

بسمه تعالی



دانشگاه شهید بهشتی
دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی

فصل چهارم: نمودارهای زمان-دما-دگرگونی

برگرفته از کتاب مبانی و کاربردهای عملیات حرارتی فولادها و چدن ها
(نوشته دکتر محمد علی گل‌عذار)

دکتر محمود سمیع زاده

m_sameezadeh@sbu.ac.ir

فصل چهارم - نمودارهای زمان-دما-دگرگونی

- عامل زمان یکی از مهم‌ترین عوامل اثرگذار در فرآیندهای عملیات حرارتی می‌باشد.
- اثرات زمان روی ساختار و خواص نهایی فولادها توسط **نمودارهای زمان-دما-دگرگونی** (Time-Temperature-Transformation Diagrams) که به نمودارهای **TTT** موسوم‌اند، مشخص می‌شود.

بر حسب این که دگرگونی آستنیت به ساختار یا فاز جدید در دمای ثابت (هم‌دما) و یا در ضمن سرد شدن پیوسته (در دماهای مختلف) انجام شود، نمودارهای TTT که استفاده می‌شوند، باید به ترتیب از نوع نمودارهای دگرگونی هم‌دما (IT)^۲ و دگرگونی در سرد شدن پیوسته (CT)^۳ باشند. نمودارهای دگرگونی در اثر سرد شدن پیوسته را به CCT^۴ نیز نشان می‌دهند.

۱-Time- Temperature- Transformation Diagrams

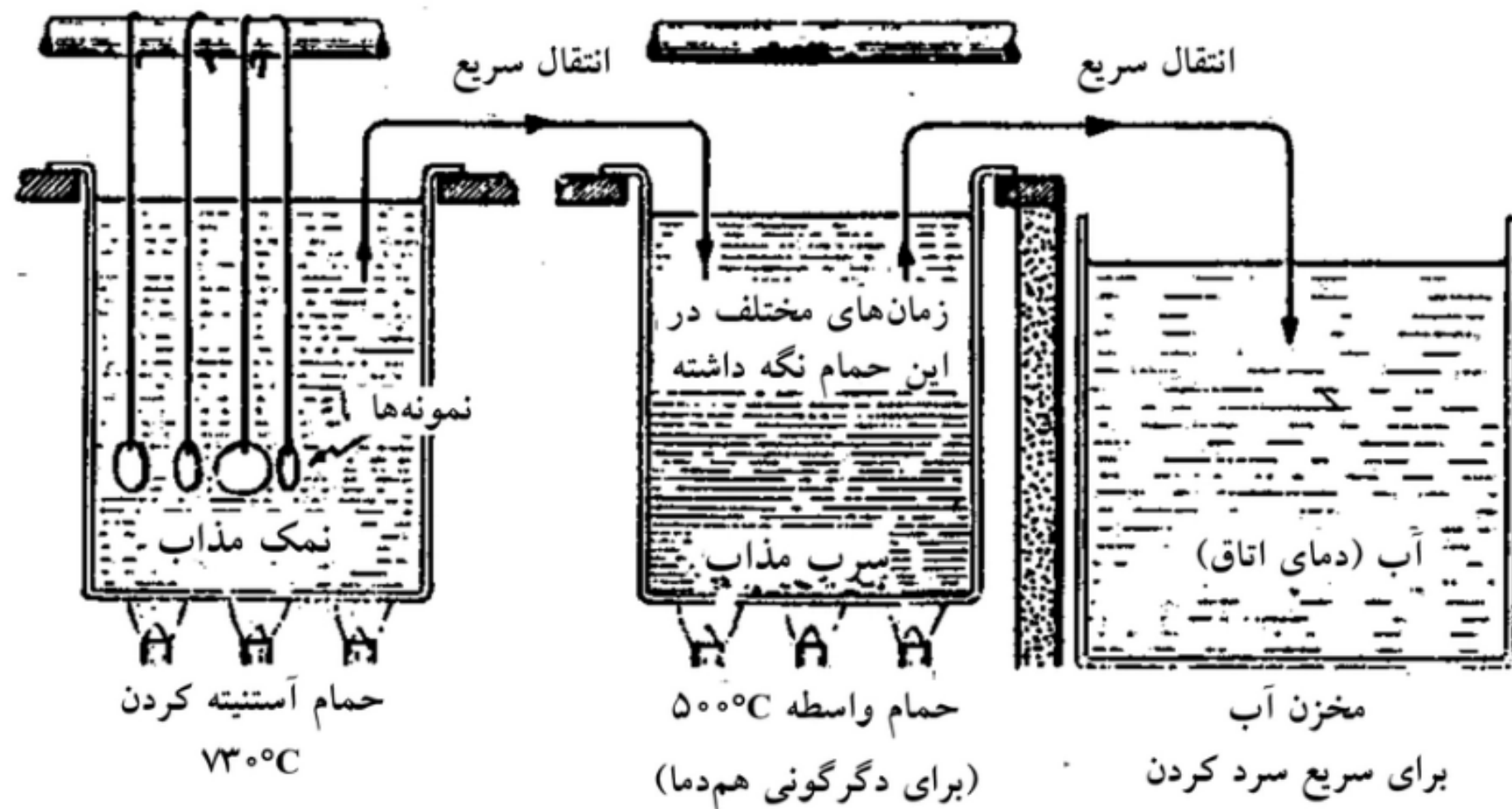
۲-Isothermal Transformation

۳-Continuous Transformation

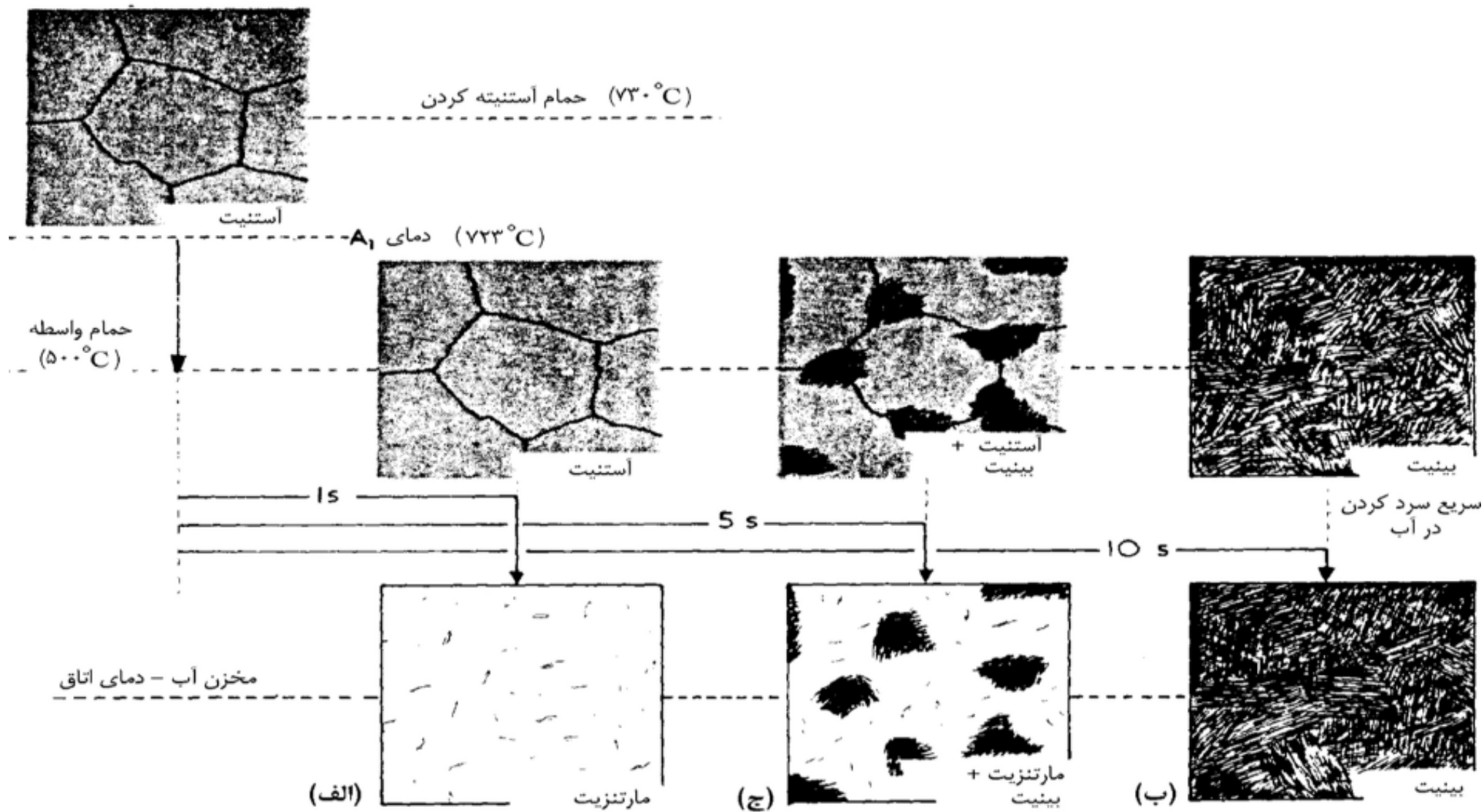
۴-Continuous Cooling Transformation Diagrams

نمودارهای دگرگونی هم‌دما (IT)

برای درک بهتر، نخست روش رسم نمودارهای IT برای فولادهای ساده کربنی یوتکتویدی بررسی می‌شود. به طور کلی، رسم این نمودارها با مطالعه ریزساختار، اندازه‌گیری سختی و یا اندازه‌گیری تغییر طول (روش دیلاتومتری^۱) یک سری نمونه متالوگرافی استاندارد که پس از آستنیت‌کردن کامل، مدت زمان‌های متفاوت در دماهای مختلف و بالاتر از دمای شروع تشکیل مارتنزیت (M_s) نگه داشته‌اند و سپس تا دمای اتاق سریع سرد شده باشند، امکان‌پذیر است. برای رسم کامل یک نمودار IT برای یک فولاد مشخص، بیشتر از صد نمونه لازم می‌باشد. روش کار به این ترتیب است که نمونه‌های متالوگرافی را در ناحیه تک‌فازی آستنیت برای مدت زمان کافی (به طور معمول یک ساعت) حرارت می‌دهند تا این که ساختار یکنواخت آستنیتی به دست آید. زمان و دمای آستنیت‌شدن، اندازه دانه‌های آستنیت و مقدار انحلال کاربیدها را در آستنیت مشخص می‌کنند. از آنجایی که هر دو عامل یادشده، دگرگونی آستنیت را تحت اثر قرار می‌دهند، لازم است، دما و زمان آستنیت‌شدن که برای رسم نمودار استفاده شده‌اند، بیان شوند. وقتی که آستنیت‌شدن به پایان رسید، یک سری از نمونه‌ها به دمای ثابت بین A_1 و M_s رسانده می‌شوند. نمونه‌ها در دمای ثابت برای مدت زمان‌های متفاوت، نگهداری و سپس تا دمای اتاق، سریع سرد می‌شوند. شکل ۴-۱، مراحل مختلف کار برای دگرگونی در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱ مراحل مختلف عملیات حرارتی برای رسم نمودارهای TTT [۳].



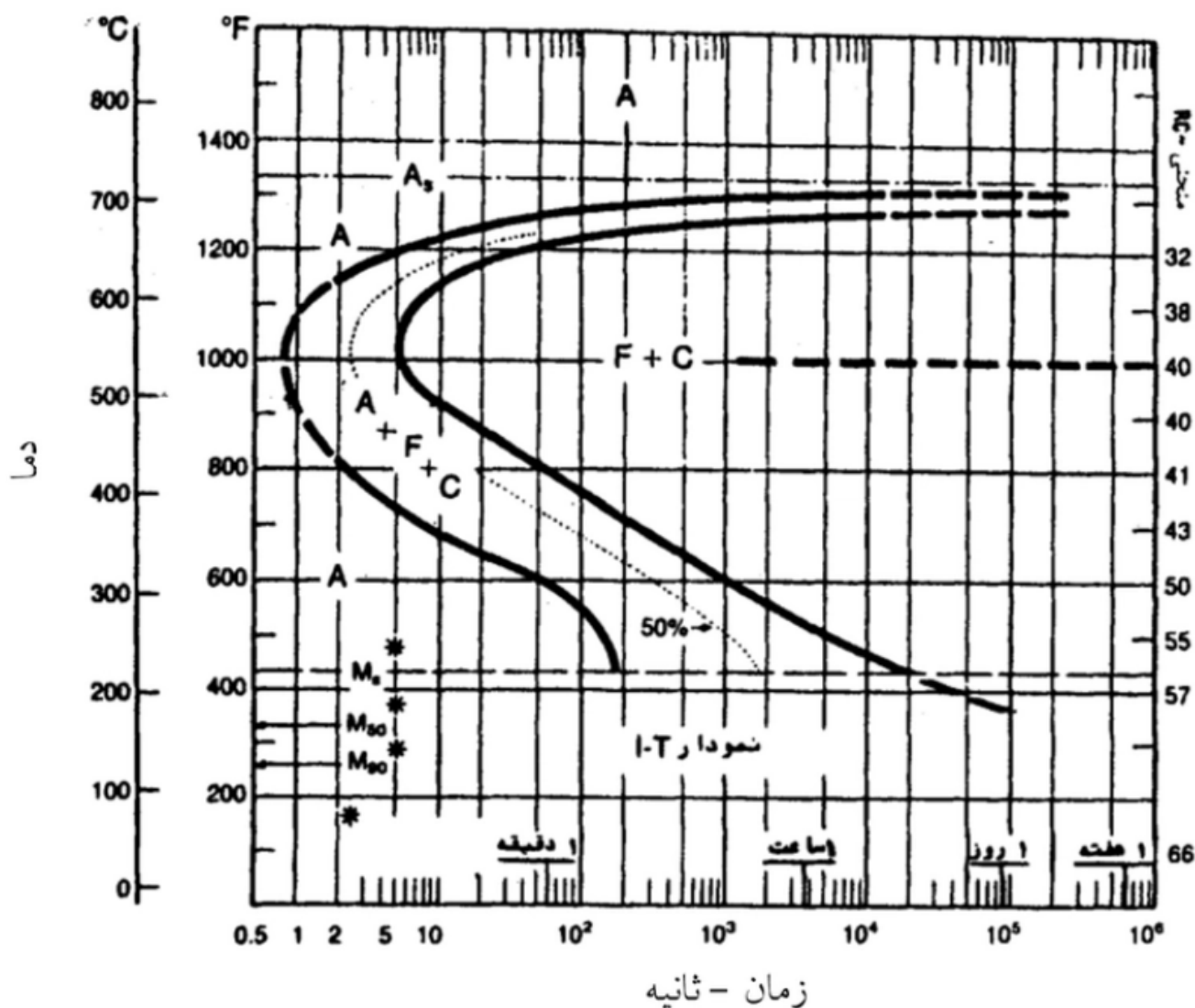
شکل ۲-۴ چگونگی پیشرفت دگرگونی آستنیت به بینیت در دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد [۳].

اگر زمان نگهداری نمونه‌ها در دمای ثابت (۵۰۰ درجه سانتی‌گراد در شکل ۴-۱) برای انجام دگرگونی نفوذی کافی نباشد، قطعه به طور کامل مارتنزیت می‌شود (شکل ۴-۲-الف)؛ زیرا در زمان شروع سریع سرد شدن، قطعه به طور کامل آستنیت بوده است. از طرف دیگر، در قطعه‌هایی که برای مدت زمان طولانی در همین دما نگه داشته شده‌اند، اثری از مارتنزیت دیده نمی‌شود (شکل ۴-۲-ب)؛ زیرا در زمان سریع سرد شدن، آستنیتی در قطعه وجود نداشته است.

ساختار نهایی نمونه‌ها بسته به **دمای دگرگونی هم‌دما و زمان نگهداری در آن دما**، می‌تواند پرلایت، بینیت، مارتنزیت و یا مخلوطی از آن‌ها باشد. نمونه‌ای که به مارتنزیت تبدیل شده است، و کمترین مقدار از سایر فازها را دارد (حدود یک درصد)، زمان شروع دگرگونی را در یک دمای ثابت مشخص می‌کند. با افزایش زمان نگهداری در دمای ثابت، درصد آستنیت باقی‌مانده که می‌تواند به مارتنزیت تبدیل شود، کاهش می‌یابد. نمونه‌ای که کمترین مقدار مارتنزیت را داشته باشد (حدود یک درصد)، زمان پایان این دگرگونی در این دمای ثابت را معین می‌کند.

به این ترتیب، زمان‌های لازم برای شروع و پایان دگرگونی هم‌دما در یک دمای ثابت (دو نقطه از نمودار IT) مشخص می‌شود. اگر به همین منوال، آزمون در دماهای ثابت دیگری بین M_s و A_1 (A_3 و A_{cm})، به ترتیب برای فولادهای هیپو و هایپریوتکتوئید انجام شود، نقاط شروع و پایان دگرگونی برای دماهای مختلف مشخص می‌شود و نمودار IT به دست می‌آید.

اندازه‌گیری و تعیین **سختی** نمونه‌ها نیز مشخص کننده فازهای موجود در ساختار آن‌ها است. در این رابطه، لیستی از فازها و ساختارهای مختلف در جهت افزایش سختی عبارتند از: **فریت**، **پرلیت**، **بینیت** و **مارتنزیت**.

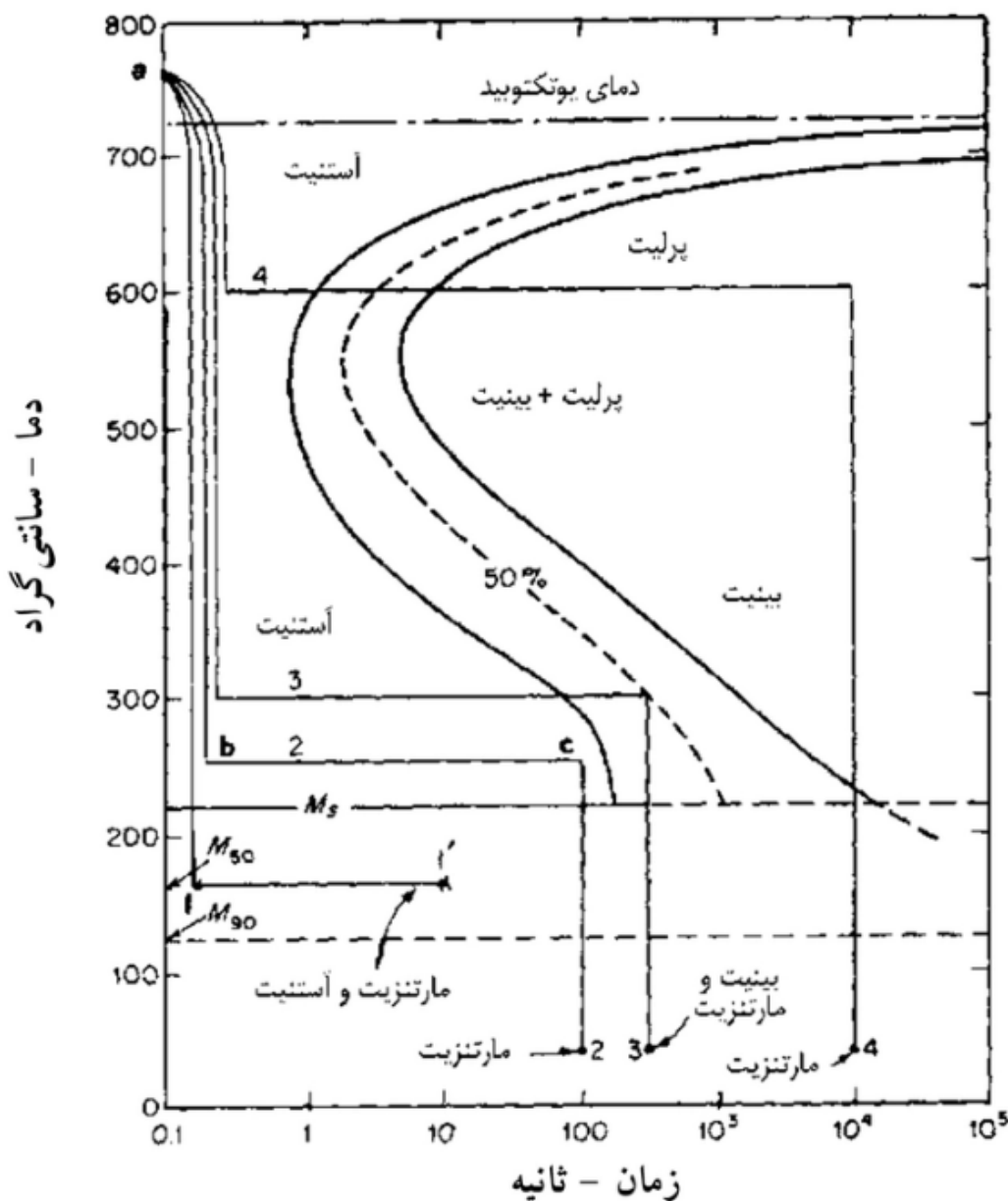


شکل ۳-۴ نمودار دگرگونی هم‌دما برای فولاد ۰.۸٪ C و ۰.۷۶٪ Mn است. نمونه‌ها در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد آستنیت شده و دارای عدد اندازه دانه شش بوده‌اند [۱].

اصول استفاده از نمودارهای دگرگونی هم‌دما

(برای فولاد ۱۰۸۰)

مسیر ۱: نمونه‌ای از دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد در ناحیه آستنیت تا دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد سریع سرد شده است و به مدت ۱۰ ثانیه در این دما نگه داشته می‌شود. نرخ سرد شدن آن قدر زیاد است که پرلیت و بینیت فرصت تشکیل را ندارند، پس فولاد تا دمای M_s بصورت آستنیت باقی خواهد ماند. از این دما تا ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد مارتنزیت بوجود می‌آید. از آنجایی که ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد دمایی است که فقط ۵۰ درصد آستنیت به مارتنزیت تبدیل می‌شود و تشکیل مارتنزیت مستقل از زمان است، بنابراین ساختار فولاد در نقطه ۱' مشابه با ۱ است و شامل ۵۰ درصد مارتنزیت و ۵۰ درصد آستنیت است. با گذشت زمان بین M_s و M_f تغییرات موضعی در درصد کربن رخ می‌دهد که وابسته به دماست.



شکل ۴-۴ مسیرهای اختیاری روی نمودار دگرگونی هم‌دما [۹].

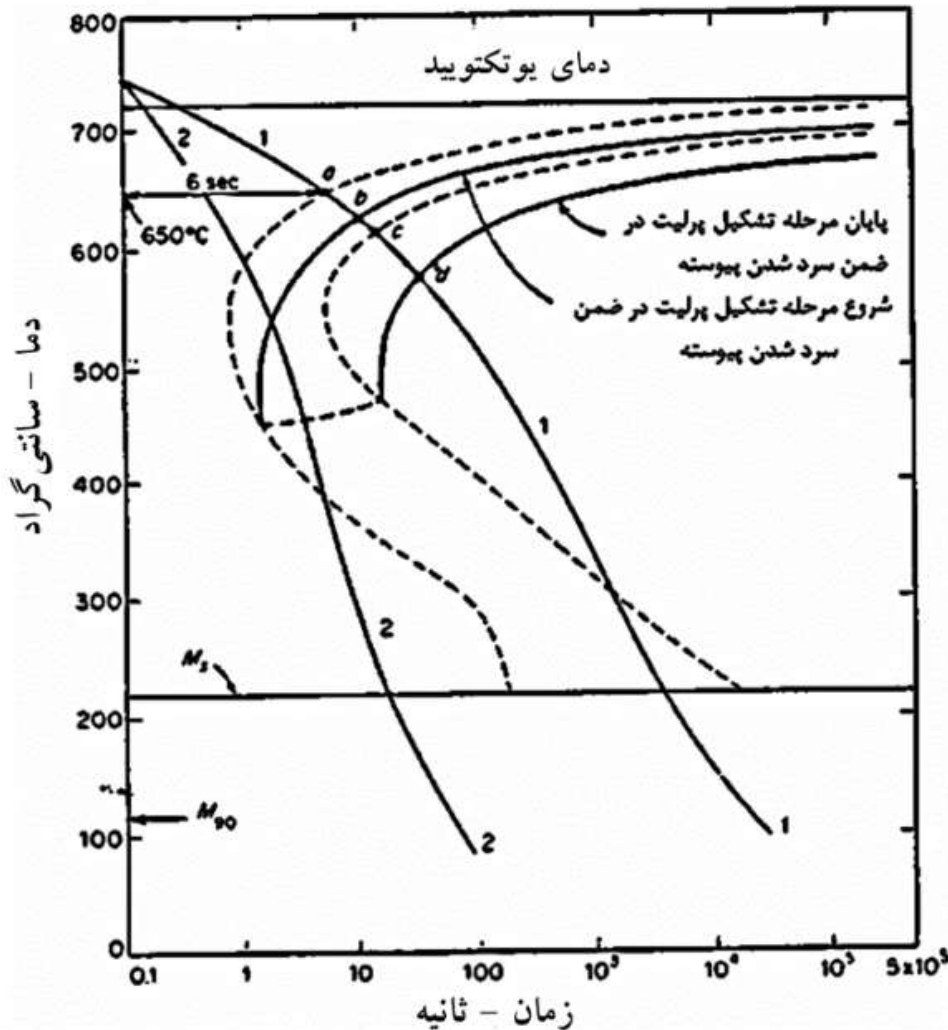
مسیر ۲ : نمونه از ناحیه آستنیت تا دمای ۲۵۰ درجه سانتی گراد سریع سرد می شود و در این دما به مدت ۱۰۰ ثانیه نگه داشته می شود و سپس سریع تا دمای اتاق سرد می شود. دمای ۲۵۰ درجه سانتی گراد، در بازه دمایی تشکیل **بینیت** است، ولی زمان ۱۰۰ ثانیه برای تشکیل بینیت کافی نیست، پس در نقطه C ساختار صد درصد آستنیت ناپایدار است. در سریع سرد شدن از ۲۵۰ درجه سانتی گراد تا دمای اتاق قطعه کاملاً مارتنزیتی می شود.

مسیر ۳ : قطعه تا ۳۰۰ درجه سانتی گراد سریع سرد می شود. نگه داشتن نمونه به مدت ۵۰۰ ثانیه در این دما باعث خواهد شد که ۵۰ درصد ساختار به بینیت تبدیل شود و ۵۰ درصد باقی مانده در مرحله دوم سرد شدن به مارتنزیت تبدیل می شود.

مسیر ۴ : قطعه در دمای ثابت ۶۰۰ درجه سانتی گراد بطور کامل به پرلیت تبدیل می شود. از آنجایی که پرلیت نمی تواند بطور مستقیم به بینیت یا مارتنزیت تبدیل شود، پس در انتها ساختار همچنان پرلیتی باقی می ماند.

نمودارهای دگرگونی در ضمن سرد شدن پیوسته (CT)

در بیش تر فرآیندهای عملیات حرارتی، فولادها پس از آستنیت شدن **بطور پیوسته تا دمای اتاق** سرد می شوند. نرخ سرد شدن تابعی از نوع عملیات حرارتی، اندازه و شکل نمونه ها است.

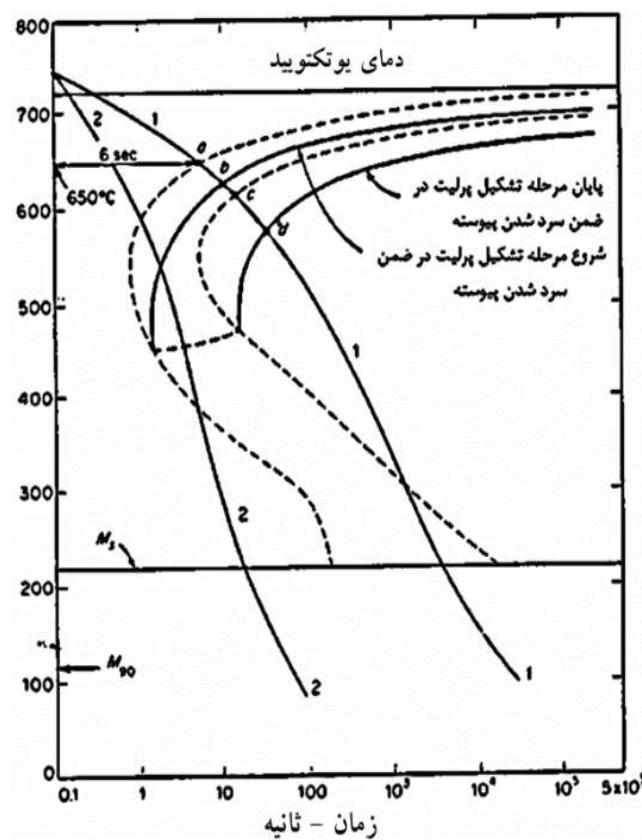


شکل ۴-۵ ارتباط بین نمودار دگرگونی هم دما (IT) و نمودار دگرگونی در سرد شدن پیوسته (CT) برای فولاد یوکتویدی [۹].

(فولاد ۱۰۸۰، خطوط منقطع IT و ممتد CT)

در منحنی سرد شدن شماره ۱، در پایان زمان ۶ ثانیه، خط شروع تشکیل پرلیت مربوط به نمودار IT را قطع می کند. باتوجه به اینکه زمان لازم برای شروع تغییر فاز آستنیت به پرلیت در دماهای بالاتر از ۶۵۰ درجه سانتی گراد، بیش تر از زمان لازم در ۶۵۰ درجه سانتی گراد است، برای نمونه های مسیر ۱، دگرگونی آستنیت به پرلیت پس از ۶ ثانیه هنوز شروع نشده است. از آنجایی که در سرد شدن پیوسته، افزایش زمان همراه با افت دما، بیش تر می باشد، پس نقطه ای که نشان دهنده شروع دگرگونی آستنیت به پرلیت باشد، در سمت راست و پایین نقطه a قرار دارد. **نقطه پایان تشکیل پرلیت در این شرایط (CT) در سمت راست و پایین نقطه پایان تشکیل پرلیت در دگرگونی IT منتقل می شود.**

استدلال بالا یکی از تفاوت‌های عمده نمودارهای IT و CT را به این صورت مشخص می‌کند؛ برای فولاد یادشده، نمودار CT در سمت راست و پایین نمودار IT آن فولاد قرار دارد و این جابه‌جایی، تابعی از نرخ سرد شدن است. هم‌چنین این موضوع که چرا در سرد شدن پیوسته، دگرگونی تشکیل بینیت در این فولاد انجام نمی‌شود، نیاز به توضیح دارد. فهم این موضوع چندان مشکل نیست و مربوط به این حقیقت می‌شود که خطوط تشکیل پرلیت تا ناحیه تشکیل بینیت و حتی بعد از آن ادامه می‌یابد. از این رو، در نرخ‌های سرد شدن آهسته و متوسط (مانند منحنی ۱)، پیش از این که خط سرد شدن به ناحیه تشکیل بینیت برسد، آستنیت به طور کامل به پرلیت تبدیل می‌شود و بنابراین، بینیتی تشکیل نخواهد شد. از طرف دیگر، در نرخ‌های سرد شدن زیاد (مانند منحنی ۲)، نمونه برای مدت زمانی بسیار کمتر از زمان لازم برای تشکیل مقدار چشمگیری بینیت در بازه دمایی تشکیل بینیت قرار می‌گیرد و در نتیجه، در این حالت نیز بینیتی تشکیل نخواهد شد. نکته‌ای که در رابطه با موضوع اخیر باید در نظر گرفته شود، این حقیقت است که نرخ تشکیل بینیت با کاهش دما به شدت کاهش می‌یابد. برای رسم نمودار CT برای این آلیاژ خاص، با تقریب خوبی فرض می‌شود که در ناحیه‌ای از نمودار IT که تشکیل پرلیت و بینیت بر یکدیگر منطبق می‌شوند، دگرگونی در امتداد مسیری مانند منحنی شماره ۲ متوقف شود. بنابراین، ریزساختار حاصل از سرد شدن یک فولاد یوتکتویدی در امتداد مسیر ۲ باید شامل پرلیت و مارتنزیت باشد. البته مقدار بسیار کمی بینیت هم ممکن است، وجود داشته باشد که قابل صرف‌نظر کردن است. مشخص می‌باشد که در نمونه یادشده، مارتنزیت از آستنیتی به وجود می‌آید که در دماهای بالا به پرلیت تبدیل نشده است.



به طور کلی، ویژگی‌های دیگری که مخصوص نمودارهای CT می‌باشند و نمودارهای IT از آنها مستثنی هستند، عبارت‌اند از:

۱- کاهش دمای شروع تشکیل مارتنزیت در نرخ‌های سرد شدن کم: در صورتی که در ضمن سرد شدن آهسته و پیوسته فولاد از ناحیه آستنیت، فاز فریت و یا ساختار بینیت تشکیل شود، آستنیت باقیمانده می‌تواند از کربن غنی شود و در نتیجه، دمای تبدیل آن به مارتنزیت کاهش می‌یابد. اثر درصد کربن آستنیت روی دمای شروع تشکیل مارتنزیت در فصل سوم بررسی شده است (شکل ۳-۶).

۲- بازگشت^۱ مارتنزیت در ضمن سرد شدن در زیر دمای M_s : این پدیده که به بازگشت خودبه‌خود^۲ موسوم است، بیشتر در مورد فولادهای کم‌کربن با دمای M_s بالا معمول می‌باشد. علت این پدیده، قرار گرفتن مارتنزیت در یک بازه دمایی گسترده بین M_s تا حدود ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد است. در این بازه دمایی، کربن، قدرت تحرک کافی برای نفوذ و تشکیل کاربیدهای مربوط به ساختار مارتنزیت بازگشت‌داده‌شده را پیدا می‌کند. پدیده بازگشت فولادها در فصل هشتم بررسی خواهد شد.

۳- غلبه بینیت به عنوان یک محصول دگرگونی آستنیت: بعضی از عناصر آلیاژی، به‌ویژه مولیبدن و هم‌چنین نرخ‌های سرد شدن تا حدودی زیاد در بازه دمایی مربوط به دگرگونی نفوذی (ناحیه تشکیل پرلیت) منجر به ترغیب دگرگونی برشی می‌شوند و در نتیجه، تشکیل بینیت را در این بازه دمایی آسان می‌کنند.

۴- وجود فازها و ریزساختارهای مختلف در کنار یکدیگر: علت آمیختگی ریزساختارهای نهایی، عبور نمونه از نواحی مختلف فازی و ساختاری در ضمن سرد شدن پیوسته است (شکل ۴-۱۰، این مطلب را نشان می‌دهد).

۵- تشکیل فریت غیرمستقره در فولادهای پرکربن مانند AISI ۵۲۱۰۰: علت این که در بعضی از فولادهای پرکربن که در حالت کلی باید سمیتیت پرویوتکتوئید وجود داشته باشد، فریت پرویوتکتوئید پدیدار می‌شود، این است که در ضمن آستنیت کردن، به احتمال زیاد تمامی کاربیدها در آستنیت حل نشده‌اند و در نتیجه، مقداری از کربن هم‌چنان به صورت کاربید باقی مانده است.

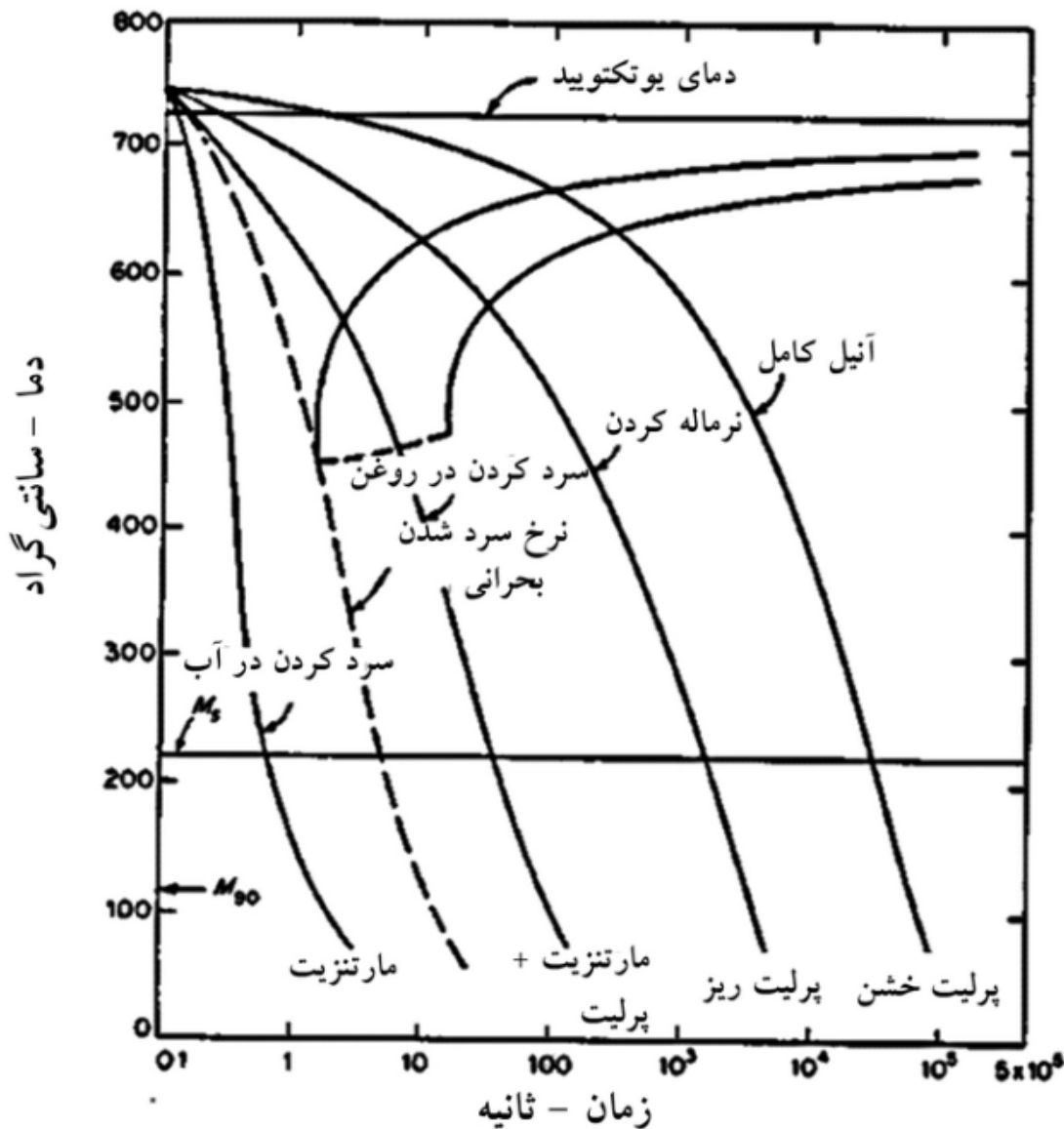
بنابراین، کربن آستنیت (به‌ویژه در کنار کاربیدها) کمتر از مقدار مورد نظر است و به مقدار کربن فولادهای هیپویوتکتوئید می‌رسد. البته این موضوع در دگرگونی‌های هم‌دما نیز وجود دارد.

۶- افزون بر ویژگی‌های بیان‌شده برای نمودارهای CT و IT، بیشتر وقت‌ها یک حد فاصل بین بعضی از نواحی مختلف فازی در نمودارهای CT دیده می‌شود (به شکل ۴-۹ مراجعه شود). این حد فاصل، مشخص‌کننده بازه دمایی است که در ظاهر، در ضمن سرد شدن پیوسته، هیچ نوع دگرگونی در آن انجام نمی‌شود.

بازه دمایی تشکیل ساختارها از جمله دلایل احتمالی است.

اصول استفاده از نمودارهای دگرگونی غیرهم‌دما (سرد شدن پیوسته)

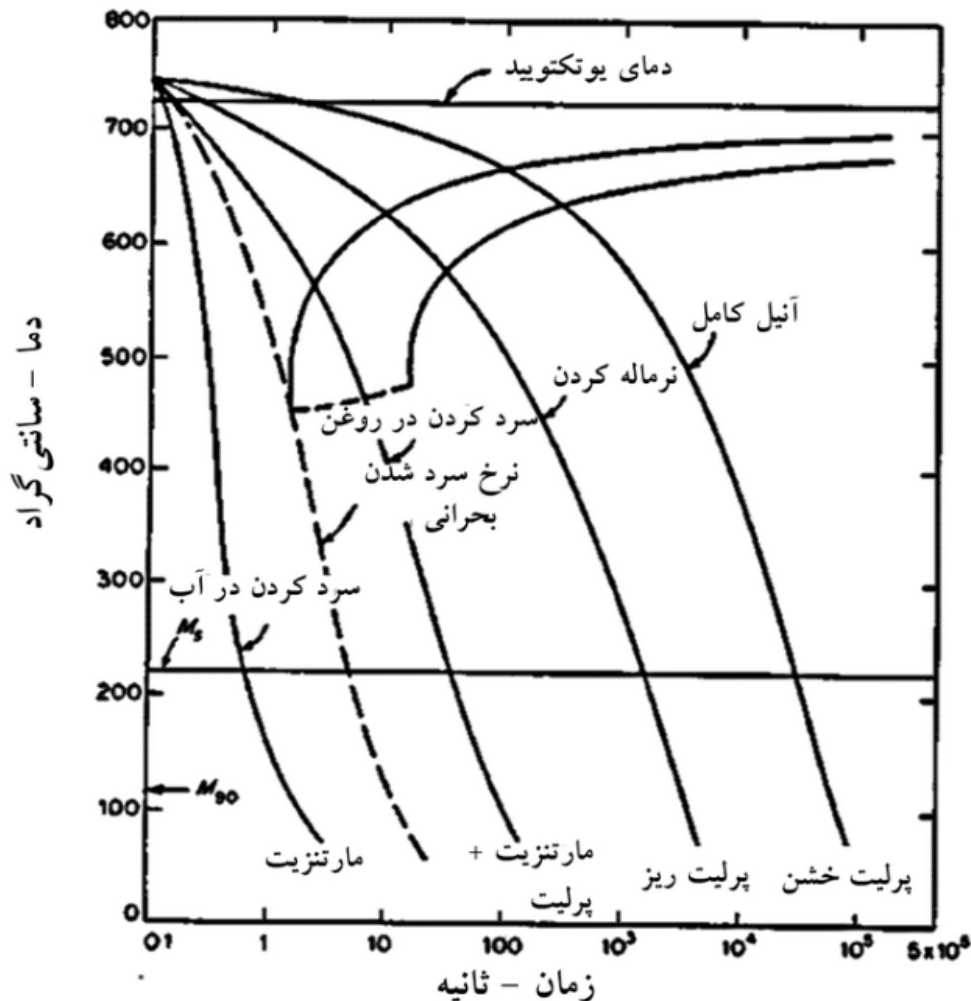
این منحنی‌ها چگونگی تشکیل ریزساختارهای مختلف در ضمن سرد شدن با نرخ‌های متفاوت را نشان می‌دهند:



۱- **آنیل کامل** (Full annealing): این منحنی نماینده نرخ سرد شدن بسیار آهسته است (قطعه پس آستنیت شده تا دمای اتاق در کوره سرد شود). زمان لازم برای رسیدن از ناحیه آستنیت به دمای اتاق، **حدود یک روز** است. در این حالت، دگرگونی آستنیت به پرلیت در دمایی **حدود دمای تعادلی** یوتکتوید انجام می‌شود و محصول دگرگونی **پرلیت خشن** است.

۲- **نرماله کردن (Normalizing):** این منحنی مشخص کننده عملیات حرارتی است که در آن نمونه‌ها با نرخی بیش‌تر از حالت آنیل و تا حدودی آهسته سرد می‌شوند. دگرگونی در بازه دمایی ۶۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود و در زمان **چند دقیقه** خاتمه می‌یابد. ساختار بدست آمده **پرلیت** می‌باشد، ولی نسبت به حالت قبل، بسیار ریزتر و ظریف‌تر است.

۳- **سرد کردن در روغن (Oil quench):** این منحنی مشخص کننده نرخ سرد شدن بیش‌تر از نرماله کردن است. نمونه فولادی از دمای آستنیت، مستقیم در **حمام روغن** انداخته می‌شود. ساختار نهایی در این حالت، **مخلوطی از پرلیت و مارتنزیت** است.

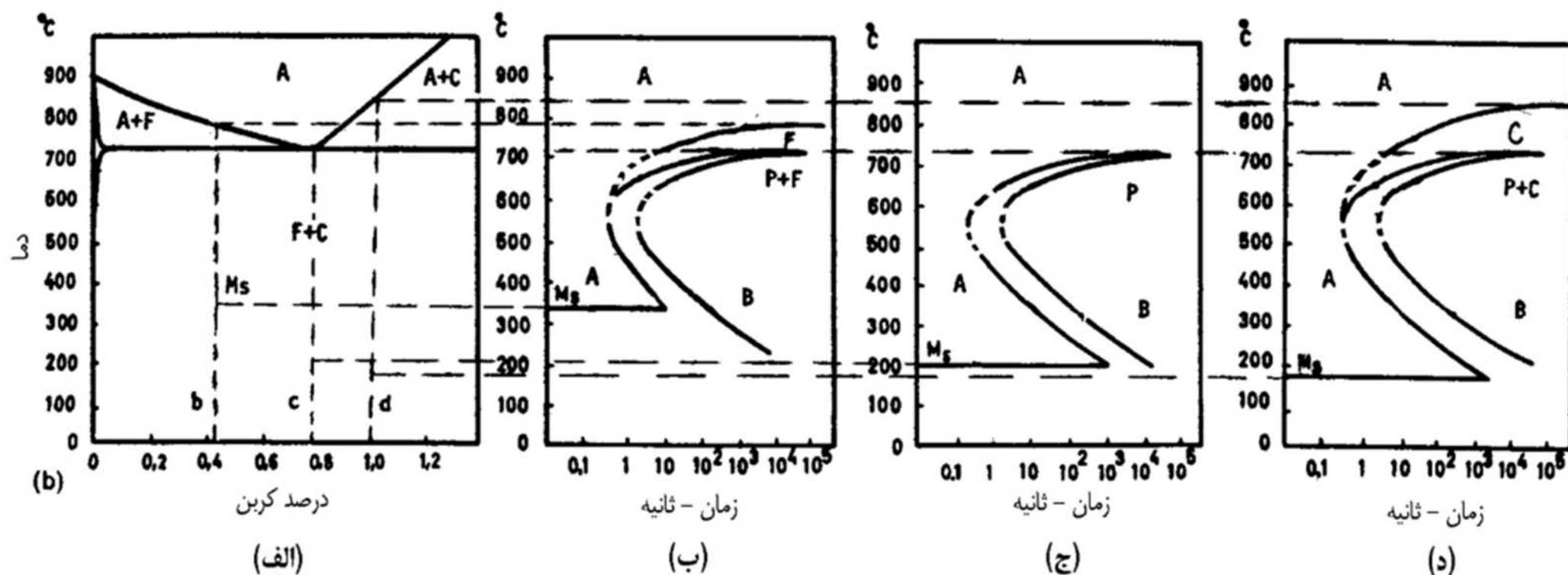


۴- **سرد کردن در آب (Water quench):** منحنی این حالت در انتهای سمت چپ قرار دارد و مربوط به حالتی است که پس از سرد شدن، ساختار بطور **کامل مارتنزیتی** باشد.

۵- **نرخ سرد شدن بحرانی (Critical cooling rate):** این منحنی بصورت خط‌چین مشخص شده است و بر دماغه نمودار **CT مماسی** است. در هر نرخ سرد شدنی بیش‌تر از نرخ سرد شدن بحرانی، فولاد بطور کامل مارتنزیت می‌شود.

نمودارهای TTT برای فولادهای ساده کربنی غیر یوتکتویدی

ساده ترین نمودار TTT، مربوط به فولاد ساده کربنی یوتکتویدی است. با تغییر درصد کربن، موقعیت خطوط همراه با نقاط شروع و پایان دگرگونی ها تغییر می کند و فازهای جدید در نمودار پدیدار می شوند. شکل ۴-۷، شمایی از نمودارهای IT را برای فولادهای ساده کربنی یوتکتویدی، هیپویوتکتویدی و هایپریوتکتویدی نشان می دهد.



شکل ۴-۷ ارتباط بین: (الف) نمودار تعادلی آهن - کربن و نمودارهای دگرگونی هم دما برای فولادهای ساده

کربنی، (ب) هیپویوتکتوید، (ج) یوتکتوید و (د) هایپریوتکتوید [رسم دوباره با استفاده از مراجع ۱ و ۹].

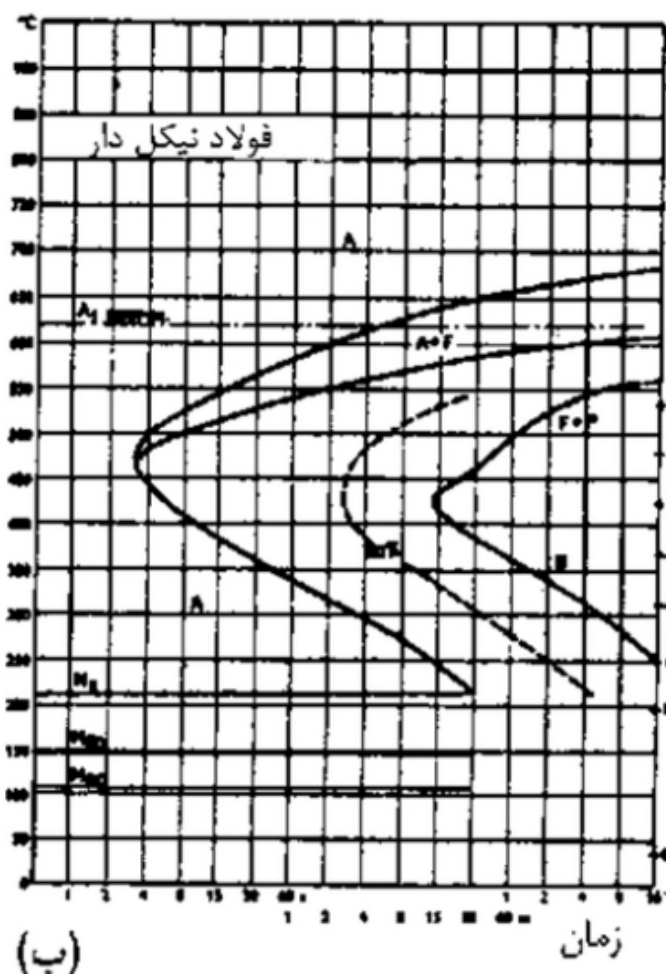
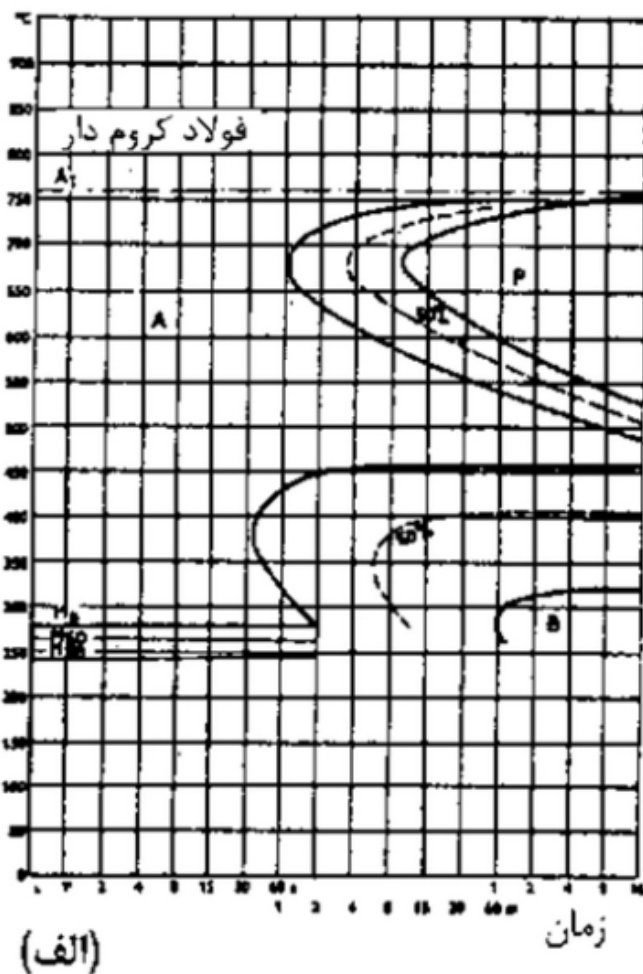
نمودارهای IT برای فولادهای هیپویوتکتوئید و هایپریوتکتوئید، دارای یک منحنی اضافی در سمت بالا هستند که به ترتیب نشان دهنده شروع تشکیل **فریت پرویوتکتوئید** و **سمنتیت پرویوتکتوئید** است.

با کاهش درصد کربن فولادهای هیپویوتکتوئید، دمای A_3 افزایش می یابد و بنابراین، ناحیه مربوط به فاز فریت پرویوتکتوئید گسترده تر می شود. به همین ترتیب، در فولادهای هایپریوتکتوئید با افزایش درصد کربن، دمای A_{cm} نیز افزایش می یابد و در نتیجه، ناحیه مربوط به فاز سمنتیت پرویوتکتوئید گسترده تر می شود.

هرچه درصد کربن فولاد کم تر باشد، دماهای M_s و M_f آن بالاتر است.

نمودارهای TTT مربوط به فولادهای آلیاژی

اضافه شدن عناصر آلیاژی مختلف به فولادها، اثرهای متفاوتی روی نمودارهای دگرگونی آنها دارد. برای نمونه، اضافه شدن بیشتر از حدود سه درصد کروم به فولاد باعث می شود که نواحی تشکیل پرلیت و بینیت، به طور کامل از یکدیگر جدا شوند (شکل ۴-۸-الف)، در حالی که نیکل، شکل کلی نمودار دگرگونی فولاد را تغییر نمی دهد و تنها آن را به سمت راست جابه جا می کند (شکل ۴-۸-ب).

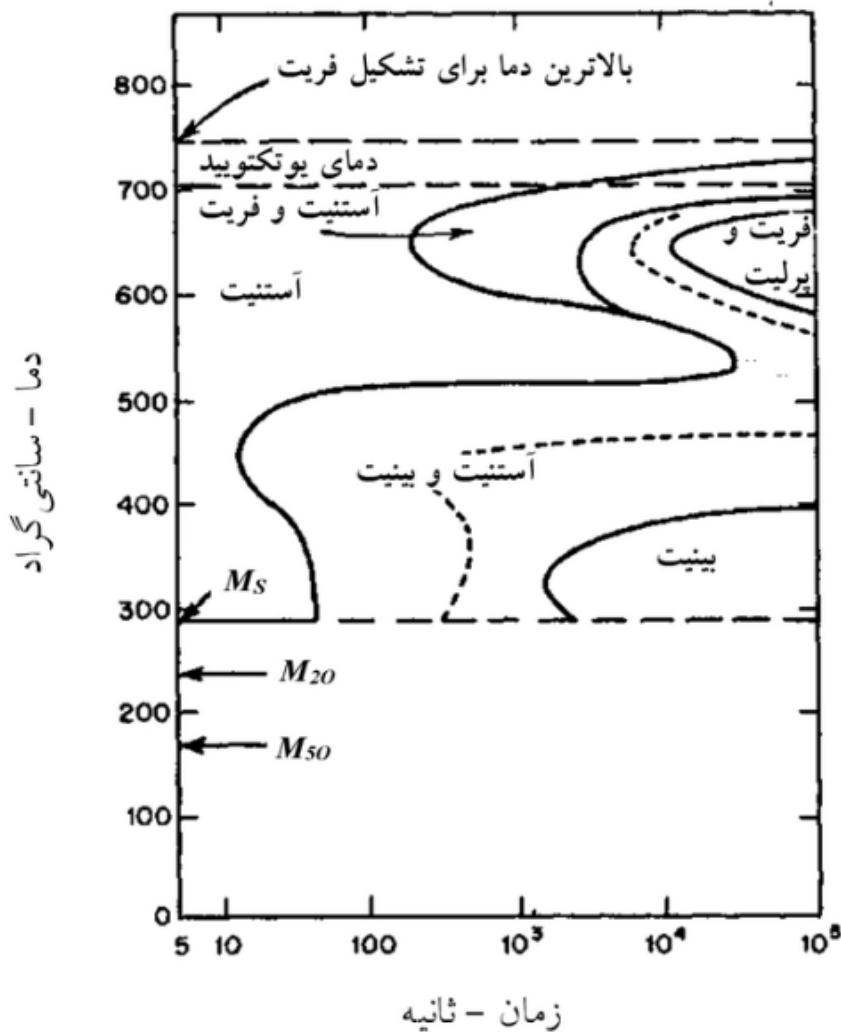


(الف) فولاد $0.5\%C - 3.5\%Cr$ ، دمای آستنیتیزه کردن ۹۰۰ درجه سانتی گراد، فولاد $0.6\%C - 0.5\%Ni$ ، دمای آستنیتیزه کردن ۹۲۵ درجه سانتی گراد

به طور کلی می توان گفت، در صورتی که عنصر آلیاژی اضافه شده به صورت محلول جامد باشد، نمودار TTT را به سمت راست مستقل می کند. به بیان دیگر، دگرگونی های نفوذی را کند می نماید و به تعویق می اندازد. در این رابطه، عنصر کبالت مستثنی است. در حقیقت، کبالت نرخ جوانه زنی و نرخ رشد پرلیت را زیاد می کند. گزارش شده است که علت این موضوع، کاهش انرژی آزاد فصل مشترک بین فازهای فریت و سمنتیت است. بر حسب این که عنصر آلیاژی اضافه شده، پایدارکننده فریت و یا پایدارکننده آستنیت باشد، دمای تعادلی تشکیل پرلیت را به ترتیب افزایش و یا کاهش می دهد.

یکی از ویژگی‌های مهم نمودار IT فولاد کم‌آلیاژ ۴۳۴۰، وجود دو دماغه است که یکی مربوط به دگرگونی پرلیتی و دیگری مربوط به دگرگونی بینیتی است.

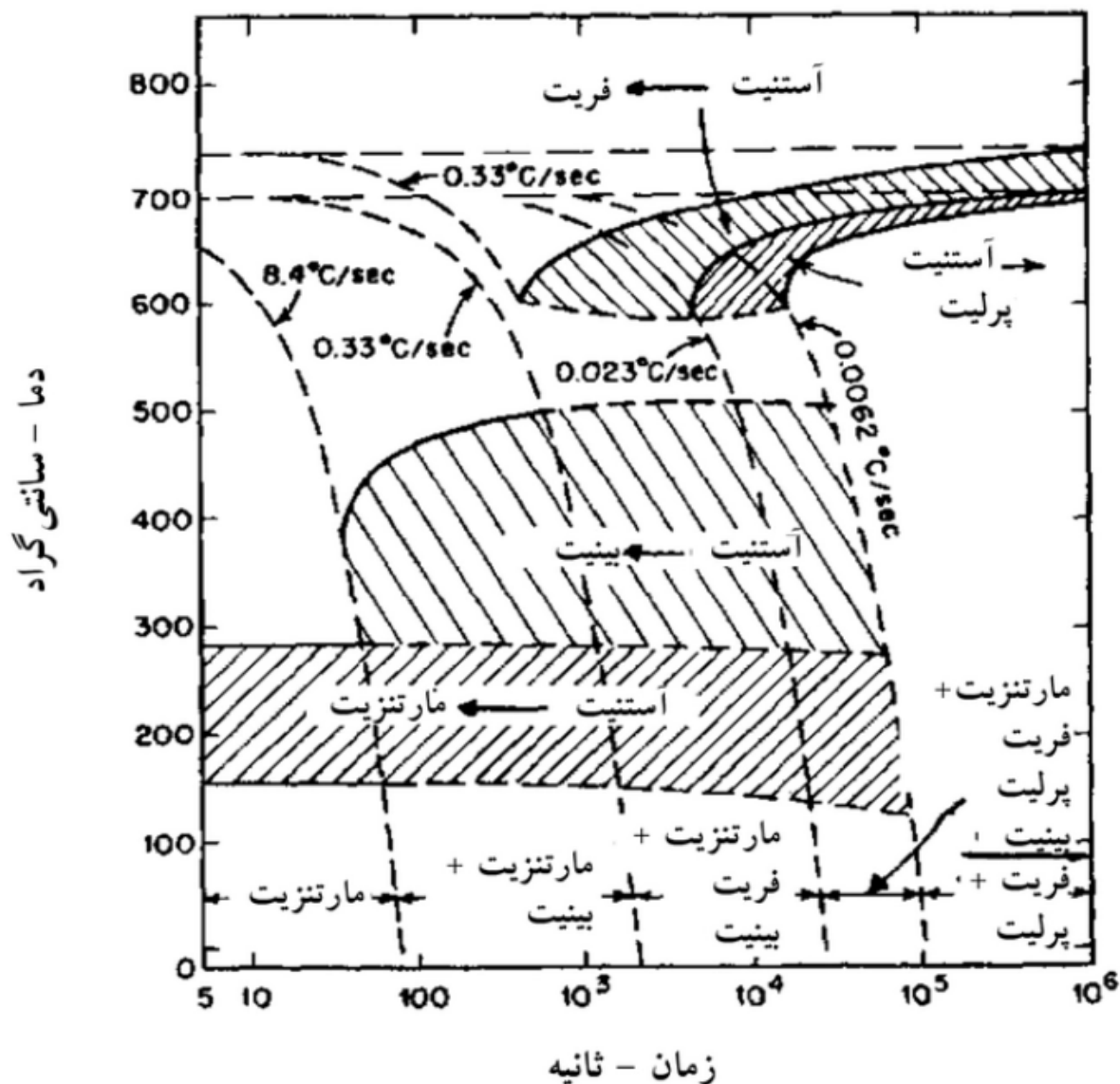
در اطراف دماغه بالایی و حدود ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد، کمترین زمان لازم برای تشکیل مقدار چشمگیری فریت پرویوتکتوئید، حدود ۲۰۰ ثانیه است، در حالی که در زیر این دماغه و حدود ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد، کمترین زمان لازم برای تشکیل پرلیت، حدود ۱۸۰۰ ثانیه (یا ۳۰ دقیقه) می‌باشد. به همین ترتیب، کمترین زمان لازم برای تشکیل مقدار چشمگیری بینیت در حدود دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد، برابر ۱۰ ثانیه است.



شکل ۴-۹ نمودار دگرگونی هم‌دمای فولاد کم‌آلیاژ ۴۳۴۰. دمای آستنیت‌زدن ۸۴۵ درجه سانتی‌گراد (۱۵۵۰ درجه فارنهایت) [۹].

۰/۴۲C، ۰/۷۸Mn، ۰/۷۹Ni، ۰/۸Cr و ۰/۳۳Mo

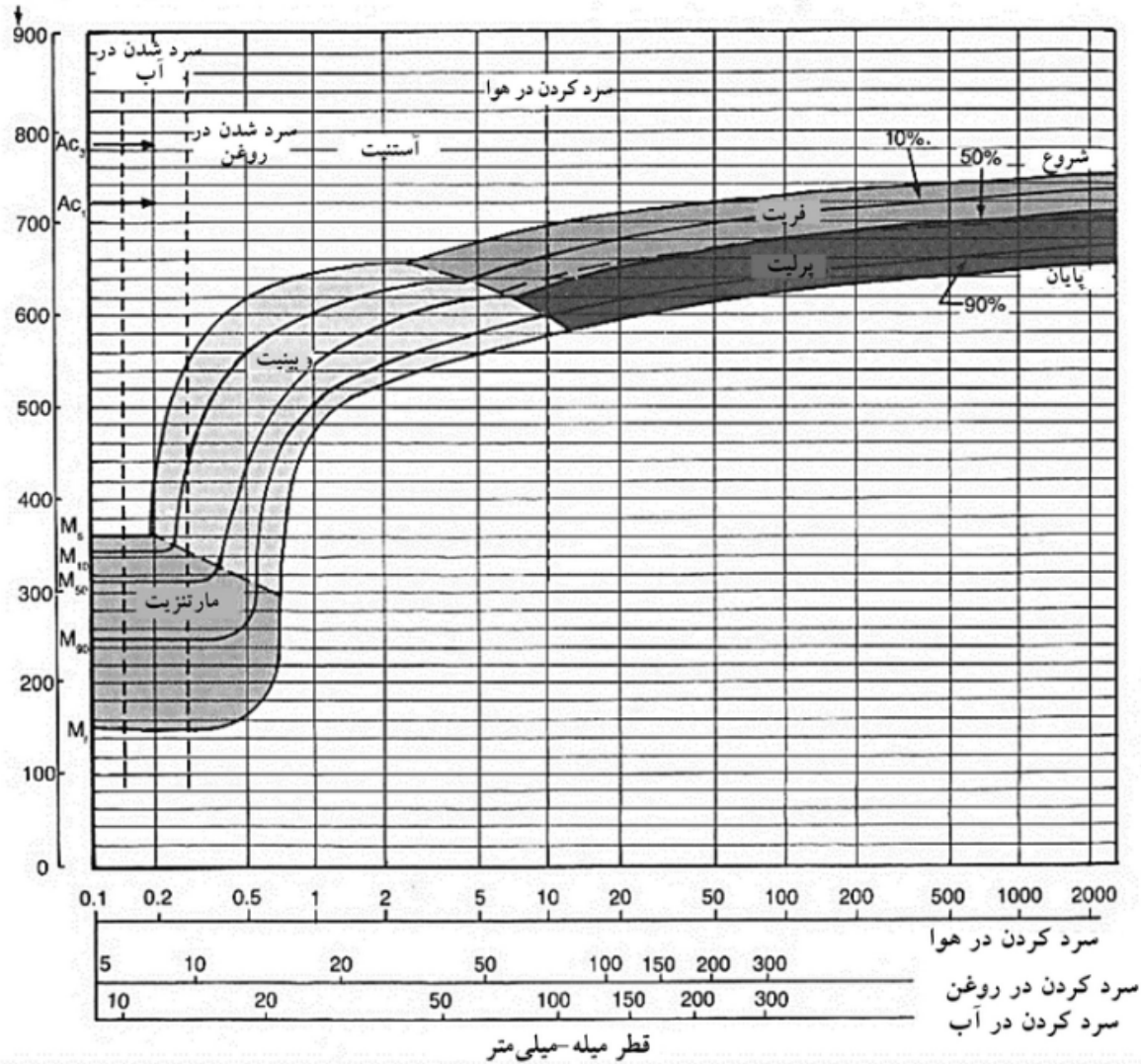
نمودار دگرگونی در سرد شدن پیوسته (CT) فولاد ۴۳۴۰ نشان می‌دهد که با اضافه کردن عناصر آلیاژی می‌توان در سرد شدن پیوسته نیز ساختاری شامل بینیت کامل گرفت. در صورتیکه در مورد فولادهای ساده کربنی به علت محدود شدن ناحیه بینیت توسط ناحیه پرلیت در CT، بینیت قابل ملاحظه تشکیل نمی‌شود.



در آلیاژ ۴۳۴۰، از آن جایی که در اثر اضافه شدن عناصر آلیاژی، گستره ناحیه بینیتی، زیاد و گستره ناحیه پرلیتی محدود شده است، **در سرد شدن پیوسته امکان تشکیل بینیت فراهم می‌شود.**

نمودارهای دگرگونی در سرد شدن پیوسته و قطر میله

دمای دگرگونی - سانتی گراد



مجموعه‌ای از نمودارهای CCT توسط شرکت فولاد بریتانیا منتشر شده است، که منحنی‌های دگرگونی سرد شدن پیوسته را به جای زمان بر حسب **قطر میله** را نشان می‌دهند.

به کمک این نمودارها می‌توان ساختار مرکز میله‌ای با قطر مشخص که پس از آستنیت‌شدن در یکی از محیط‌های آب، روغن و یا هوا سرد شده باشد را به سادگی تخمین زد.

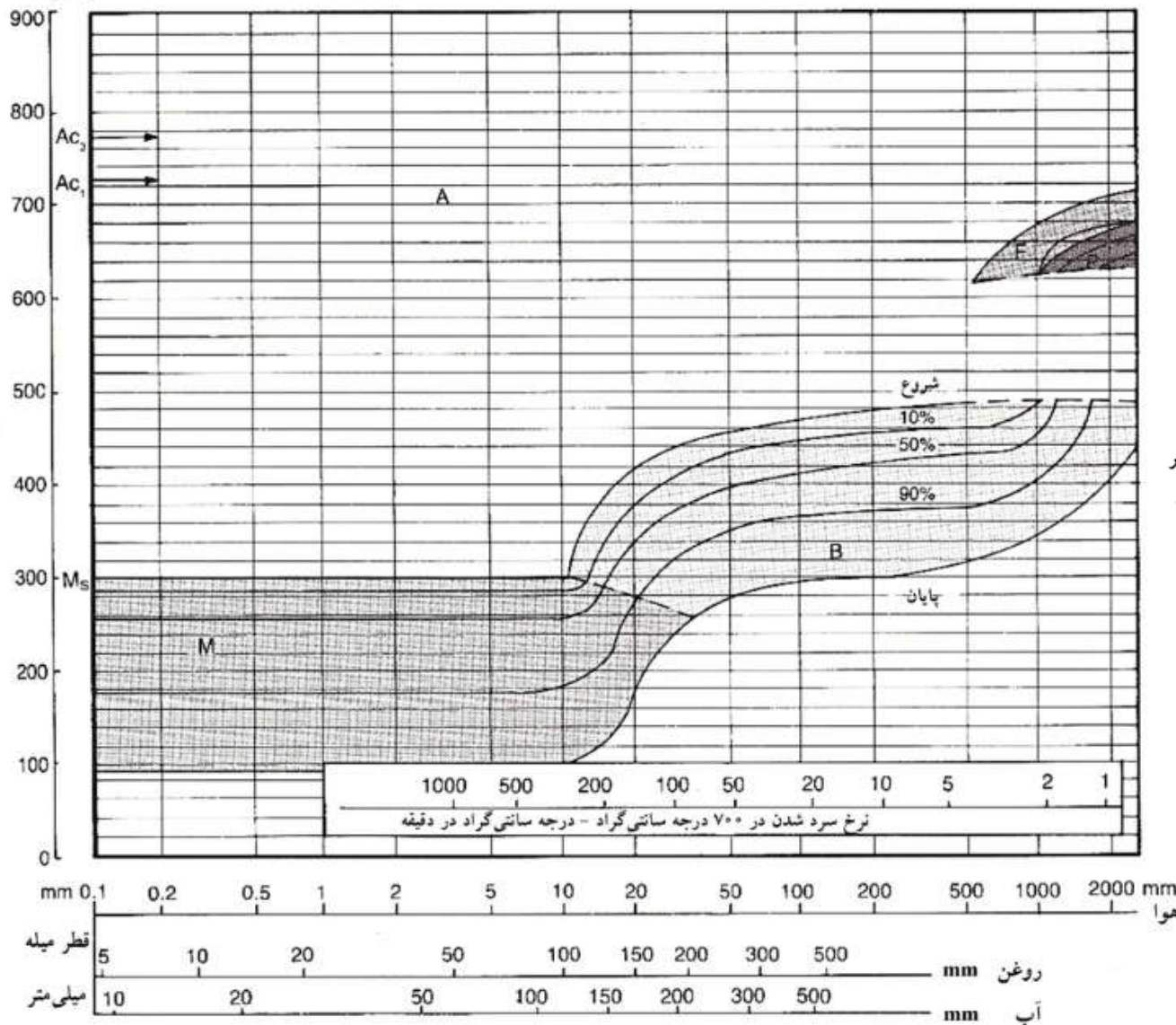
شکل ۴-۱۱ نمودار CCT برای فولاد ساده کربنی شامل $\%0.2\text{Si}$ ، $\%0.7\text{Mn}$ و $\%0.38\text{C}$ دگرگونی و ریزساختار بر حسب قطر میله رسم شده‌اند [۱].

عواملی مانند دمای آستنیت‌کردن، عدد اندازه دانه، تغییرهای نرخ سرد شدن و عوامل اثرگذار روی آن مانند دما و تلاطم محیط و همچنین تغییرهای ترکیب شیمیایی فولاد، از جمله عواملی هستند که می‌توانند موجب شوند، ساختار واقعی نهایی فولاد، متفاوت از ساختار نشان داده‌شده در نمودار باشد.

همچنان که در این نمودار نشان داده شده است، اگر میله‌ای به قطر ۱۰ میلی‌متر از این فولاد پس از آستنیت‌شدن، در آب، روغن و یا هوا سرد شود، ریزساختار مرکز میله به‌ترتیب، مارتنزیت، بینیت و مارتنزیت و مخلوطی از فریت، پرلیت و مقدار کمی بینیت خواهد بود.

شکل ۴-۱۲، نمودار CCT از این نوع را برای یک فولاد آلیاژی با $0.4\%C$ ، $1.2\%Cr$ ، $0.3\%Mo$ و $1.5\%Ni$ نشان می‌دهد. از این نمودار مشخص است که میله‌ای از جنس این فولاد به قطر ۱۰ میلی‌متر حتی اگر در هوا هم سرد شود، ساختار مرکز آن (و بنابراین ساختار تمام قطعه)، مارتنزیت می‌شود. به همین ترتیب، اگر میله‌هایی از جنس این فولاد و به قطر ۱۰۰ و ۱۲۰ میلی‌متر، به ترتیب در محیط‌های روغن و آب سرد شوند، به طور کامل مارتنزیت خواهند شد.

دما - سانتی‌گراد



شکل ۴-۱۲ نمودار CCT برای فولاد آلیاژی $0.4\%C$ ، $1.2\%Cr$ ، $0.3\%Mo$ و $1.5\%Ni$ بر حسب قطر میله. دمای آستنیت کردن 850° درجه سانتی‌گراد (1562° درجه فارنهایت) [۱].