گ-۱۰۲۰) انجام شود.

مثال جاری ◂ طول مهاری میلگرد ۱۲ میلی‌متری دال

پارامترها	ffr = ffu = 520 MPa ; √f′c = 5.48 ; C = min(31, 37.5) = 31.0 mm ; C/db = 2.58
طول مهاری	ℓd = [520/(0.083×5.48) − 340] / (13.6 + 2.58) × 12 = **596 mm** (≈ 50db)
طول وصله (تأیید فنی)	ℓs = 1.3 ℓd = **775 mm**

برای مقایسه، طول مهاری میلگرد فولادی ۱۲ میلی‌متری در همین شرایط معمولاً در محدوده ۴۰ تا ۵۰db است؛ ℓd میلگرد GFRP بزرگ‌تر است.

جدول A20-1 — پارامترهای رابطه طول مهاری

نماد	تعریف	ملاحظه
f_{fr}	تنش موردنیاز در میلگرد (MPa)	حداکثر برابر مقاومت طراحی f_{fu}
f'_c	مقاومت فشاری مشخصه بتن (MPa)	ریشه دوم آن معمولاً محدود می‌شود
C	کمترین مقدار پوشش یا نصف فاصله آزاد میلگردها (mm)	نسبت C/d_b حداکثر ۳٫۵
α	ضریب موقعیت میلگرد	برای میلگرد فوقانی با بیش از ۳۰۰ mm بتن زیر آن بزرگ‌تر از یک
d_b	قطر اسمی میلگرد (mm)	—

الزامات تأیید فنی مرکز تحقیقات

- طول وصله کششی در همه حالات برابر **1.3 ℓ_d**
- پوشش بتن کمتر از **d_b** نباشد
- اگر پوشش یا فاصله میلگردها برابر d_b باشد، ضریب اصلاح **۱٫۵** در طول وصله اعمال شود
- برای پوشش و فاصله بزرگ‌تر از $2d_b$، ضریب اصلاح **۱**

خطاهای رایج

- برداشتن طول مهاری از جدول میلگرد فولادی
- وصله همه میلگردها در یک مقطع
- خم کردن انتهای میلگرد در کارگاه برای ساخت قلاب
- استفاده از وصله مکانیکی یا جوشی بدون سیستم آزمون‌شده
- نادیده گرفتن ضریب موقعیت میلگرد فوقانی

عدد مثال، طول اجرایی نیست

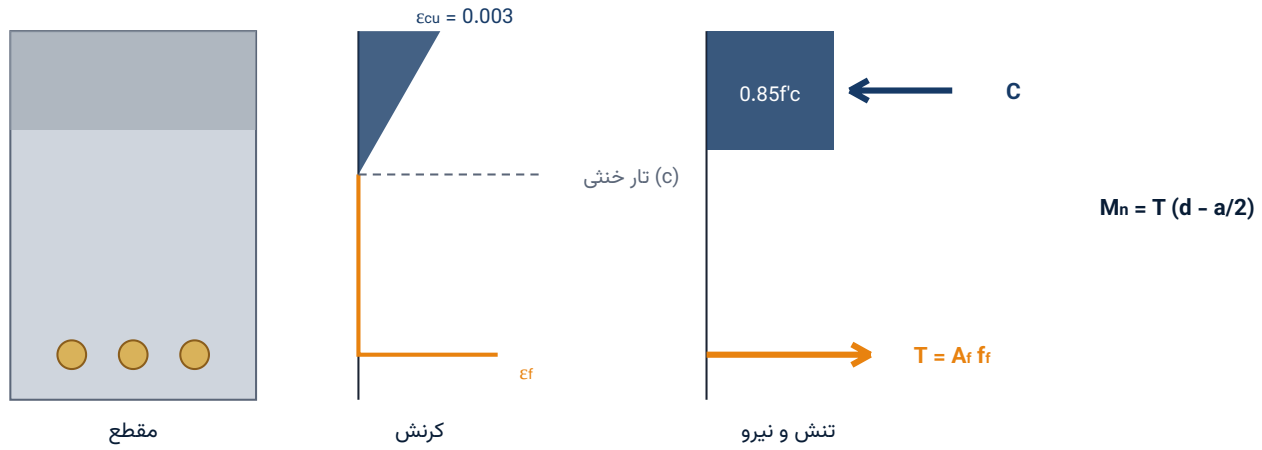
طول‌های بالا فقط برای همین فرضیات‌اند. طول اجرایی به مقاومت بتن، پوشش، فاصله، تنش طراحی و پیوستگی همان محصول بستگی دارد و در نقشه طراح تعیین می‌شود.

منابع: ACI 440.1R-15، فصل ۱۰؛ ACI CODE-440.11-22، فصل ۲۵؛ تأیید فنی شماره ۰۲-۲۵-۲۱۱۷۳، بند ۶-ب.

A21

رفتار خمشی اعضای بتن مسلح به GFRP

در طراحی خمشی بتن مسلح فولادی، تسلیم میلگرد پیش از خردشدن بتن، شکل‌پذیری عضو را تأمین می‌کند. میلگرد GFRP تسلیم نمی‌شود؛ بنابراین فلسفه طراحی معکوس است: آیین‌نامه‌ها ترجیح می‌دهند شکست با **خردشدن بتن فشاری** آغاز شود، چون تدریجی‌تر و با هشدار بیشتری همراه است.



شکل A21-1 — فرضیات مقطع خمشی: توزیع خطی کرنش، کرنش حدی بتن ۰٫۰۰۳، بلوک تنش معادل، و رفتار خطی میلگرد تا گسیختگی.

نسبت آرماتور متعادل

$$\rho_{fb} = 0.85\ \beta_1\ (f'_c/f_{fu})\ \cdot\ E_f\varepsilon_{cu}\ /\ (E_f\varepsilon_{cu} + f_{fu})$$

$\rho_f > \rho_{fb}$: خردشدن بتن پیش از گسیختگی میلگرد (حالت ترجیحی و الزام تأیید فنی). φ = ۰٫۵۵ برای $\rho_f \le \rho_{fb}$، ۰٫۶۵ برای $\rho_f \ge 1{,}4\rho_{fb}$ و خطی در میان.

تنش میلگرد در حالت خردشدن بتن

$$f_f = \sqrt{[\ (E_f\varepsilon_{cu})^2/4 + 0.85\beta_1 f'_c E_f\varepsilon_{cu}/\rho_f\ ]} - 0.5E_f\varepsilon_{cu}$$

بازتوزیع لنگر مجاز نیست و میلگرد فشاری GFRP در ظرفیت منظور نمی‌شود.

مثال جاری فصل ۳ — دال یک‌طرفه داخلی مسلح به GFRP

برای نشان دادن روند واقعی طراحی، یک دال در صفحه‌های A20 تا A25 گام‌به‌گام کنترل می‌شود: دال یک‌طرفه تک‌دهانه با دهانه **۴٫۵ m**، ضخامت **۲۰۰ mm**، بتن f'c = ۳۰ MPa، بار مرده اضافی ۲٫۰ و بار زنده ۴٫۰ kN/m²، میلگرد **۱۲** پوشش ۲۵ mm، E_f = ۴۴٬۸۰۰ MPa، **@ ۷۵ mm** (حداقل تأیید فنی) و f_{fu}^* = ۶۵۰ MPa (حداقل تضمین‌شده قطر ۱۲) با C_E = ۰٫۸. روابط از ACI 440.1R-15 (SI). مثال آموزشی است و نقشه اجرایی نیست.

مثال جاری ▸ مقاومت خمشی

بارگذاری (نوار ۱ m)	wD = 24×0.20+2.0 = 6.80 kN/m ; wu = 1.2wD+1.6wL = 14.56 kN/m
لنگر نهایی	Mu = wu·L²/8 = **36.9 kN·m**
آرماتور و عمق مؤثر	Af = 113.1×1000/75 = 1508 mm² ; d = 169.0 mm ; ρf = 0.00892
نسبت متعادل	ffu = 0.8×650 = 520 MPa ; β1 = 0.836 ; ρfb = 0.00842
حالت شکست	ρf/ρfb = **1.06** > 1 → خردشدن بتن
تنش میلگرد	ff = 503 MPa ≤ ffu ; a = 29.8 mm
ظرفیت	Mn = Af·ff(d−a/2) = 117.0 kN·m ; φ = 0.3+0.25·ρf/ρfb = 0.57
کنترل	φMn = **66.1** ≥ Mu = 36.9 kN·m ; Af ≥ Af,min = 734 mm²

✓ مقاومت کافی است. نسبت بهره‌وری فقط ۵۶٪ است؛ سطح مقطع را شرط «شکست فشاری بتن» (ρf > ρfb) تعیین کرده، نه لنگر.

منابع: ACI 440.1R-15، فصل ۷؛ ACI CODE-440.11-22، فصل ۲۲؛ تأیید فنی شماره ۲۱۱۷۳-۲۵-۰۲، بندهای ۶-۱۲ و ۶-۱۳.

A22

کنترل ترک‌خوردگی

به دلیل مدول کمتر، میلگرد GFRP در تنش یکسان کرنش بیشتری دارد و ترک‌های عریض‌تری ایجاد می‌کند. چون GFRP زنگ نمی‌زند، حد مجاز عرض ترک بیشتر از فولاد است؛ اما عرض ترک همچنان برای ظاهر، نشت آب و عملکرد بهره‌برداری کنترل می‌شود.

عرض ترک — رابطه فراگیر ACI 440.1R-15

$$w = 2 \cdot (f_f / E_f) \cdot \beta \cdot k_b \cdot \sqrt{[\, d_c^2 + (s/2)^2 \,]}$$

f_f تنش بهره‌برداری میلگرد، β نسبت فاصله تار خنثی تا تار کششی به فاصله تا مرکز میلگرد، k_b ضریب پیوستگی، d_c پوشش تا مرکز میلگرد، s فاصله میلگردها.

جدول A22-1 — پارامترهای کنترل ترک

پارامتر	مقدار مرجع	منبع
حد عرض ترک — بیرونی	۰٫۵ mm	ACI 440.1R-15
حد عرض ترک — داخلی	۰٫۷ mm	ACI 440.1R-15
k_b پیش‌فرض (بدون داده)	۱٫۴	ACI 440.1R-15
k_b برای میلگرد هم‌ارز فولاد	۱٫۰	ACI 440.1R-15
k_b مبنای طراحی میلگرد اپوراد (آج پیچشی)	۱٫۴	محافظه‌کارانه

راهکارهای کاهش عرض ترک

- میلگرد با قطر کمتر و فاصله نزدیک‌تر به‌جای میلگرد قطور
- کاهش تنش بهره‌برداری با افزایش سطح مقطع آرماتور
- پوشش متناسب؛ پوشش زیاد عرض ترک سطحی را افزایش می‌دهد
- استفاده از محصول با k_b اندازه‌گیری‌شده کمتر
- کنترل جمع‌شدگی و حرارت در دال‌ها

مثال جاری ▸ عرض ترک در بهره‌برداری

لنگر بهره‌برداری	$Ma = (wD+wL)L^2/8 = \mathbf{27.3\ kN\cdot m}$
مقطع ترک‌خورده	$nf = Ef/Ec = 1.74$; $k = \sqrt{(2\rho n+(\rho n)^2)} - \rho n = 0.161$
تنش میلگرد	$ff,s = Ma / [Af\cdot d(1-k/3)] = \mathbf{113\ MPa}$ (۲۲٪ ffu)
ضرایب	$\beta = (h-kd)/(d-kd) = 1.22$; $dc = 31$ mm ; $s = 75$ mm ; $kb = 1.4$
عرض ترک	$w = 2(ff/Ef)\cdot\beta\cdot kb\cdot\sqrt{(dc^2+(s/2)^2)} = \mathbf{0.42\ mm}$

✓ w = ۰٫۴۲ mm ≤ ۰٫۷ mm (حد داخلی). با kb اندازه‌گیری‌شده کمتر از ۱٫۴، عرض ترک کمتر خواهد بود.

A23

کنترل خیز و تغییرشکل

خیز، اغلب معیار حاکم در طراحی اعضای خمشی مسلح به GFRP است. پس از ترک‌خوردن، سختی مقطع به‌شدت کاهش می‌یابد و چون مدول میلگرد کم است، این کاهش از بتن مسلح فولادی شدیدتر است.

ممان اینرسی مؤثر (Bischoff)

$$I_e = I_{cr} / [\ 1 - \gamma\ (M_{cr}/M_a)^2\ (1 - I_{cr}/I_g)\ ] \le I_g$$

γ ضریبی برای تغییرات سختی در طول عضو است. ACI CODE-440.11 و ACI 440.1R-15 روابط مشابه با جزئیات متفاوت دارند.

ممان اینرسی مقطع ترک‌خورده

$$I_{cr} = b\ d^3\ k^3 / 3 + n_f\ A_f\ d^2\ (1 - k)^2$$

$k = \sqrt{(2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2)} - \rho_f n_f\ ;\ n_f = E_f/E_c$

جدول A23-1 — حداقل ضخامت توصیه‌شده تیر و دال یک‌طرفه مسلح به FRP (بدون محاسبه خیز)

نوع عضو	تک‌دهانه	یک سر پیوسته	دو سر پیوسته	طره
دال یک‌طرفه	ℓ/13	ℓ/17	ℓ/22	ℓ/5.5
تیر	ℓ/10	ℓ/12	ℓ/16	ℓ/4

تأیید فنی شماره ۲۱۱۷۳-۲۵-۰۲، بند ۶-۱۱؛ برگرفته از ACI 440.1R. این مقادیر برای اعضای بدون اتصال به اجزای حساس به خیز است. برای مقایسه، ضخامت دال یک‌طرفه تک‌دهانه فولادی در ACI 318 برابر ℓ/20 است.

خیز بلندمدت

ACI 440.1R-15 ضریب خیز بلندمدت را $\lambda = 0.6\xi$ (برای ۵ سال، ξ = ۱٫۲) می‌دهد؛ تأیید فنی خیز درازمدت را **۰٫۶ خیز آنی** در نظر می‌گیرد. در مثال، مقدار محافظه‌کارانه‌تر به کار رفته است.

مثال جاری ▸ خیز آنی و بلندمدت

ضخامت	$h = 200\ mm < L/13 = 346\ mm$ → محاسبه صریح خیز لازم است
ممان‌های اینرسی	$I_g = 667\times10^6$; $I_{cr} = 59.5\times10^6\ mm^4$; $I_{cr}/I_g = 0.089$
لنگر ترک	$f_r = 0.62\sqrt{f'_c} = 3.40\ MPa$; $M_{cr} = 22.6 < M_a = 27.3\ kN\cdot m$ → ترک‌خورده
اینرسی مؤثر	$I_e(M_a) = 200\times10^6\ mm^4$ (۳۰٪ I_g)
خیز آنی	$\Delta D = 2.1$; $\Delta D+L = 11.2$; $\Delta L = 9.1\ mm \le L/360 = 12.5$
بلندمدت ($\lambda = 0.6\xi = 1.2$)	$\Delta = \lambda(\Delta D+0.2\Delta L) + \Delta L = 13.8\ mm \le L/240 = 18.8$

✓ خیز در حدود مجاز است. اگر بار زنده ۲۰٪ بیشتر بود، ΔL از حد ℓ/360 عبور می‌کرد؛ در GFRP، خیز معمولاً نزدیک‌ترین کنترل به حد است.

A24

برش، پیچش و نقش آرماتور عرضی

سهم بتن در مقاومت برشی عضو مسلح به GFRP کمتر از عضو فولادی است: ناحیه فشاری کوچک‌تر، ترک‌های عریض‌تر، درگیری سنگدانه کمتر و عمل داول ضعیف‌تر میلگرد. خاموت‌های GFRP نیز به دلیل کاهش مقاومت در محل خم، با محدودیت تنش طراحی می‌شوند.

سهم برشی بتن — ACI 440.1R-15 (SI)

$$V_c = 0.4\sqrt{f'_c}\cdot b_w \cdot c$$

c عمق تار خنثی مقطع ترک‌خورده است که در GFRP کوچک است. ACI CODE-440.11 رابطه اصلاح‌شده‌ای دارد.

سهم خاموت

$$V_f = A_{fv}\cdot f_{fv}\cdot d / s$$

$f_{fv} = 0.004E_f \le f_{fb}$ ؛ f_{fb} مقاومت بخش خم‌شده (ACI 440.1R-15).

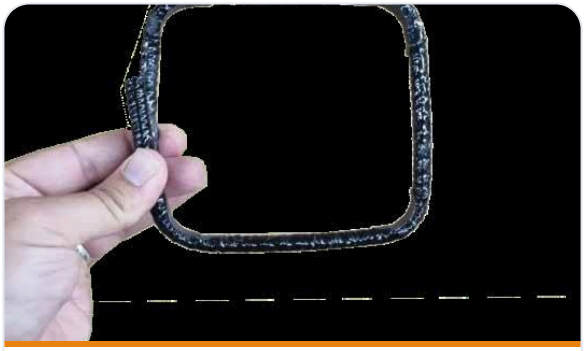
مثال جاری ▸ برش یک‌طرفه دال

برش نهایی	Vu = wu·L/2 = 32.8 kN (در بر تکیه‌گاه، محافظه‌کارانه)
عمق تار خنثی	c = k·d = 0.161×169.0 = 27.3 mm
سهم بتن	Vc = 0.4√f′c·b·c = 59.8 kN ; φ = 0.75 → φVc = **44.8 kN**

✓ φVc ≥ Vu؛ دال به آرماتور برشی نیاز ندارد. توجه: با c کوچک مقطع GFRP، Vc حدود نصف مقدار متناظر فولادی است.

جدول A24-1 — الزامات آرماتور عرضی GFRP

موضوع	الزام یا مرجع
مقاومت بخش خم‌شده (ASTM D7914)	≥ ۶۰ ٪ نیروی بخش مستقیم (تأیید فنی)
قطر داخلی خم	طبق ASTM D7957 و نقشه خم سازنده
تنش طراحی خاموت	محدود به ۰٫۰۰۴E_f برای کنترل عرض ترک برشی
طول قلاب خاموت	طبق آیین‌نامه حاکم؛ معمولاً بزرگ‌تر از فولاد
قاب با میلگرد طولی فولادی و خاموت FRP	ضرایب رفتار و اضافه‌مقاومت استاندارد ۲۸۰۰
قاب با میلگرد طولی و خاموت FRP	$R_u = 1$، $\Omega_0 = 1$، $C_d = 1$ (تأیید فنی)



خاموت بسته GFRP کارخانه‌ای — محصول اپوراد

ظرفیت برشی خاموت‌ها در قاب تمام‌FRP باید از بیشینه برش ضریب‌دار زلزله و برش ناشی از ظرفیت خمشی دو انتهای تیر بیشتر باشد. پیچش در ACI CODE-440.11 با محدودیت‌های ویژه پوشش داده شده است.

A25

خزش، گسیختگی خزشی و خستگی

دو پدیده را نباید با هم یکی دانست: **خزش ماده** یعنی افزایش تدریجی کرنش زیر بار ثابت؛ و **گسیختگی خزشی** یعنی شکست ناگهانی میلگرد زیر بار پایدار، در تنشی کمتر از مقاومت کوتاه‌مدت. برای GFRP، گسیختگی خزشی محدودکننده اصلی تنش پایدار است.

$0.20\ f_{fu}$	$0.30\ f_{fu}$	$0.55\ f_{fu}$	$0.14\ f_{fu}$*
حد تنش پایدار GFRP — ACI 440.1R-15 و تأیید فنی	حد معادل برای AFRP	حد معادل برای CFRP	حد تنش پایدار معادل با C_E = ۰٫۷

گسیختگی خزشی

تنش ناشی از بارهای مرده و زنده پایدار در بهره‌برداری نباید از حد بالا بیشتر شود. شدت گسیختگی خزشی با دما، رطوبت و محیط قلیایی افزایش می‌یابد؛ آزمون آن با ASTM D7337 انجام می‌شود و برون‌یابی به عمر طولانی بر پایه رابطه لگاریتمی است.

کنترل تنش پایدار

$$f_{f,s} \le 0.20 \cdot f_{fu}$$

$f_{f,s}$ تنش میلگرد زیر بار پایدار بهره‌برداری؛ f_{fu} مقاومت طراحی پس از اعمال C_E.

خستگی

رفتار خستگی GFRP وابسته به محیط و دامنه تنش است. ACI 440.1R-15 برای بار چرخه‌ای، حد تنش پایدار به‌علاوه تنش ناشی از بار چرخه‌ای را با همان حد گسیختگی خزشی کنترل می‌کند.

مثال جاری ▸ گسیختگی خزشی

لنگر پایدار

```
Ms = MD + 0.2ML = 19.2 kN·m
```

تنش پایدار

```
ff,sus = 80 MPa ≤ 0.2·ffu = 104 MPa
```

✓ نسبت بهره‌وری ۷۷٪

جمع‌بندی مثال جاری — دال ۴٫۵ متری، ۱۲ @ ۷۵ mm

کنترل	مقدار	حد	بهره‌وری	نتیجه
مقاومت خمشی	۳۶٫۹ kN·m	φMn = ۶۶٫۱	۵۶٪	✓
حالت شکست (تأیید فنی)	ρf/ρfb = ۱٫۰۶	۱٫۰ <	—	✓ حاکم
عرض ترک	۰٫۴۲ mm	۰٫۷ mm	۶۰٪	✓
خیز زنده	۹٫۱ mm	۱۲٫۵ mm	۷۳٪	✓
خیز بلندمدت	۱۳٫۸ mm	۱۸٫۸ mm	۷۴٪	✓
گسیختگی خزشی	۸۰ MPa	۱۰۴ MPa	۷۷٪	✓
برش	۳۲٫۸ kN	φVc = ۴۴٫۸	۷۳٪	✓

درس مهندسی مثال

برای همین دال، آرماتور فولادی لازم برای مقاومت (fy = ۴۲۰ MPa) حدود ۵۹۴ mm²/m است، اما GFRP به ۱۵۰۸ mm²/m نیاز داشت؛ حدود ۲٫۵ برابر. دلیل، مقاومت نیست: شرط شکست فشاری بتن، خیز و گسیختگی خزشی سطح مقطع را تعیین کرده‌اند. به همین دلیل جایگزینی قطر به قطر با فولاد نادرست است.

منابع: ACI 440.1R-15، بندهای ۷٫۴ و ۷٫۵؛ تأیید فنی شماره ۲۱۱۷۳-۲۵-۰۲، بند ۶-۱۰؛ ASTM D7337/D7337M.

A26

دوام بلندمدت بتن مسلح به GFRP

مزیت اصلی GFRP دوام در برابر خوردگی است، اما دوام سازه حاصل هم‌زمانی چند عامل است: بار، رطوبت، قلیائیت، دما و پیری ماده. نتایج آزمایشگاهی شتاب‌یافته باید با احتیاط به سازه واقعی تعمیم داده شوند.

آنچه پشتیبان دوام است

عدم خوردگی الکتروشیمیایی؛ عملکرد مطلوب گزارش‌شده در پایش سازه‌های چندساله در کانادا و ایالات متحده؛ ورود GFRP به آیین‌نامه ساختمانی.

آنچه دوام را تهدید می‌کند

رزین نامناسب یا پخت ناقص، تخلخل، دمای بهره‌برداری بالا، تنش پایدار زیاد، آسیب سطحی در حمل و انبارش در آفتاب.

آنچه هنوز محدودیت دارد

داده‌های میدانی بسیار طولانی‌مدت محدود است؛ برون‌یابی آزمون‌های ۶۰ درجه به عمر ۱۰۰ ساله با فرضیات همراه است.

جدول A26-1 — سازوکارهای ترکیبی و ابزار کنترل در طراحی

عامل	اثر	ابزار کنترل
قلیائیت بتن + رطوبت	تخریب الیاف از راه نفوذ در رزین	آزمون ASTM D7705؛ ضریب C_E
تنش پایدار	تشدید تخریب، گسیختگی خزشی	حد $0.2f_{fu}$
دمای بالا	شتاب واکنش‌ها؛ نرم‌شدن رزین	دمای بهره‌برداری زیر T_g
چرخه یخ‌وذوب	ترک بتن؛ آسیب سطح مشترک	کیفیت بتن و پوشش
آسیب مکانیکی پیش از بتن‌ریزی	شکستن الیاف سطحی	بازرسی تحویل؛ حمل صحیح

عمر طراحی

میلگرد اپوراد خوردگی الکتروشیمیایی ندارد و با رزین اپوکسی، مقاومت قلیایی ≥ ۸۵٪ را در آزمون شتاب‌یافته نشان داده است. عمر طراحی سازه با طراحی دوام پروژه (پوشش، کیفیت بتن، C_E و حد تنش پایدار) تعیین و در مدارک طرح ثبت می‌شود.



آرماتوربندی فونداسیون با میلگرد GFRP — محصول اپوراد

A27

مقایسه جامع GFRP با میلگرد فولادی

این جدول برای تصمیم‌گیری است، نه تبلیغ. GFRP در برخی معیارها برتر و در برخی ضعیف‌تر از فولاد است؛ انتخاب درست به شرایط پروژه بستگی دارد.

جدول A27-1 — مقایسه چندمعیاره

معیار	میلگرد فولادی	میلگرد GFRP	نتیجه
مقاومت کششی	تسلیم ۴۰۰ تا ۵۲۰ MPa (رده‌های رایج)	گسیختگی ۵۰۰ تا ۱۳۰۰ MPa؛ وابسته به قطر	**GFRP بالاتر؛ اما مقایسه هم‌ارز نیست**
مدول الاستیسیته	۲۰۰ GPa	۴۰ تا ۶۰ GPa	**فولاد حدود ۴ برابر سخت‌تر**
رفتار تسلیم و شکست	تسلیم، شکل‌پذیر	خطی تا گسیختگی، ترد	**فولاد برتر**
وزن	۷٫۸۵ g/cm³	حدود ۲ g/cm³	**GFRP حدود ¼ جرم هم‌قطر**
خوردگی	آسیب‌پذیر در کلراید و کربناسیون	خوردگی الکتروشیمیایی ندارد	**GFRP برتر**
دوام قلیایی	محافظت‌شده توسط قلیائیت بتن	رزین اپوکسی؛ حفظ ≥ ۸۵٪ نیرو در آزمون قلیایی	**مناسب**
رفتار در حریق	مناسب با پوشش متعارف	محدود به T_g؛ آیین‌نامه بدون درجه آتش	**فولاد برتر**
برش و عمل داول	مناسب	کمتر؛ ناهمسان	**فولاد برتر**
خم و اصلاح در کارگاه	ممکن	ممکن نیست؛ خم کارخانه‌ای	**فولاد برتر**
حمل و نصب	سنگین؛ نیازمند جرثقیل در ابعاد بزرگ	سبک؛ برش آسان با دیسک الماسه	**GFRP برتر**
مغناطیسی و رسانایی	مغناطیسی و رسانا	غیرمغناطیسی و نارسانا	**GFRP برتر**
هزینه اولیه	مبنا	وابسته به بازار و سطح مقطع موردنیاز	**پروژه‌محور**
هزینه چرخه عمر	هزینه تعمیر خوردگی در محیط خورنده	هزینه نگهداری کمتر در محیط خورنده	**در محیط خورنده به نفع GFRP**
استاندارد طراحی	ACI 318، مبحث نهم	ACI CODE-440.11، CSA S806، نشریه ۱۰۲۰-گ	**GFRP محدوده کاربرد محدودتری دارد**

جمع‌بندی متوازن

GFRP جایگزین همه‌جایی فولاد نیست. در سازه‌هایی که خوردگی آرماتور عامل اصلی کاهش عمر است، یا نارسانایی و غیرمغناطیسی بودن لازم است، می‌تواند گزینه‌ای فنی و اقتصادی باشد؛ به شرط طراحی مستقل و پذیرش آیین‌نامه‌ای.

نکته کلیدی مقایسه

جرم میلگرد GFRP حدود یک‌چهارم فولاد هم‌قطر است و مقاومت کششی آن بیشتر است؛ اما مدول کمتر باعث می‌شود سطح مقطع لازم از طراحی به دست آید، نه از جایگزینی قطر به قطر.

A28

کاربرد در فونداسیون‌ها و سازه‌های بتنی

میلگرد GFRP در فونداسیون‌ها و اعضای در تماس با خاک‌های خورنده می‌تواند مزیت دوام داشته باشد. اما استفاده سازه‌ای در ساختمان، تابع آیین‌نامه حاکم و محدودیت‌های تأیید فنی است.

محدوده مجاز طبق تأیید فنی مرکز تحقیقات (۱۴۰۲)

- قاب خمشی بتن‌آرمه یا دیوار باربر بتن‌آرمه
- ساختمان‌های **حداکثر سه طبقه یا ارتفاع ۱۲ متر** از تراز پایه
- در همه مناطق لرزه‌خیز با رعایت راهنمای نشریه گ-۱۰۲۰
- دو حالت: میلگرد طولی فولادی + خاموت FRP؛ یا میلگرد طولی و خاموت هر دو FRP
- رعایت ضوابط مقررات ملی ساختمان، مبحث ششم و استاندارد ۲۸۰۰



آرماتوربندی فونداسیون — محصول اپوراد



آرماتور انتظار ستون‌ها — محصول اپوراد

کاربردهای فونداسیونی مطرح

شالوده نواری و گسترده در خاک سولفاتی و کلرایدی

فونداسیون تجهیزات حساس به میدان مغناطیسی

دال روی زمین سالن‌های صنعتی

شمع درجا در آب‌های زیرزمینی خورنده

فونداسیون پست برق

مبنای مجوز کاربرد سازه‌ای

تأیید فنی شماره ۲۱۱۷۳-۲۵-۰۲ مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، کاربرد میلگرد اپوراد را در اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای بتنی، از جمله قاب خمشی و دیوار باربر ساختمان‌های تا سه طبقه، مجاز کرده است. طراحی توسط مهندس سازه و تأیید مرجع صدور پروانه الزامی است.

جدول A28-1 — کاربرد در فونداسیون و سازه‌های بتنی

کاربرد	وضعیت	شرط
فونداسیون ساختمان تا سه طبقه	مجاز	طراحی طبق نشریه گ-۱۰۲۰ و تأیید مرجع پروانه
فونداسیون ساختمان بلندتر	با مجوز ویژه	خارج از محدوده تأیید فنی
دال روی زمین و کف صنعتی	رایج	طراحی کنترل ترک و جمع‌شدگی
شمع و دیوار حائل	مناسب	طراحی ژئوتکنیک و سازه

A29

کاربرد در دال، کف و قطعات پیش‌ساخته

دال‌ها و قطعات پیش‌ساخته از رایج‌ترین کاربردهای میلگرد GFRPاند. در بسیاری از این موارد نقش میلگرد کنترل ترک‌های حرارتی و جمع‌شدگی است، نه تحمل بار سازه‌ای اصلی؛ تفکیک این دو نقش در طراحی ضروری است.


شبکه دال روی زمین — محصول اپوراد


کف سالن صنعتی — محصول اپوراد


دیوار پیش‌ساخته بتنی — محصول اپوراد

جدول A29-1 — نقش میلگرد در کاربردهای مختلف

کاربرد	نقش اصلی میلگرد	معیار حاکم	ذکر در تأیید فنی
دال روی زمین، کف پارکینگ و سالن صنعتی	کنترل ترک جمع‌شدگی و حرارتی	حداقل آرماتور، فاصله، عرض ترک	دارد
میلگرد حرارتی دال‌ها	کنترل ترک	حداقل آرماتور طبق نشریه گ-۱۰۲۰	دارد
کف و سقف کاذب بتنی	سازه‌ای سبک	خیز و ترک	دارد
پانل پیش‌ساخته نما	سازه‌ای و کنترل ترک	خیز، اتصالات، حمل	دارد
بلوک نیوجرسی و حفاظ جاده‌ای	سازه‌ای و دوام	ضربه، دوام نمک	دارد
دیوار محوطه	سازه‌ای سبک	باد، خاک	دارد
دال سازه‌ای طبقات	خمشی اصلی	خیز، ترک، برش پانچ	در محدوده ساختمان‌های مجاز

ملاحظات اجرایی دال

- میلگرد سبک است و در بتن‌ریزی شناور می‌شود؛ بستن به اسپیسر و نگهدارنده الزامی است.
- رفت‌وآمد کارگران روی شبکه پیش از بتن‌ریزی باید کنترل شود.
- در دال‌های بزرگ، درزهای اجرایی و برشی طبق طرح.

قطعات پیش‌ساخته

- سبکی میلگرد ساخت قفسه در کارخانه را آسان می‌کند.
- نقاط برداشت و اتصالات حمل باید جداگانه طراحی شوند.
- میلگرد GFRP در اتصالات جوشی یا پیچی فلزی نقشی ندارد.

A30

کاربرد در پل‌ها و حمل‌ونقل

عرشه پل‌ها، به‌ویژه در مناطق سردسیر که نمک یخ‌زدا مصرف می‌شود، از پرسابقه‌ترین کاربردهای سازه‌ای GFRP در جهان‌اند. خوردگی آرماتور عرشه یکی از عوامل اصلی هزینه نگهداری پل‌هاست و GFRP آن را حذف می‌کند.

جدول A30-1 — کاربردهای حمل‌ونقل

کاربرد	مزیت GFRP	ملاحظه
عرشه پل در مناطق دارای نمک یخ‌زدا	حذف خوردگی کلرایدی	طراحی طبق AASHTO LRFD GFRP یا CSA S6
دیوار جان‌پناه و حفاظ پل	دوام در برابر نمک و آب	آزمون ضربه طبق مقررات راه
دال تقرب و روسازی بتنی	دوام؛ میلگرد داول غیرخورنده	انبساط حرارتی و درز
سازه‌های کنار راه، آبرو و کالورت	دوام در آب و خاک	ذکرشده در تأیید فنی
تراورس و سکوی راه‌آهن	نارسانایی؛ تداخل نداشتن با سیگنال	کاربرد اعلام‌شده سازنده
پل‌های عابر و سکوهای ایستگاه	سبکی و دوام	خیز و ارتعاش



اجرای میلگرد GFRP در پروژه زیرساختی — محصول اپوراد



میلگرد GFRP در لایه زیرسازی — محصول اپوراد

آیین‌نامه پل

طراحی پل از ACI CODE-440.11 تبعیت نمی‌کند. مراجع رایج: AASHTO LRFD Bridge Design Guide Specifications for GFRP-Reinforced Concrete (ویرایش دوم، ۲۰۱۸) و CSA S6 (فصل ۱۶). در ایران، استفاده در پل نیازمند تأیید کارفرما و مرجع فنی راه است.

ملاحظات اجرایی

- کنترل خیز و ارتعاش در عرشه‌های سبک
- پوشش بتن متناسب با آتش‌سوزی خودرو در زیر پل
- هماهنگی قطعات خم کارخانه‌ای با جزئیات جان‌پناه
- جلوگیری از شناوری شبکه در بتن‌ریزی عرشه

منابع: ACI 440.1R-15؛ AASHTO LRFD GFRP-RC Guide Specifications, 2nd ed., 2018؛ CSA S6-19، فصل ۱۶؛ تأیید فنی شماره ۰۲-۲۵-۲۱۱۷۳، بند ۴.

A31

کاربرد در سازه‌های دریایی و محیط‌های خورنده

در محیط‌های دارای کلراید، سولفات و مواد شیمیایی، خوردگی میلگرد فولادی اصلی‌ترین دلیل ترک‌خوردگی، پوسته‌شدن و تعمیرات پرهزینه بتن است. در این محیط‌ها، GFRP یکی از جدی‌ترین گزینه‌ها برای افزایش دوام است.



میلگرد GFRP در پروژه ساحلی — محصول اپوراد



شبکه میلگرد در دال — محصول اپوراد



آرماتوربندی سازه بتنی — محصول اپوراد

جدول A31-1 — کاربرد در محیط‌های خورنده

سازه	عامل خورنده	ملاحظه کلیدی	ذکر در تأیید فنی
اسکله، موج‌شکن و دیوار ساحلی	کلراید آب دریا، ترشدن و خشک‌شدن	ضربه کشتی، سایش، الزامات بندری	—
تصفیه‌خانه آب و فاضلاب، کلاریفایر، منهول	H_2S، اسید سولفوریک، کلر	دوام بتن حاکم؛ پوشش محافظ بتن	**کانال و لوله فاضلاب**
کانال‌ها و لوله‌های بتنی پساب صنعتی	مواد شیمیایی متنوع	آزمون مقاومت شیمیایی ویژه	**دارد**
کانال روباز و کالورت	آب، خاک سولفاتی	طراحی دوام بتن	**دارد**
حوضچه و مخزن صنایع شیمیایی	اسید، باز، حلال	سازگاری رزین با ماده شیمیایی	**مناسب؛ با تأیید سازگاری شیمیایی**
استخر و سازه‌های در تماس با آب کلردار	کلراید و کلر	آب‌بندی و ترک	**مناسب؛ با تأیید سازگاری شیمیایی**

شرایط انتخاب محصول

- رزین مقاوم در برابر قلیا و ماده شیمیایی موردنظر
- جذب رطوبت کم و درجه پخت کامل (آزمون)
- T_g بالاتر از دمای بهره‌برداری با حاشیه کافی
- خم‌ها و خاموت‌های کارخانه‌ای با آزمون D7914
- اتصالات غیرفلزی یا دست‌کم مقاوم به خوردگی

بتن همچنان مهم است

GFRP مشکل خوردگی میلگرد را حل می‌کند، اما بتن را از حمله سولفات، اسید یا سایش محافظت نمی‌کند. طرح اختلاط، پوشش و در صورت لزوم پوشش‌های محافظ سطحی بتن باید جداگانه طراحی شوند.

A32

کاربرد در معادن، تونل‌ها و صنایع

یکی از کاربردهای ویژه GFRP، «سازه‌های بریدنی» است: دیواره‌های بتنی موقت در محل ورود و خروج دستگاه حفاری تونل (TBM) که باید بدون آسیب به تیغه‌ها بریده شوند. معادن و صنایع نیز کاربردهای مستند و بالقوه دیگری دارند.

کاربردهای مستند در منابع فنی

چشمه ورود و خروج TBM (Soft-eye)

میلگرد GFRP در دیوار دیافراگمی یا شفت، توسط دستگاه حفاری بریده می‌شود؛ ذکرشده در ACI 440.1R و ACI CODE-440.11 به‌عنوان کاربرد مناسب.

دیوار موقت بتنی داخل تونل

در فهرست کاربردهای تأیید فنی مرکز تحقیقات.

نیلینگ و میخ‌کوبی خاک، پیچ‌سنگ

کاربرد رایج میلگرد اپوراد؛ طراحی ژئوتکنیک همراه با آزمون بیرون‌کشیدگی در محل.

کاربردهای صنعتی و نکات طراحی

کاربرد	نکته
سازه‌های پتروشیمی و پالایشگاه	آتش‌سوزی؛ مواد شیمیایی خاص
سکوهای تجهیزات الکتریکی	نارسانایی
کف سالن‌های صنعتی با بار سنگین	برش پانچ، خستگی
سازه‌های زیرزمینی با آب سولفاتی	دوام و آب‌بندی
حائل‌های معادن	ضربه و انفجار



آرماتوربندی سازه صنعتی — محصول اپوراد

انتخاب درست برای هر کاربرد

تیم فنی نابک کامپوزیت برای هر پروژه صنعتی، شرایط محیطی، بارگذاری و الزامات حریق را بررسی و قطر، نوع قطعات و مدارک لازم را پیشنهاد می‌کند.

A33

راهنمای انتخاب میلگرد GFRP

انتخاب میلگرد GFRP از پرسش «آیا GFRP مناسب است؟» شروع می‌شود و به مشخصات دقیق خرید ختم می‌شود. مسیر زیر برای مشاوران و کارفرمایان طراحی شده است.

۱ **نیاز را مشخص کنید:** خوردگی، نارسانایی، غیرمغناطیسی بودن یا قابلیت برش؟

۲ **محدودیت‌ها را بسنجید:** درجه آتش، شکل‌پذیری لرزه‌ای، ارتفاع ساختمان، دمای بهره‌برداری.

۳ **آیین‌نامه را تعیین کنید:** ACI CODE-440.11، CSA S806، AASHTO یا نشریه گ-۱۰۲۰ و تأیید مرجع.

۴ **طراحی کنید:** مقاومت، خیز، ترک، گسیختگی خزشی، مهار؛ بر پایه حداقل‌های تضمین‌شده میلگرد اپوراد (جدول A38).

۵ **مشخصات خرید را بنویسید:** قطر، طول، نوع سطح، خواص حداقل، خم‌ها، مدارک.

۶ **مدارک را کنترل کنید:** گزارش آزمون بچ، تأیید فنی معتبر، ردیابی.

جدول A33-1 — معیارهای انتخاب

معیار	آنچه باید تعیین شود	منبع تصمیم
قطر و فاصله	از طراحی؛ قطر کمتر با فاصله کمتر برای کنترل ترک	محاسبات طراح
نوع سطح	سطح دارای آج یا ماسه؛ میلگرد ساده برای مسلح‌سازی سازه‌ای نه	ASTM D7957
مقاومت و مدول	حداقل نیروی تضمین‌شده و مدول هر قطر	جدول A11 و A38؛ ASTM D7957
شرایط محیطی	C_E؛ دما؛ مواد شیمیایی	ACI 440.1R؛ آزمون ویژه
قطعات خم	شکل، ابعاد، قطر خم، مقاومت بخش خم	نقشه خم؛ ASTM D7914
مدارک	گزارش‌های جدول A36؛ تأیید فنی؛ گواهی بچ	دفتر فنی و کنترل کیفیت

جایگزینی مستقیم ممنوع

جدول تبدیل «فولاد ۱۴ = GFRP ۱۲» یا هر جایگزینی قطر به قطر بدون محاسبه، نادرست است. آرماتور GFRP باید مستقل طراحی شود.

A34

حمل، انبارش و نصب

میلگرد GFRP سبک و آسان‌حمل است، اما نسبت به ضربه، سایش، خم‌شدن و پرتو فرابنفش از فولاد حساس‌تر است. آسیب سطحی که در فولاد اهمیت ندارد، در GFRP می‌تواند الیاف را بشکند و مقاومت را کاهش دهد. جزئیات کامل در کاتالوگ D آمده است.

حمل و انبارش

- بلند کردن با تسمه پارچه‌ای و تیر پخش‌کننده؛ نه با زنجیر یا سیم فولادی بدون محافظ
- تکیه‌گاه‌های چوبی با فاصله منظم برای جلوگیری از خمش
- دور از آفتاب مستقیم؛ پوشش مات در انبارش طولانی
- دور از منابع حرارت، جرقه جوشکاری و مواد شیمیایی
- کشیدن روی زمین یا پرتاب از ارتفاع ممنوع

نصب

- بستن با سیم گره پوشش‌دار، بست پلاستیکی یا گره غیرفلزی
- اسپیسر پلاستیکی یا بتنی؛ تعداد بیشتر از فولاد به دلیل سبکی
- رعایت پوشش بتن $\geq d_b$ و مقادیر نقشه
- ممنوعیت خم، گرم کردن یا جوشکاری در کارگاه
- ثابت کردن شبکه برای جلوگیری از شناوری

برش

- اره یا دیسک الماسه یا کاربید؛ قیچی و دیسک برش فلز نه
- ماسک تنفسی، عینک، دستکش و لباس آستین‌بلند
- مکش گردوغبار یا برش مرطوب در فضای بسته
- سر بریده‌شده طبق دستور تولیدکننده؛ در صورت لزوم آب‌بند



بندیل میلگرد در انبار — محصول اپوراد



کلاف میلگرد — محصول اپوراد

ایمنی کارگران

گردوغبار برش الیاف شیشه برای پوست، چشم و دستگاه تنفس محرک است. برگه اطلاعات ایمنی (SDS) تولیدکننده باید در کارگاه در دسترس باشد.

منابع: ACI 440.5-22 (Construction Specification for GFRP Reinforcing Bars)؛ ACI CODE-440.11-22، فصل ۲۶؛ ACI MNL-6(23).

A35

کنترل کیفیت تولید و ردیابی

کیفیت میلگرد GFRP به‌صورت چشمی قابل تشخیص کامل نیست؛ بنابراین ردیابی بچ تولید و آزمون نمونه‌ها، ستون اصلی اعتماد به محصول است. ASTM D7957 دو سطح آزمون تعریف می‌کند: آزمون‌های **صلاحیت** (Qualification) برای تأیید اولیه محصول، و آزمون‌های **کنترل کیفیت** برای هر بچ.

اجزای سیستم ردیابی

- **شماره بچ (Lot):** روی برچسب هر بندیل و در گواهی تحویل
- **شناسنامه بچ:** تاریخ، خط تولید، شماره بچ الیاف و رزین، دمای قالب، سرعت خط
- **نمونه‌برداری:** تأیید فنی: ۵ نمونه تصادفی از هر پالت برای هر ویژگی؛ هر نمونه باید در محدوده باشد
- **گزارش بچ:** نتیجه آزمون‌های کنترل کیفیت و امضای مسئول کیفیت
- **نگهداری نمونه شاهد** برای آزمون‌های بعدی

کنترل ظاهری و ابعادی هر بچ

- قطر، دوپهنی و طول؛ مقایسه با تلرانس
- عیوب: الیاف خشک یا بیرون‌زده، ترک، حباب، لایه‌لایه شدن، جداشدن آج یا ماسه
- یکنواختی رنگ و سطح
- وزن هر متر به‌عنوان شاخص سریع چگالی و سطح مقطع

جدول A35-1 — آزمون‌های کنترل کیفیت هر بچ (تأیید فنی، جدول ۲)

ویژگی	روش	حد
نسبت جرمی الیاف	ASTM D2584	حداقل ۷۰ ٪
نسبت حجمی الیاف	ASTM D3171	حداقل ۵۵ ٪
T_g	ASTM E1356	≤ ۱۰۰ °C
درجه پخت	ASTM E2160	≤ ۹۵ ٪
سطح مقطع اندازه‌گیری‌شده	ASTM D7205	طبق نشریه گ-۱۰۲۰
نیروی کششی نهایی	ASTM D7205	طبق نشریه گ-۱۰۲۰
مدول کششی	ASTM D7205	≤ ۴۴٬۸۰۰ MPa
کرنش نهایی	ASTM D7205	≤ ۱٫۱ ٪
جذب رطوبت ۲۴ ساعته	ASTM D570	≤ ۰٫۲۵ ٪ در ۵۰ °C

گواهی‌ها

گواهی‌های مدیریت کیفیت و تأیید فنی محصول به نام کارخانه سازنده، شرکت شاهکار فکر توانا (اپوراد)، صادر شده‌اند. تصویر اصل گواهی‌ها همراه پیشنهاد فنی هر پروژه از طریق نابک کامپوزیت ارائه می‌شود.

A36

ماتریس آزمون‌های تخصصی

جدول زیر آزمون‌های اصلی میلگرد GFRP را با روش استاندارد، نوع نمونه، واحد نتیجه، معیار پذیرش مرجع و وضعیت مدارک اپوراد نشان می‌دهد. ستون آخر مقادیر میلگرد اپوراد را نشان می‌دهد.

جدول A36-1 — ماتریس آزمون‌ها

آزمون	ویژگی	روش استاندارد	نمونه	واحد	معیار پذیرش (تأیید فنی)	میلگرد اپوراد
هندسه	قطر، سطح مقطع غوطه‌وری	ASTM D792 / پیوست D7205	قطعه کوتاه	mm، mm²	طبق نشریه گ-۱۰۲۰	جدول A10
کشش	نیروی نهایی، مقاومت	ASTM D7205/D7205M	میلگرد کامل با مهار	kN، MPa	طبق نشریه گ-۱۰۲۰	۶۰۰ تا ۷۵۰ MPa (حداقل)
مدول	مدول وتری	ASTM D7205/D7205M	همان	GPa	≥ ۴۴٫۸ GPa	≥ ۴۴٫۸ (نوعی ۵۰)
کرنش نهایی	کرنش گسیختگی	ASTM D7205/D7205M	همان	٪	≥ ۱٫۱ ٪	≥ ۱٫۱ (نوعی ۲٫۱)
برش عرضی	مقاومت برشی دوصفحه‌ای	ASTM D7617/D7617M	قطعه کوتاه	MPa	≥ ۱۳۱ MPa (کرانه پایین)	≥ ۱۵۰ MPa
پیوستگی	تنش پیوستگی بیرون‌کشیدگی	ASTM D7913/D7913M	میلگرد در مکعب بتنی	MPa	≥ ۷٫۶ MPa	≥ ۸ MPa
بخش خم‌شده	نیروی بخش خم	ASTM D7914/D7914M	میلگرد خم کارخانه‌ای	kN	≥ ۶۰ ٪ بخش مستقیم	≥ ۶۰ ٪
درصد الیاف	جرمی / حجمی	ASTM D2584 / D3171	قطعه کوتاه	٪	≥ ۷۰ ٪ / ≥ ۵۵ ٪	≥ ۷۵ ٪ / ≥ ۵۵ ٪
T_g	دمای انتقال شیشه‌ای	ASTM E1356 (DSC)	پودر یا تکه	°C	≥ ۱۰۰ °C	≥ ۱۱۲ °C
درجه پخت	نسبت گرمای واکنش	ASTM E2160	پودر یا تکه	٪	≥ ۹۵ ٪	≥ ۹۵ ٪
جذب آب	۲۴ ساعته / تا اشباع	ASTM D570	قطعه کوتاه	٪	≥ ۰٫۲۵ ٪ / ≥ ۱ ٪	نوعی ۰٫۰۶ ٪
دوام قلیایی	حفظ نیروی کششی	ASTM D7705 روش A	میلگرد در محلول قلیایی	٪	≥ ۸۰ ٪ (۹۰ روز، ۶۰ °C)	≥ ۸۵ ٪
گسیختگی خزشی	مقاومت زیر بار پایدار	ASTM D7337/D7337M	میلگرد کامل	MPa	طراحی: ≥ $0.2f_{fu}$	$0.2f_{fu}$

تعداد نمونه طبق هر روش و طبق تأیید فنی (۵ نمونه تصادفی از هر پالت). گزارش آزمون بچ همراه محموله ارائه می‌شود.

A37

استانداردها و الزامات مهندسی

استانداردهای میلگرد GFRP سه دسته‌اند: **مشخصات محصول** (چه ویژگی‌هایی باید داشته باشد)، **روش‌های آزمون** (چگونه اندازه‌گیری شود) و **آیین‌نامه‌های طراحی** (چگونه در سازه به کار رود). ویرایش‌ها تا آبان ۱۴۰۵ بررسی شده‌اند.

جدول A37-1 — استانداردهای اصلی

سند	عنوان	نوع	دامنه و نکته
ASTM D7957/D7957M-26	Standard Specification for GFRP Bars for Concrete Reinforcement	مشخصات محصول	ویرایش جاری (۲۰۲۶)، جایگزین ویرایش ۲۰۲۵؛ میلگرد ساده، هیبرید، غیردایره‌ای و شبکه‌ها خارج از دامنه
ASTM D7957/D7957M-22	Solid Round GFRP Bars for Concrete Reinforcement	مشخصات محصول	ویرایش ارجاع‌شده در ACI CODE-440.11-22
ASTM D8505/D8505M-25	Basalt and Glass FRP Bars for Concrete Reinforcement	مشخصات محصول	میلگردهای با مدول بالاتر؛ BFRP
ACI CODE-440.11-22	Building Code Requirements for Structural Concrete Reinforced with GFRP Bars	آیین‌نامه طراحی	رزین وینیل‌استر، ASTM D7957-22؛ بدون درجه آتش؛ بدون فصل لرزه‌ای ۱۸
ACI 440.1R-15	Guide for Design and Construction with FRP Bars	راهنمای طراحی	مبنای روابط این کاتالوگ
ACI 440.5-22	Construction Specification for GFRP Bars	مشخصات اجرا	حمل، انبارش، نصب، بازرسی
ACI 440.3R-12	Guide Test Methods for FRPs	روش‌های آزمون	مرجع آزمون قلیایی B.6 و دیگر روش‌ها
CSA S806-12 (R2021) / S807-19	طراحی ساختمان با FRP / مشخصات FRP	کانادا	ارجاع‌شده در تأیید فنی
ISO 10406-1:2015	FRP Reinforcement of Concrete — Test Methods — Part 1	روش‌های آزمون	روش‌های بین‌المللی آزمون میلگرد
ICC-ES AC454	Acceptance Criteria for FRP Bars	معیار پذیرش	ارجاع‌شده در تأیید فنی
نشریه گ-۱۰۲۰	راهنمای استفاده از میلگرد FRP در سازه‌های بتنی	راهنمای ملی	مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
ASTM D7205 / D7617 / D7913 / D7914 / D7705 / D570 / D2584 / D3171 / E1356 / E2160	روش‌های آزمون	روش آزمون	جدول A36

ویرایش جدید ≠ ویرایش ارجاعی

ACI CODE-440.11-22 به ASTM D7957-22 ارجاع می‌دهد، نه ویرایش ۲۰۲۶. جایگزینی خودکار نسخه جدید در یک آیین‌نامه قدیمی مجاز نیست؛ در صورت اختلاف، تصمیم با مهندس طراح و مرجع قانونی پروژه است.

آزمون ≠ انطباق

گزارش آزمون نشان می‌دهد یک نمونه چه عددی داده است. «گواهی انطباق» نشان می‌دهد محصول به‌طور سیستماتیک الزامات یک استاندارد را برآورده می‌کند و توسط نهاد مستقل صادر می‌شود. این دو هم‌ارز نیستند.

A38

دیتاشیت مادر محصول

این صفحه خلاصه یکپارچه مشخصات است و با دیتاشیت DS-01 یکسان است. حداقل‌ها مقادیر تضمین‌شده برای طراحی و پذیرش‌اند. نسخه قابل ویرایش و دیتاشیت‌های تفکیکی DS-02 تا DS-10 جداگانه ارائه می‌شود.

مشخصات عمومی

ویژگی	مقدار
نام محصول	میلگرد کامپوزیتی GFRP اپوراد
سازنده / عرضه	اپوراد / نابک کامپوزیت
الیاف	شیشه نوع E (E-Glass)، روونگ پیوسته طولی
رزین	اپوکسی
نوع سطح	آجدار با آج پیچشی
روش تولید	پولتروژن
چگالی	۲٫۰ g/cm³
محتوای الیاف	≥ ۷۵ ٪ جرمی
T_g	≥ ۱۱۲ °C
درجه پخت	≥ ۹۵ ٪
جذب رطوبت	≤ ۰٫۲۵ ٪ (نوعی ۰٫۰۶ ٪)
مدول کششی	≥ ۴۴٫۸ GPa (نوعی ۵۰ GPa)
کرنش نهایی	≥ ۱٫۱ ٪ (نوعی ۲٫۱ ٪)
برش عرضی	≥ ۱۵۰ MPa
پیوستگی	≥ ۸ MPa (نوعی بیش از ۱۵ MPa)
مقاومت قلیایی	≥ ۸۵ ٪ حفظ نیرو

هندسه و کشش به تفکیک قطر

d mm	A mm²	وزن g/m	f_{fu}* MPa	F_u* kN
۳	۷٫۱	۱۸	۷۵۰	۵٫۳
۴	۱۲٫۶	۲۵	۷۵۰	۹٫۴
۵	۱۹٫۶	۳۶	۷۵۰	۱۴٫۷
۶	۲۸٫۳	۵۲	۷۵۰	۲۱٫۲
۷	۳۸٫۵	۷۳	۷۵۰	۲۸٫۹
۸	۵۰٫۳	۹۵	۷۵۰	۳۷٫۷
۱۰	۷۸٫۵	۱۵۷	۷۵۰	۵۸٫۹
۱۲	۱۱۳٫۱	۲۰۰	۶۵۰	۷۳٫۵
۱۴	۱۵۳٫۹	۳۰۰	۶۵۰	۱۰۰٫۱
۱۶	۲۰۱٫۱	۴۰۰	۶۰۰	۱۲۰٫۶
۱۸	۲۵۴٫۵	۵۰۰	۶۰۰	۱۵۲٫۷
۲۰	۳۱۴٫۲	۶۰۰	۶۰۰	۱۸۸٫۵

f_{fu}* حداقل مقاومت تضمین‌شده؛ F_u* حداقل نیرو بر پایه سطح مقطع اسمی.

اطلاعات سفارش

مورد	مشخصات
طول شاخه	شاخه ۶ و ۱۲ متر یا برش سفارشی در کارخانه
کلاف	قطرهای ۳ تا ۱۰ میلی‌متر به‌صورت کلاف (طول سفارشی)
خم و خاموت کارخانه‌ای	طبق نقشه خم؛ ≥ ۶۰ ٪ نیروی بخش مستقیم
بسته‌بندی	بندیل تسمه‌کشی‌شده با برچسب قطر و شماره بچ؛ کلاف بسته‌بندی‌شده

مدارک همراه

گزارش آزمون بچ، تصویر تأیید فنی و گواهی‌های کیفیت سازنده همراه پیش‌فاکتور یا محموله از طریق نابک کامپوزیت ارائه می‌شود.

A39

پرسش‌های متداول

آیا میلگرد GFRP می‌تواند جایگزین میلگرد فولادی شود؟

در برخی سازه‌ها و با طراحی مستقل، بله؛ اما جایگزینی مستقیم و عمومی نه. مدول کمتر، نبود تسلیم و رفتار در حریق باعث می‌شود طرح GFRP با طرح فولادی متفاوت باشد. در ساختمان‌ها، تأیید فنی معتبر و محدوده ارتفاع مجاز نیز باید رعایت شود.

مقاومت GFRP بیشتر از فولاد است؛ پس قطر کمتری لازم است؟

نه لزوماً. مقاومت نهایی بیشتر است، اما مدول حدود یک‌چهارم است و طراحی معمولاً با خیز، ترک و حد گسیختگی خزشی کنترل می‌شود. سطح مقطع موردنیاز از محاسبه به دست می‌آید.

طول مهاری و وصله چقدر است؟

به مقاومت بتن، پوشش، فاصله، تنش طراحی و پیوستگی محصول بستگی دارد و در نقشه طراح تعیین می‌شود. طبق تأیید فنی، طول وصله کششی $1.3\ell_d$ است.

وزن هر متر چقدر است؟

جرم میلگرد GFRP حدود یک‌چهارم فولاد هم‌قطر است. وزن هر قطر در جدول A10-1 آمده است؛ مثلاً قطر ۱۰ میلی‌متر ۱۵۷ و قطر ۲۰ میلی‌متر ۶۰۰ گرم بر متر.

آیا میلگرد GFRP را می‌توان در کارگاه خم کرد یا جوش داد؟

خیر. خم فقط کارخانه‌ای و پیش از پخت تولید می‌شود؛ گرم کردن، خم سرد و جوشکاری الیاف و رزین را تخریب می‌کند.

چگونه برش داده می‌شود؟

با اره یا دیسک الماسه یا کاربید، همراه با تجهیزات حفاظت فردی و کنترل گردوغبار.

عمر مفید آن چقدر است؟

عمر مفید ویژگی سازه است و از طراحی دوام پروژه به دست می‌آید. GFRP خوردگی الکتروشیمیایی ندارد، اما دوام آن به رزین، دما، رطوبت و تنش پایدار وابسته است.

در حریق چه رفتاری دارد؟

با نزدیک شدن دما به T_g، پیوستگی و مقاومت افت می‌کند. ACI CODE-440.11 فقط برای سازه‌های بدون الزام درجه آتش کاربرد دارد.

برای فونداسیون ساختمان مسکونی مناسب است؟

طبق تأیید فنی ۱۴۰۲، استفاده سازه‌ای در ساختمان‌های حداکثر سه طبقه یا ۱۲ متر مجاز شده است؛ با طراحی مهندس سازه و تأیید مرجع پروانه.

قیمت آن چقدر است؟

قیمت به قطر، مقدار، طول، خم‌ها و شرایط تحویل بستگی دارد. برای استعلام، فرم صفحه ۶ کاتالوگ B یا فرم DS-10 را تکمیل کنید.

A40

منابع و اطلاعات تماس

منابع

1. ASTM D7957/D7957M-26, Standard Specification for GFRP Bars for Concrete Reinforcement, ASTM International, 2026.
2. ASTM D7957/D7957M-22, Standard Specification for Solid Round GFRP Bars for Concrete Reinforcement, 2022.
3. ACI CODE-440.11-22, Building Code Requirements for Structural Concrete Reinforced with GFRP Bars—Code and Commentary, ACI, 2022.
4. ACI 440.1R-15, Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars, ACI, 2015.
5. ACI 440.5-22, Construction Specification for GFRP Reinforcing Bars, ACI, 2022.
6. ACI 440.3R-12, Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers, ACI, 2012.
7. ACI MNL-6(23), GFRP Reinforcement Manual, ACI, 2023.
8. CSA S806-12 (R2021); CSA S807-19, CSA Group.
9. ISO 10406-1:2015, FRP Reinforcement of Concrete — Test Methods.
10. AASHTO LRFD Bridge Design Guide Specifications for GFRP-Reinforced Concrete, 2nd ed., 2018.
11. ASTM D7205, D7617, D7913, D7914, D7705, D7337, D570, D2584, D3171, E1356, E2160 (آخرین ویرایش‌ها).
12. مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تأیید فنی شماره ۰۲-۲۵-۲۱۱۷۳، «میلگرد کامپوزیتی GFRP برای استفاده در اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای بتنی»، ۱۴۰۲/۱۰/۲۰.
13. مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، نشریه گ-۱۰۲۰، راهنمای استفاده از میلگرد FRP در سازه‌های بتنی.
14. جدول مشخصات فنی و کاتالوگ میلگرد کامپوزیتی اپوراد (شرکت شاهکار فکر توانا).

ناباک کامپوزیت

NABAK COMPOSITE

دفتر مرکزی:

۰۲۱-۴۸۸۱۲۱۲۴

موبایل:

۰۹۱۲۳۹۶۳۰۷۸

مسئول تماس: آقای اقبالی

وب‌سایت: nabakcomposite.com

دریافت دیتاشیت‌های اختصاصی

دیتاشیت‌های DS-01 تا DS-10 و دیتاشیت هر قطر پس از تأیید داده‌های کارخانه قابل ارائه است.

استعلام پروژه

برای استعلام قیمت و زمان تحویل، فرم مشخصات فنی خرید (DS-10) را همراه نقشه آرماتوربندی یا جدول مقادیر ارسال کنید.

اعلامیه

مطالب این کاتالوگ برای آگاهی فنی تهیه شده و ممکن است بدون اطلاع قبلی به‌روز شود. مسئولیت طراحی، انتخاب و تأیید مصالح با مهندس طراح و مراجع قانونی پروژه است.