چگونه پدیده خستگی در سازه های فولادی را بشناسیم و کنترل کنیم؟

سازه های فلزی و بتنی در طول زمان به دلیل بارهای وارد شده بر آن ها دچار آسیب دیدگی یا شکست می شوند. یکی از آسیب های جدی وارد شده به این نوع سازه ها پدیده خستگی است که عوامل مختلفی بر آن تأثیر می گذارند و باید قبل از احداث یک پروژه در هنگام طراحی سازه، در نظر گرفته شوند. ما در ادامه این مطلب به بررسی این پدیده، اندازه گیری آن و همچنین راه های کاهش این مورد خواهیم پرداخت. شما عزیزان می توانید ضمن مطالعه این مطلب انواع بارهای وارد بر ساختمان را از لینک آن مطالعه کنید.

پدیده خستگی در سازه چیست؟

به طور کلی طبق مباحث مقاومت مصالح برای مشخص کردن خواص مکانیکی مواد از نمودارهای تنش-کرنش استفاده می شود. در واقع هر ماده ای نمودار تنش-کرنش جداگانه ای دارد. در آزمون های رسم این نوع نمودارها ابتدا نیرو را به صورت تدریجی وارد کرده و تا جایی افزایش می دهند که نمونه مورد آزمایش دچار شکست شود. علت تدریجی بودن نیروهای وارد شده این است که زمان کافی برای گسترش کرنش در ماده مورد نظر وجود داشته باشد. به این نوع بارگذاری، بارگذاری استاتیک نیز گفته می شود. مشابه بارهای استاتیک در سازه های بتنی و فلزی همان بارهای مرده و زنده ناشی از عوامل مختلف مانند وزن سازه هستند.

در این آزمایش ها وقتی نیروی تنشی به حد بیشینه خود میرسد شکست رخ می دهد؛ اما طبق قوانین سازه ای اگر به بیشینه نرسد، وقتی نیروهای اعمال شده برداشته می شود، ماده به حالت اولیه خود برمی‌گردد. تصور ما این است که هر بار این آزمایش انجام شود و نیروهای تنشی به بیشینه نرسند، بعد از برداشتن نیرو، ماده باید به حالت اولیه خود برگردد؛ اما این حالت ممکن است در مفهوم خستگی در سازه ده ها و صدها بار اول اتفاق بیفتد ولی در صورت تکرار بارگذاری برای هزاران و میلیون ها بار، دیگر حتی بعد از برداشتن نیروی تنشی نیز ماده به حالت اولیه خود برنمی‌گردد.

دقیقاً مانند یک کش که وقتی تازه آن را می خریم هر چقدر آن را بکشیم، وقتی رهایش می کنیم دوباره به حالت اولیه خود برمی‌گردد، اما به مرور حالت کشسانی خود را از دست داده و دیگر بعد از برداشتن نیرو هم نمی تواند به حالت اولیه خودش تبدیل شود. این پدیده که به آن پدیده خستگی گفته می شود در سازه های فلزی و بتنی اجتناب ناپذیر است و تنها زمان آن متفاوت می باشد. در شرایط خستگی، گسیختگی در تنش های کمتر از مقاومت گسیختگی سازه نیز رخ می دهد. به تعداد دورهای تنشی که بر یک جسم وارد می شود تا به شکست برسد، عمر خستگی می گویند.

بارگذاری خستگی چیست؟

پدیده خستگی در سازه های فلزی بیشتر مورد توجه مهندسان قرار گرفته است، با این حال در سازه های بتنی بیشتر اتفاق می افتد. همانطور که گفتیم خستگی در فلزات یا هر ماده ای وقتی اتفاق می افتد که ماده تحت تنش تکرار شونده یا نوسانی قرار بگیرد؛ بنابراین باید در طراحی تمامی سازه های فلزی که تحت تأثیر بارهای تکرار شونده مانند بارهای نوسانی قرار می گیرند، این پدیده و نیروهای ایجاد کننده آن لحاظ شود. در واقع یکی از وظایف مهندسین طراح این است که تمامی جزئیات یک عضو را طوری طراحی نمایند تا نیروهای لنگری، برشی و محوری اعمال شده در هر بار تکرار از محدوده های مجاز آیین نامه ای بیشتر نشود. طوری که تنش ها به قدری زیاد نشوند که باعث گسترش پدیده خستگی در سازه گردند.

توجه به این نکته بسیار مهم است که تعداد تکرار نیروهای وارد شده که ممکن است در طول عمر مفید هر المان سازه ایجاد شود، برای سازه ها و اعضای مختلف کاملاً متفاوت است. به عنوان نمونه در تیری که به عنوان تکیه گاه یک

جرثقیل صنعتی استفاده می شود، ممکن است در طول ۲۵ سال عمر مفیدش، حداقل دو میلیون بار بارگذاری انجام شود؛ اما در یک تیغه توربین تعداد بارگذاری در طول عمر مفیدش به چند میلیارد بار می رسد.

انواع پدیده خستگی در سازه‌های بتنی و فولادی

انواع پدیده خستگی شامل سه دسته زیر می باشد:

- خستگی چرخه کم
- خستگی چرخه زیاد
- خستگی چرخه بسیار زیاد

بدترین حالت بارگذاری خستگی در سازه کدام نوع است؟!

در حالت دیگر نحوه بارگذاری هایی که موجب پدیده خستگی می شوند به ۳ حالت متفاوت تقسیم خواهند شد که شرح آن ها به قرار زیر است:

- **حالت اول:**

در این حالت تنش کاملاً معکوس ایجاد می شود که برای سازه ایده آل است. در این نوع چرخه تنش، میزان تنش های حداکثر و حداقل با همدیگر برابر هستند که یکی از آن ها کششی و دیگری فشاری خواهد بود. در این شرایط بدترین

بارگذاری خستگی حالت کاملاً معکوس می باشد. یعنی وقتی تنش کششی به سازه اعمال می شود از مقدار صفر به حداکثر خود می رسد و دوباره کم کم صفر خواهد شد. سپس دوباره تنشی برابر با همان نیرو ولی به صورت فشاری وارد می شود تا به مقدار حداکثری خود برسد و کم کم صفر شود. این نوع بارگذاری دائماً در سازه تکرار می شود.

- **حالت دوم:**

در این حالت نیز یک تنش تکرار شونده خواهیم داشت که برخلاف حالت اول، دیگر تنش های حداکثر و حداقل با هم برابر نخواهند بود. با این حال هر دو از یک نوع تنش هستند؛ یعنی یا هر دو فشاری و یا هر دو کششی می باشند؛ بنابراین یک چرخه تکراری از نیروهای وارد شونده می تواند شامل تنش های کششی و فشاری، فقط فشاری و یا فقط تنشی باشد. یکی از نکات مهم و جالب توجه در آزمایشات پدیده خستگی این است که نباید تنش های اعمال شده تنها به صورت فشاری باشند؛ زیرا در این حالت تنش فشاری باعث بسته شدن ترک ها شده و پدیده شکست اتفاق نمی افتد.

- **حالت سوم:**

در این حالت یک چرخه تنش ترکیبی اتفاق می افتد که معمولاً در قطعاتی مانند بال هواپیما در اثر نیروهای ناشی از تندباد ایجاد می‌شود. به این معنی که در هر بار نوسانات نیروهای فشاری و کششی، نوع آن‌ها قابل پیش‌بینی نخواهد بود.

روند پدیده خستگی در سازه های فلزی و بتنی

نتایج آزمایش هایی که بر روی رفتارهای سازه ای در اثر پدیده خستگی انجام شده است نشان می دهد که گسیختگی ناشی از خستگی ممکن است از هر ترک بسیار ریز و میکروسکوپی شروع شود. سپس در هر بار بارگذاری سازه مقدار این گسیختگی بیشتر و بیشتر خواهد شد. این حالت تا جایی ادامه پیدا می کند که ماده گسیخته شده نتواند نیروهای وارده را تحمل نماید و دچار یک شکست ناگهانی شود.

می توان گفت روند پدیده خستگی در هر سازه شامل مراحل زیر می باشد:

۱ -شروع ترک

در هنگام شروع ترک ها در اثر بارگذاری های تکرار شونده، ترک های بسیار ریزی در بخش های مختلف سازه ممکن است ایجاد شود. شروع این ترک ها بیشتر در قسمت های ناپیوسته و محله هایی است که بیشترین تمرکز نیروهای تنشی در آن قسمت ها وجود دارد.

۲ -رشد ترک

سپس با هر بار تکرار بارگذاری، ترک ها در جهت عمود بر جهت اعمال تنش رشد خواهند کرد و میزان گسیختگی افزایش پیدا می کند.

۳ -شکست نهایی

زمانی که رشد ترک ها زیاد شود، تمرکز تنش نیز افزایش یافته و باعث تغییر شکل پلاستیک ماده و در نهایت شکست آن می شود. شایان ذکر است شکست ناشی از پدیده خستگی در سازه های فلزی برای برخی مواد مثل فولاد و آلومینیوم که ماهیت تردی دارند، خیلی سریع تر اتفاق می افتد. این حالت در آلومینیوم بیشتر مشاهده می شود. به همین دلیل نمی توان به صورت گسترده از این فلز به عنوان مصالح استفاده کرد.

نحوه تشخیص پدیده خستگی در سازه‌های بتنی و فلزی

آخرین مرحله پدیده خستگی شکست است که به راحتی با نگاه کردن به سطح مقطع ماده قابل تشخیص می باشد. زمانی که ترک های مشاهده شده به اندازه ای گسترش پیدا کند که جسم مورد نظر، دیگر تحمل بارگذاری مجدد را نداشته باشد، شکست به سرعت در قسمت های باقی مانده گسترش پیدا کرده و گسیخته می شود. این نوع شکست دو ویژگی بسیار مهم دارد که می توانید از طریق آن ها شکست ناشی از خستگی را از دیگر انواع شکست تشخیص دهید:

- سطح شکست ناشی از پدیده خستگی دارای ظاهری بلورین مانند شکست اجسام ترد می باشد.
- این نوع شکست بیشتر در نقاط تمرکز تنش مانند گوشه های تیز یا شیارها دیده می شود.

آزمایش خستگی فولاد و بتن در سازه

در این نوع آزمایش ها عمر خستگی یک ماده از طریق بارگذاری کاملاً معکوس که قبلاً توضیح دادیم مشخص می شود. رایج ترین وسیله مورد استفاده برای این آزمایش نیز دستگاه محور چرخان پرسرعت است.

نحوه انجام تست پدیده خستگی

برای این کار نمونه هایی از ماده مورد نظر که همگی دارای شکل های یکسان، سطح مقطع دایره ای، ابعاد مشخص، بدون عیب و ترک و دارای شرایط یکسان باشند انتخاب می کنیم، سپس در هر بار آزمایش یکی از نمونه ها بر روی دستگاه مورد استفاده نصب می شود. با استفاده از دستگاه در سطح بالایی نمونه مورد نظر، بلافاصله تنش کششی و در سطح زیری آن تنش فشاری وارد می شود. سپس نمونه توسط موتور چرخنده نیم دور می چرخد و دوباره تنش ها اعمال می گردد طوری که تنش های وارد شده بر نمونه، حالت سینوسی کامل داشته باشند. این نیروهای نوسانی تا جایی ادامه پیدا می کنند که شکست ناشی از پدیده خستگی ظاهر شود.

این آزمایش برای نمونه های دیگر نیز تکرار شده و نمودار آن رسم می شود تا بتوان رفتار سازه را بر اساس آن پیش بینی کرد. پدیده خستگی در سازه های بتنی حالت بحرانی تری دارد؛ زیرا بتن مانند فلزات یکپارچه نیست و از اجزای جدا شونده زیادی تشکیل می شود؛ بنابراین همواره این احتمال وجود دارد که این اجزا در هنگام اختلاط بتن به خوبی باهم یکی نشده باشند. همچنین نفوذ هوا در هنگام اختلاط مواد بتنی، ویبره نامناسب و غیر اصولی، عدم چسبندگی کافی بین میلگردها و بتن عواملی هستند که می توانند باعث ایجاد ترک های میکروسکوپی در بخش های مختلف بتن شده و سرعت ایجاد پدیده خستگی را افزایش دهند.

عوامل مؤثر بر عمر خستگی سازه

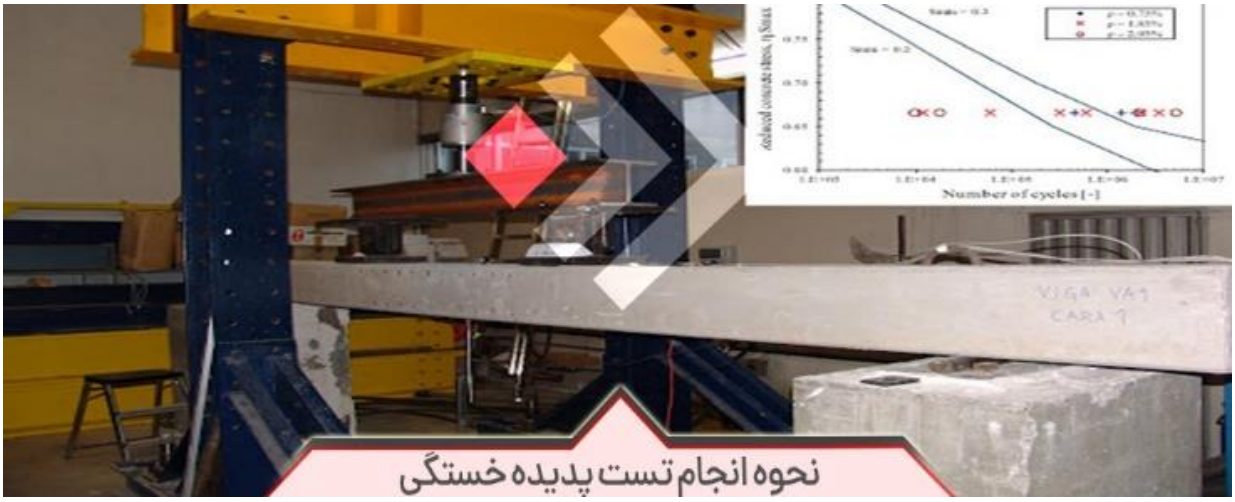
عمر خستگی به معنی مدت زمانی است که نیروهای تنشی تکرار می شوند تا شکست نهایی اتفاق بیفتد. عوامل زیادی بر میزان عمر خستگی تأثیر می گذارد که مهم ترین آن ها عبارتند از:

الف) مقدار و نوع تنش

بدیهی است که هر چه مقدار تنش متوسطی که به اعضای سازه وارد می شود، بیشتر باشد پدیده خستگی زودتر اتفاق افتاده و عمر خستگی کمتر خواهد شد. البته نوع تنش هم بسیار مهم است. به عنوان مثال استحکام خستگی موادی که در برابر تنش های پیچشی قرار می گیرند نسبت به موادی که در برابر تنش های نرمال عمودی قرار می گیرند کمتر خواهد بود. شدت گسترش ترک های ناشی از خستگی نیز به شدت تنش های کششی و فشاری بستگی دارد.

ب) آهنگ بارگذاری تکرار شونده

تا بسامدهای ۱۵۰ هرتز (نوسان بر ثانیه) آهنگ بارگذاری بر عمر خستگی تأثیر زیادی ندارد؛ اما در بسامدهای بالاتر، استحکام خستگی کمی بیشتر می شود. بنابراین در بسامدهای بسیار بالا مثلاً ۱۵۰۰۰ هرتز، استقامت خستگی تا ده درصد افزایش پیدا کرده و ماده مورد نظر دیرتر خسته می شود.



ج) شرایط سطح المان و عیوب سطحی

شرایط سطحی یک قطعه نیز می تواند تأثیر زیادی بر عمر خستگی داشته باشد. از آنجایی که خستگی از هر نوع ترک ریز یا نقص در مواد مورد استفاده شروع می شود، شرایط سطحی هر المان سازه میزان استحکام سازه را تحت تأثیر قرار می دهد. همچنین زبری سطح یا خراش های روی آن، می تواند محل هایی مناسب برای تمرکز تنش و ایجاد پدیده خستگی باشد؛ زیرا این پدیده حساسیت زیادی به افزایش تنش دارد و هر چیزی که باعث افزایش تنش شود، می تواند سرعت پدیده خستگی را زیاد کند. به همین دلیل حد استحکام نمونه های صاف و جلا داده شده از نمونه های نورد یا خورد شده بالاتر است.

د) آثار محیطی

زمانی که شرایط محیطی لازم برای خوردگی مانند رطوبت وجود داشته باشد، مقاومت خستگی به میزان چشمگیری کاهش پیدا می کند. همچنین آهنگ خوردگی افزایش پیدا خواهد کرد. برخی از مواد به قدری در این محیط ها حساس هستند که اصلاً حد استحکام خستگی ندارند. مثلاً مس یا آلومینیوم ممکن است حتی در تنش های بسیار پایین دچار شکست ناگهانی شوند. به علاوه هر چه دمای محیط پایین تر باشد، استحکام خستگی بیشتر می شود؛ زیرا اجسام در محیط های سرد منقبض شده و از گسترش ترک ها جلوگیری می کنند.

چه عواملی اثرات خستگی در سازه را کاهش می دهد؟

راهکارهای مختلفی برای این کار وجود دارد؛ اما آنچه رایج است کوبیدن سطح فلزات و یکپارچه سازی بتن ها می باشد. این کار باعث می شود تنش های پسماند فشاری که در برخی لایه های سطحی ایجاد می شود کاهش یابد. در نتیجه از ترک های پدیده خستگی جلوگیری شده و یا حداقل در به وجود آمدن ترک ها تأخیر ایجاد می کند. کار دیگری که می توانیم انجام دهیم سخت کردن سطحی با کربن دهی یا نیتروژن دهی است. همچنین می توان پوشش های الکتریکی روی سطوح فلزی ایجاد کرد.

جمع بندی

همانطور که ملاحظه کردید پدیده خستگی یکی از پدیده های تخریب کننده انواع سازه های بتنی و فلزی است. هر چه عمر خستگی مصالح به کار رفته بالاتر باشد، عمر سازه نیز بیشتر خواهد بود. در صورتی که در هنگام طراحی تجزیه و تحلیل های کافی برای تشخیص میزان مقاومت اعضا در برابر پدیده خستگی انجام نشود، سازه مورد نظر دچار خرابی های شدید خواهد شد.