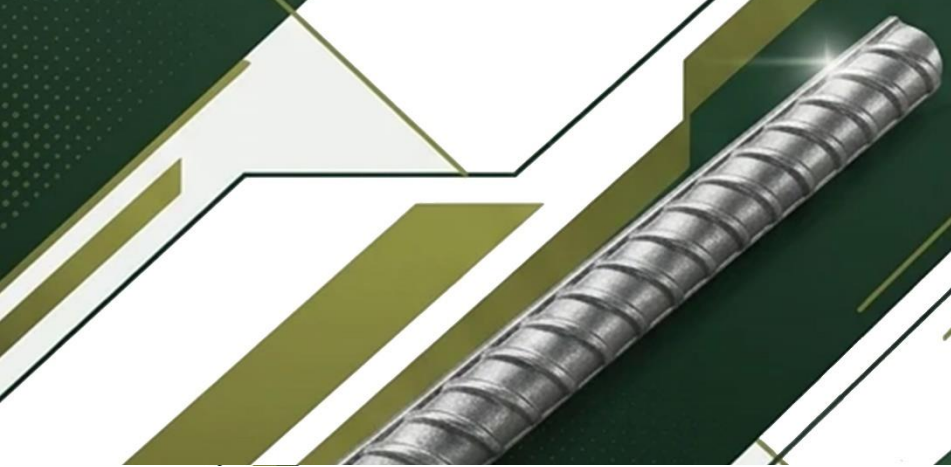
اعتبار گستر خاور مهر
(با مسئولیت محدود)

دایره المعارف جامع میلگرد

میلگرد آج‌دار RIBBED STEEL REBAR





مقدمه: چرا بتن بدون فولاد دوام نمی‌آورد؟

اگر به سازه‌های عظیم امروزی—از برج‌های بلندمرتبه و پل‌های طره‌ای گرفته تا فونداسیون‌های عمیق و تونل‌ها—نگاه کنیم، همگی بر یک اتحاد مهندسی استوارند: **بتن و فولاد**.

بتن ماده‌ای سنگی، صلب و فوق‌العاده مقاوم در برابر فشارهای خردکننده است؛ اما نقطه ضعف تاریخی آن، «شکنندگی در برابر کشش» است. یک تیر بتنی ساده تحت بار، به‌سرعت در لایه‌های زیرین خود دچار کشش شده و با کمترین نیرو ترک می‌خورد و فرو می‌ریزد. اینجاست که **میلگرد (Rebar)** وارد میدان می‌شود. میلگرد نه‌تنها تنش‌های کششی ناشی از خمش، برش و پیچش را جذب می‌کند، بلکه به بتن اجازه می‌دهد رفتار «شکل‌پذیر» (Ductile) داشته باشد؛ یعنی سازه پیش از فروریختن، با ایجاد تغییرشکل و هشدارهای بصری، انرژی زلزله یا بارهای سنگین را مستهلک سازد.

در این مقاله مرجع، قصد داریم میلگرد را از ذوب در کوره تا جانمایی در بتن، با زبانی فنی، کاربردی و دقیق موشکافی کنیم.

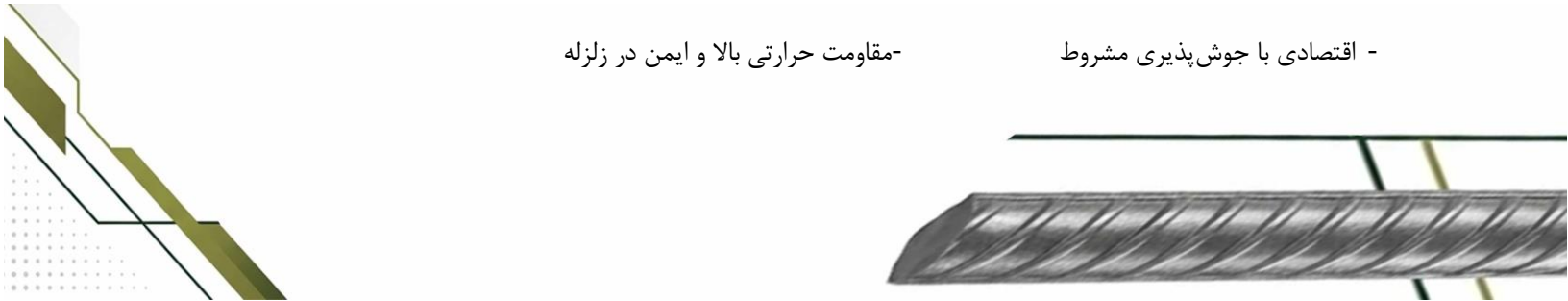
---

۱. متالورژی و شیوه‌های تولید میلگرد: پشت پرده خواص فولاد

کیفیت یک شاخه میلگرد پیش از آنکه به دست مهندس ناظر برسد، در کارخانه و در چیدمان اتم‌های آهن و کربن تعیین می‌شود. دو روش اصلی برای تولید میلگردهای ساختمانی در سراسر جهان و ایران وجود دارد که تفاوت‌های بنیادینی در رفتار سازه‌ای آنها ایجاد می‌کند:

content_copy text

```
+-------------------------------------------------------------------+
|شیوه‌های نوین تولید میلگرد                                         |
+-------------------------------------------------------------------+
|                                |
v                                v
] روش ترمکس]                    [(QST) روش میکروآلیاژی[
- سرد کردن سریع سطح با آب پاش پرفشار    -افزودن وانادیوم، نیوبیوم و تیتانیوم
- پوسته: مارتنزیت سخت و مقاوم           -ساختار یکنواخت فریت-پرلیت در کل مقطع
- مغز: فریت-پرلیت نرم و شکل‌پذیر        -شکل‌پذیری عالی و مقاومت یکپارچه
- اقتصادی با جوش‌پذیری مشروط            -مقاومت حرارتی بالا و ایمن در زلزله
```



روش ترمکس (Thermex / QST)

در فناوری ترمکس، میلگرد پس از خروج از آخرین غلتک‌های نورد گرم (در دمای حدود ۱۰۰۰ درجه)، بلافاصله وارد تونل‌های آب‌پاش پرفشار می‌شود. این شوک حرارتی ناگهانی، لایه بیرونی میلگرد را منجمد کرده و فازی بسیار سخت به نام «مارتنزیت» می‌سازد. سپس با خروج از آب، حرارت بالای مغز میلگرد به سطح بازمی‌گردد و آن لایه سخت بیرونی را پخته و چقرمه می‌کند (تِمپِرد مارتنزیت)، درحالی‌که مغز میلگرد نرم و شکل‌پذیر باقی می‌ماند.

- **مزیت بزرگ:** دستیابی به مقاومت بالا با کربن کمتر و هزینه تولید اقتصادی‌تر.
- **چالش:** اگر در کارگاه به این میلگردها حرارت مستقیم یا جوشکاری کنترل‌نشده اعمال شود، ساختار سطحی بازپخت‌شده شکسته شده و مقاومت مقطع افت ناگهانی پیدا می‌کند.

روش میکروآلیاژی (Micro-Alloyed)

در این روش، به جای شوک آب، عناصری نظیر وانادیوم (V)، نیوبیوم (Nb) یا تیتانیوم (Ti) به مذاب اضافه می‌شود. این عناصر ریزدانگی کل ساختار فلز را رقم می‌زنند.

- **مزیت بزرگ:** خواص مکانیکی میلگرد در تمام عمق مقطع (از سطح تا مغز) کاملاً یکدست است. این میلگردها برای مناطق با لرزه‌خیزی بسیار بالا و سازه‌هایی که نیاز به خم‌کاری‌های خاص و جوشکاری دارند، بالاترین ضریب اطمینان را ارائه می‌دهند.

---

۲. رده‌بندی میلگردها در ایران و جهان: فراتر از نام‌های A1 تا A4

در ادبیات بازار آهن و کارگاه‌های ساختمانی ایران، هنوز از اصطلاحات استاندارد قدیمی روسیه (GOST 5781) یعنی A1 تا A4 استفاده می‌شود، اما استاندارد رسمی ملی ایران **ISIRI 3132** دسته‌بندی دقیق‌تری دارد:

content_copy

رده بازاری (روسی)	علامت استاندارد ملی (ISIRI 3132)	مشخصات ظاهری آج	مقاومت تسلیم اسمی (f_y)	مقاومت کششی (f_u)	کاربرد و ملاحظات کارگاهی
A1	**س ۲۴۰**	کاملاً صاف (فاقد آج)	۲۴۰ مگاپاسکال	۳۶۰ مگاپاسکال	استفاده در آهنگری، قطعات تزیینی، داکت‌ها و شناژهای فرعی؛ اتصال برشی مناسب با بتن ندارد.

رده بازاری (روسی)	علامت استاندارد ملی (ISIRI 3132)	مشخصات ظاهری آج	مقاومت تسلیم اسمی (f_y)	مقاومت کششی (f_u)	کاربرد و ملاحظات کارگاهی
A2	**آج ۳۴۰**	آج مارپیچ و یکنواخت (فنر مانند)	۳۴۰ مگاپاسکال	۵۰۰ مگاپاسکال	پرکاربردترین مقطع برای خاموت‌ها، دورگیرها و کمرکش دیوارها؛ شکل‌پذیری بهتر نسبت به A3.
A3	**آج ۴۰۰**	آج جناغی (هفت و هشتی)	۴۰۰ مگاپاسکال	۶۰۰ مگاپاسکال	اسکلت اصلی ساختمان (تیرها و ستون‌ها)؛ تردتر از A2 و جوشکاری آن عموماً مجاز نیست.
A4	**آج ۵۰۰ و ۵۲۰**	آج مرکب یا دوکی‌شکل متقاطع	۵۰۰ و ۵۲۰ مگاپاسکال	۶۵۰ تا ۷۰۰ مگاپاسکال	استفاده در سازه‌های سنگین برای کاهش تراکم میلگرد در گره‌های اتصال؛ نیازمند طراحی لرزه‌ای ویژه.

نکته طلایی برای مهندسان: استفاده از میلگرد A3 به جای A2 به عنوان خاموت در مناطق لرزه‌خیز می‌تواند خطرآفرین باشد! خاموت‌ها باید بتوانند هنگام زلزله تغییرشکلهای پلاستیک را بدون شکست ترد تحمل کنند، در حالی که انعطاف‌پذیری A2 بالاتر است.

---

۳. مکانیک گیرداری و اندرکنش بتن و میلگرد (Bond Behavior)

این تصور که بتن به میلگرد می‌چسبد، تنها بخشی از واقعیت است. نیروی پیوند (Bond) حاصل سه پدیده همزمان است:

۱. **چسبندگی شیمیایی اولیه:** چسبیدن ژل هیدراته سیمان به سطح فولاد که در تنش‌های کششی بسیار اندک کنده می‌شود.

۲. **اصطکاک سطحی:** مالش فیزیکی سطح میکروسکوپی فولاد با سنگدانه‌های ریز بتن.

۳. **قفل‌وبست مکانیکی آج‌ها (بیش از ۸۰٪ مقاومت):** برجستگی‌های آج مانند تکیه‌گاه‌های کوچکی عمل می‌کنند که با فشردن بتن جلوی خود، نیروی کشش میلگرد را به توده بتن منتقل می‌نمایند.

content_copy text

نیروی کشش میلگرد<---

==========

) / / / / / آج‌های میلگرد(

==========

^ ^ ^ ^ ^

| | | | |

فشارهای شعاعی ناشی از لغزش زاویه‌دار آج بر بتن

اگر پوشش (کاور) بتن کافی نباشد یا خاموت‌ها به اندازه کافی متراکم نباشند، همین فشار گوه‌ای آج‌ها باعث ترک‌خوردگی طولی و پریدن کاور بتن (Spalling) می‌شود.

---

۴. چالش‌های کارگاهی و دیتایل‌های اجرایی: رازهای پنهان در کارگاه

۴.۱. خم‌کاری و خطرات پنهان میکروترک‌ها

خم کردن میلگرد، عملیاتی ساده نیست. وقتی میلگردی خم می‌شود، لایه خارجی تحت کشش فوق‌العاده و لایه داخلی تحت فشار شدید قرار می‌گیرد.

- **اشتباه رایج کارگاهی:** خم کردن میلگرد با لوله گاز یا چکش‌کاری روی گوشه‌های تیز!
- **الزام استاندارد:** خم‌کاری باید حتماً توسط دستگاه مکانیکی و به دور «فلکه خمشی» (Mandrel) با قطر استاندارد انجام گیرد. خم تند باعث ایجاد ریزترک در ریشه آج‌ها می‌شود که در بارگذاری اولیه سازه منشأ شکست ناگهانی خواهد بود.

۴.۲. روش‌های اتصال و وصله میلگرد: اورلپ، کوپلر یا فورجینگ؟

با افزایش ابعاد سازه‌ها، روش‌های اتصال میلگردها اهمیت اقتصادی و مهندسی بالایی یافته‌اند:

content_copy text

]روش‌های اتصال میلگرد[

├— ۱ .هم‌پوشانی) اورلپ :(Lap Splice / سنتی، ایجاد تراکم شدید آرماتور، اتلاف بالای فولاد

├— ۲ .وصله مکانیکی) کوپلر :(Mechanical Coupler / انتقال محوری مستقیم، رفع تراکم در ستون‌ها، بسیار ایمن

└— ۳ .جوش فورجینگ سر به سر :(Gas Pressure Welding) بدون قطعه اضافی، نیازمند اپراتور ماهر و کنترل کیفی

۱. **وصله هم‌پوشانی (Lap Splice)**:ساده‌ترین روش است، اما در میلگردهای قطور (بالای سایز ۲۵ و طبق قانون بالای ۳۶) اتلاف تناژ میلگرد سرسام‌آور بوده و تراکم آرماتور در محل ستون‌ها مانع عبور سنگدانه‌های بتن و ایجاد حفره‌های کرمو می‌شود.

۲. **وصله مکانیکی (کوپلر)**:دو سر میلگرد رزوه شده و با یک غلاف فولادی به هم متصل می‌شوند. در این روش، بار مستقیماً و در یک امتداد منتقل شده و تا ۱۵ الی ۲۰ درصد در وزن فولاد مصرفی پروژه‌های بلندمرتبه صرفه‌جویی می‌شود.

۳. **جوش سر به سر فشاری (فورجینگ)**:دو سر میلگرد با شعله اکسی‌استیلن تا دمای خمیری داغ شده و تحت فشار هیدرولیک به هم جوش می‌خورند. این روش پرت میلگرد را به صفر می‌رساند، اما به شدت به مهارت جوشکار و تمیز بودن مقطع برش‌خورده وابسته است.

---

۵. میلگرد در سازه‌های خاص: قفسه شمع‌ها و سیستم‌های ژئوتکنیک

در پروژه‌های عمرانی سنگین و به‌ویژه در حوزه پایدارسازی گود و پی‌سازی عمیق، میلگردها شرایط عملکردی کاملاً متفاوتی دارند:

قفسه آرماتور شمع‌های درجا (Pile Cages)

در اجرای شمع‌های بتنی عمیق:

- قفسه‌های آرماتور طولی تا ارتفاع‌های ۳۰ متری در کارگاه بافته می‌شوند. این قفسه‌ها هنگام لیفتینگ و بلند شدن با تاورکرین یا جرثقیل سنگین، تحت لنگرهای واژگونی خم می‌شوند؛ از این رو استفاده از **اسپیرال‌های تقویت صلب و دوبل** حیاتی است.
- **فاصله آزاد بین میلگردها:** از آنجا که بتن‌ریزی شمع با لوله ترمی و در عمق آب یا گل بنتونیت انجام می‌شود، بتن باید بدون ویبره زدن بتواند از میان میلگردها عبور کند. اگر فاصله آزاد میلگردها کمتر از ۱۰ سانتی‌متر باشد، بتن پشت میلگرد گیر کرده و پدیده فاجعه‌بار جدایش و پوکی شمع رخ می‌دهد.

نیلینگ و انکراژ (Anchors & Soil Nailing)

در دیواره‌های گودبرداری، میلگردهای آلیاژی با مقاومت بالا درون لوله‌های تزریق دوغاب قرار می‌گیرند. در اینجا کنترل تنش تسلیم و مقاومت در برابر پدیده خزش خاک، متغیرهای تعیین‌کننده پایداری ترانشه هستند.

---

۶. خوردگی؛ دشمن خاموش سازه‌های بتن آرمه



یکی از بزرگ‌ترین دلایل کاهش عمر مفید سازه‌ها، زنگ‌زدگی آرماتورهاست. آهن در واکنش با آب و اکسیژن زنگ می‌زند و محصول این زنگ‌زدگی حجمی **تا ۶ برابر فولاد اولیه** دارد! این ازدیاد حجم، فشاری بالغ بر صدها کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع به بتن وارد کرده و آن را از داخل متلاشی می‌کند.

content_copy text

نفوذ یون‌های کلرید / دیاکسید کربن

↓

شکسته شدن لایه محافظ اکسیدی روی میلگرد

↓

اکسیداسیون آهن و تشکیل زنگ آهن هیدراته

↓

افزایش حجم ۶ برابری زنگ آهن در داخل منافذ

↓

ایجاد ترک‌های طولی در بتن و ریزش نهایی کاور

روش‌های نوین مقابله با خوردگی:

- **میلگردهای با روکش اپوکسی (Epoxy-Coated)**: لایه پلیمری سبزرنگی که میلگرد را عایق می‌کند (بسیار آسیب‌پذیر در حین بارگیری و تخلیه).
- **میلگردهای گالوانیزه:** غوطه‌ور در مذاب روی؛ مناسب برای مناطق با رطوبت بالا.
- **میلگردهای پلیمری تقویت‌شده با الیاف (FRP/GFRP)**: میلگردهای کامپوزیتی بدون ذره‌ای آهن که دچار هیچ نوع خوردگی نمی‌شوند، اما به دلیل عدم شکل‌پذیری تسلیم و ضعف در آتش‌سوزی، تنها در کاربردهای خاص (عرشه پل‌ها و اسکله‌ها) کاربرد دارند.

---

۷. چک‌لیست کاربردی بازرسی، کنترل کیفیت و آزمایشگاهی (QC)

برای مهندسان ناظر، مجریان و خریداران آهن‌آلات، تایید سلامت محموله ورودی به کارگاه شامل مراحل زیر است:

content_copy text

]مراحل بازرسی کارگاهی میلگرد[



۱ .بررسی پلاک و بندیل: تطابق شماره ذوب (Heat Number) با شناسنامه کارخانه

۲ .بررسی چشمی: رنگ زنگ‌زدگی (زرد/نارنجی سطحی مجاز است؛ ورقه‌ای و پوسته پوسته مردود)

۳ .کنترل تلورانس وزنی: وزن کردن دقیق قطعه یک متری و مقایسه با جدول استاندارد اشتال

۴ .آزمون‌های مخرب آزمایشگاهی:

الف) آزمون کشش: ثبت تنش تسلیم، تنش نهایی و درصد افزایش طول

ب) آزمون خمش و باز کردن خم (Re-bend): کنترل عدم تردی و نبود ترک در ریشه آج

قانون مهم در تفکیک زنگ‌زدگی سطحی و زنگ خطرناک:

زنگ‌زدگی گردی و نارنجی‌رنگ سطحی ناشی از رطوبت چند روزه باران، به هیچ وجه خطرناک نیست و اتفاقاً زبری سطح را برای گیرداری بهتر با بتن افزایش می‌دهد. اما اگر زنگ به رنگ قهوه‌ای تیره یا سیاه درآمده و با ناخن یا چکش به صورت پولک و لایه‌لایه جدا شود، به معنای کاهش سطح مقطع مفید میلگرد بوده و محموله باید بلافاصله از کارگاه خارج گردد.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری اجرایی

میلگرد صرفاً یک متریال ساده ساختمانی نیست؛ شاه‌رگ حیاتی سازه‌های بتنی است. از انتخاب نوع فرآیند تولید (ترمکس در برابر میکروآلیاژی) گرفته تا دقت در نقشه‌های خم‌کاری، فواصل آزاد برای عبور روان بتن، نوع وصله‌ها و در نظر گرفتن تدابیر ضدخوردگی در مناطق مهاجم، همگی زنجیره‌ای از تصمیمات مهندسی هستند. شناخت دقیق این مشخصات فنی به کارفرمایان و مهندسان اجازه می‌دهد علاوه بر بهینه‌سازی اقتصادی و کاهش ضایعات فولاد، ایمنی پایدار سازه را در طول دوره بهره‌برداری و در مواجهه با زمین‌لرزه‌ها تضمین نمایند.



تهران، بلوار میرداماد، جنب مترو میرداماد، خیابان کازرون جنوبی، کوچه رامین پلاک ۴ واحد ۲۰

تهران، دریاچه چیتگر، روبروی ورودی بام لند، برج لکسون، طبقه۱۸، واحد ۵

۰۲۱-۳۱۹۴۷۰۰۰ holdingafra1 www.holdingafra.com

