تکنیسین دکمه‌زن یا مهندس الایمنت؟

مرز باریک میان اپراتوری لیزر و فهم مکانیک ماشین

آیا یک تکه کاغذِ چهارلا شده، سرنوشت یک توربوکمپرسور ۳۰ مگاواتی را تعیین می‌کند؟

این سؤالی نبود که در کتاب‌های دانشگاهی‌ام خوانده باشم. این سؤالی بود که ده سال پیش، وسط هیاهوی سالن توربین یک مجتمع عظیم پتروشیمی، وقتی صدای جیغ ناهنجار یاتاقان‌ها حتی از پشت گوشی‌های حفاظتی هم مغز را می‌خراشید، مثل پتک بر سرم فرود آمد. توربین تازه اورهال شده بود. پیمانکار، یک زونکن زردِ ضخیم دستش گرفته بود و با افتخار به برگه‌های پرینت دستگاه الایمنت لیزری پیشرفته‌اش اشاره می‌کرد؛ همه‌چیز سبز بود، دهم‌های میلی‌متر روی صفحه دیجیتال، لبخندِ تایید می‌زدند. اما وقتی دستگاه استارت خورد، لرزش شفت بالا رفت و دما به مرز سرخ‌شدن رسید.

کمی آن‌طرف‌تر، یک استادکار قدیمی تعمیرات، در حالی که فنجان چای کم‌رنگش را دستش گرفته بود، نگاهی به گشتاور بستن پیچ‌های پای دستگاه انداخت، لبخندی تلخ زد و گفت: «مهندس! لیزرِ چند صد میلیونی وقتی "پای نرم" ماشین رو نفهمه، فقط یک اسباب‌بازی گرون‌قیمته برای تایید کردنِ اشتباهاتمون!» همان‌جا بود که فهمیدم خط باریکی میان «تکنیسینی که دکمه‌های یک دستگاه لیزر را فشار می‌دهد» و «متخصصِ واقعی الایمنت که رفتار متالورژیکی و مکانیکی ماشین را حس می‌کند» وجود دارد.

اگر امروز شما در جایگاه مدیر نگهداری و تعمیرات (نت) یا کارشناس ارشد یک پلنت صنعتی بزرگ باشید، احتمالاً با این کابوس آشنا هستید:
ماشین‌آلات حساس دچار شکست شفت، کچلی یاتاقان یا نشتی مکرر سیل مکانیکی می‌شوند و هر بار پیمانکار یا نیروی داخلی مدعی است که: «الایمنت دستگاه صفرِ صفر است!».

چالش بزرگ: چطور در ۱۰ دقیقه، عیارِ یک مدعی الایمنت را بسنجیم؟

فرض کنید در آستانه یک اورهال حیاتی هستید یا یک پمپِ چندمرحله‌ای تغذیه دیگ بخار (Boiler Feed Pump) از مدار خارج شده و خط تولید متوقف است. فردی روبروی شما ایستاده که مدعی است «استادِ الایمنت صنعتی» است؛ هم الایمنت ساعتی (Dial Indicators) را فوتِ آب است و هم جدیدترین سیستم‌های لیزری را در کیفش دارد. شما وقت ندارید او را پشت دستگاه بفرستید تا بعد از چند روز آزمون و خطا، متوجه کیفیت کارش شوید. شما فقط و فقط **۳ سؤال قدرتمند و کلیدی** فرصت دارید تا مغز او را کالبدشکافی کنید و بفهمید آیا او یک «اپراتورِ دستگاه» است یا یک «معمارِ هم‌محوری ماشین‌آلات».

اگر من جای شما بودم، صندلی را جلو می‌کشیدم، به چشمانش نگاه می‌کردم و این ۳ سؤال حیاتی را می‌پرسیدم. پاسخ‌های او، مرز میان یک فاجعه چند میلیارد تومانی و یک کارکردِ بی‌نقصِ ده ساله را مشخص می‌کند.

سؤال اول: «وقتی دستگاه لیزر به شما می‌گوید کوپلینگ در جهت عمودی ۰/۱۵ میلی‌متر بالاتر است، قبل از دست زدن به شیمزها (Shims)، چگونه مطمئن می‌شوید که این عدد واقعی است و ناشی از "پای نرم" یا "خطای افتادگی فیکسچر" نیست؟»

روایت پشت این سؤال:

یک بار در یک مجتمع فولادی، برای هم‌محوری یک الکتروموتور ۶ کیلوولتی و یک فن مکنده بزرگ دعوت شدم. تیم قبلی اصرار داشت که موتور باید شیمزگذاری شود، اما هر بار که پیچ‌ها را سفت می‌کردند، عدد الایمنت به

طرز عجیبی تغییر می‌کرد. آن‌ها در تله‌ی **Soft Foot (پای نرم)** افتاده بودند؛ پدیده‌ای که مثل پای لنگ یک صندلی در رستوران است، اما وقتی این صندلی یک موتور ۱۰ تنی با سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه باشد، به جای کمی تکان خوردن، پوسته ماشین را دفرمه می‌کند، یاتاقان‌ها را تحت فشار قرار می‌دهد و نتایج الایمنت را به یک دروغ بزرگ تبدیل می‌کند.

پاسخ متخصص واقعی در برابر اپراتور معمولی:

- **اپراتور معمولی می‌گوید:** «خب مهندس، من اول پیچ‌ها را محکم می‌بندم، بعد دستگاه لیزر خودش قابلیت چک کردن پای نرم را دارد؛ دکمه‌اش را می‌زنم و اگر خطا داد، زیر همان پایه شیمز می‌گذارم!»
- **متخصص واقعی به شما خواهد گفت:** «قبل از روشن کردن لیزر یا بستن ساعت، من باید ریخت‌شناسی و سلامتِ سطحِ فونداسیون و پایه‌های ماشین (Baseplate) را بررسی کنم. پای نرم فقط با یک دکمه حل نمی‌شود. ما چهار نوع پای نرم داریم:

۱. پای نرم موازی (Parallel Soft Foot)

۲. پای نرم زاویه‌ای (Angular Soft Foot)

۳. پای نرم ناشی از جهش پوسته (Spring Rate Soft Foot)

۴. پای نرم القایی (Induced Soft Foot) که ناشی از نیروی لوله‌هاست.»

او ادامه خواهد داد: «من ابتدا با یک فیلرگیج (Feeler Gauge) با ضخامت ۰.۰۵ میلی‌متر تک‌تک پایه‌ها را در حالت شل بودن پیچ‌ها چک می‌کنم. اگر ساعت اندیکاتور بسته باشم، برای الایمنت به روش Rim and Face، ابتدا

خطای افتادگی کلمپ یا فیکسچر (Sag) را محاسبه می‌کنم. چون می‌دانم حتی محکم‌ترین فیکسچرهای فلزی هم تحت وزن خودشان و ساعت، در موقعیت ساعت ۱۲ نسبت به ساعت ۶، چند صدم میلی‌متر خم می‌شوند (Sag رخ می‌دهد). اگر این افتادگی را در محاسبات فرمول الایمنت ساعتی لحاظ نکنم، تمام شیمزهایی که زیر ماشین می‌گذارم غلط خواهند بود، حتی اگر دستگاه لیزر گران‌قیمت هم استفاده کنم، اگر سنسورها را درست کالیبره نکرده باشم و اثر پای نرم زاویه‌ای را نادیده بگیرم، فقط دارم یک خطای پنهان را در سیستم قفل می‌کنم.»

سؤال دوم: «فرض کنید پمپ سانتریفیوژ انتقال سیال داغ با دمای کاری ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد را در حالت سرد، کاملاً صفر الایمنت کرده‌اید. پس از استارت و رسیدن به دمای کاری، ماشین شدیداً می‌لرزد. خطا کجاست و شما چگونه "رشد حرارتی" را قبل از استارت محاسبه و پیش‌بینی می‌کنید؟»

روایت پشت این سؤال:

دنیای صنعت، دنیای پویایی و تغییر است. ماشین‌آلات در حالت خاموش و سرد، با حالت روشن و داغ، دو موجود کاملاً متفاوت هستند. سال‌ها پیش در یک نیروگاه، با یک توربین بخار کوچک روبرو شدم که در حالت سرد، الایمنت آن توسط یک تیم به صورت میلی‌متری و با دقت بالا انجام شده بود. اما به محض ورود بخار و بالا رفتن دما، یاتاقان سمت کوپلینگ شروع به دود کردن کرد. مقصر چه بود؟ عدم درک **رشد حرارتی (Thermal Growth)**. آهن تشنه‌ی منبسط شدن است؛ وقتی پمپ یا توربین داغ می‌شود، شفت آن به سمت بالا، پایین یا طرفین حرکت می‌کند. ما نباید ماشین را در حالت سرد "کاملاً راست" کنیم؛ ما باید آن را در حالت سرد به

گونه‌ای "کج" (Offset) الایمنت کنیم که وقتی داغ شد، تازه به وضعیت صفر-صفر برسد!

پاسخ متخصص واقعی در برابر اپراتور معمولی:

- **اپراتور معمولی می‌گوید:** «ما دستگاه را روشن می‌کنیم تا داغ شود، بعد سریع آن را خاموش می‌کنیم، کوپلینگ را باز می‌کنیم و در عرض چند دقیقه تا داغ است دوباره الایمنت را چک می‌کنیم!» (این یک اشتباه سنتی و خطرناک است؛ چرا که به محض خاموش شدن ماشین، قطعات به صورت ناهمگون خنک می‌شوند و خطای ایمنی کار با قطعات داغ نیز بسیار بالاست).
- **متخصص واقعی به شما خواهد گفت:** «من هرگز به حدس و گمان یا روش سنتیِ "خاموش کن و سریع بگیر" اتکا نمی‌کنم. من برای محاسبه رشد حرارتی از فرمول انبساط طولی استاندارد استفاده می‌کنم:

$$\sigma L = L * \alpha * \sigma T$$

که در آن L فاصله مرکز شفت تا کف پایه، α ضریب انبساط حرارتی متالورژی پوسته (چدن، فولاد کربنی یا استنلس استیل) و ΔT اختلاف دمای محیط با دمای کاری یاتاقان است.

علاوه بر محاسبات تئوریک، اگر تجهیز بسیار حساس باشد، از تکنیک‌های روز دنیا مثل **Offline to Online Alignment (OL۲R)** با استفاده از سنسورهای لیزری پیوسته که روی پوسته نصب می‌شوند و تغییرات مکانیکی را از لحظه استارت تا رسیدن به پایداری حرارتی مانیتور می‌کنند، استفاده می‌کنم. من پمپ داغ را در حالت سرد، عمداً به اندازه محاسبه شده

(مثلاً ۰.۲ میلی‌متر پایین‌تر) قرار می‌دهم تا پس از انبساط، دو محور هم‌راستا شوند.»

سؤال سوم: «اگر در حین الایمنت به روش ساعتی (Dial Indicators)، مجموع خوانده‌های ساعت در موقعیت‌های بالا و پایین با مجموع خوانده‌های چپ و راست برابر نباشد (قانون اعتبار سنجی قانون ۶-۳-۱۲-۹)، چه اتفاقی در حال رخ دادن است و چگونه متوجه می‌شوید شفت دچار "لقی محوری" یا "دو پهن بودن" است؟»

روایت پشت این سؤال:

ساعت‌های اندیکاتور (عقربه‌ای)، زبانِ گویای ماشین هستند، اما به شرطی که الفبای آن‌ها را بلد باشید. در پروژه‌ای برای اورهال پمپ‌های اورهپینگ (OH۲)، تکنیسینی را دیدم که کلافه شده بود. او اعداد ساعت را یادداشت می‌کرد، اما هر بار که شفت را ۳۶۰ درجه می‌چرخاند، اعداد با هم نمی‌خواندند. ریاضیات در حال دروغ گفتن نبود، ماشین داشت حقیقتی را فریاد می‌زد که تکنیسین نمی‌شنید: شفت پمپ دارای بازی محوری (Axial Float) بیش از حد بود و هر بار که شفت چرخیده می‌شد، کمی به جلو و عقب حرکت می‌کرد و سوزن ساعت را فریب می‌داد.

پاسخ متخصص واقعی در برابر اپراتور معمولی:

- **اپراتور معمولی می‌گوید:** «ساعت خراب است یا پایه‌اش شل شده! کمی گریس می‌زنیم یا ساعت را عوض می‌کنیم تا اعداد بهتر شوند!»
- **متخصص واقعی به شما خواهد گفت:** «این نشان‌دهنده نقض **قانون ریاضی ریاضی الایمنت ساعتی** یا همان قانون Validity Check است.

ما می‌دانیم که در چرخش کامل شفت، همواره باید رابطه زیر برقرار باشد:

Top + Bottom = Left + Right

اگر این تساوی با تلرانس بسیار کمی (در حد ۰.۰۱ میلی‌متر) برقرار نباشد، من بلافاصله کار را متوقف می‌کنم. این عدم تساوی سه علت عمده دارد:

۱. بازی محوری شفت (End Float) که روی ساعت‌های Face اثر می‌گذارد.

۲. لقی داخلی یاتاقان‌ها (Internal Clearance) یا ناپایداری روتور.

۳. خمیدگی شفت (Bent Shaft) یا دوپهن بودن محل استقرار ساعت (Out of Roundness).

یک متخصص واقعی با بستن یک ساعت کمکی در جهت محوری، ابتدا حرکت رفت و برگشتی شفت را خنثی یا اندازه‌گیری می‌کند و سپس با استفاده از روش **Reverse Indicator** (که در آن اثر لقی محوری شفت به حداقل می‌رسد) یا با سوئیچ کردن روی سیستم لیزری کالیبره شده با سنسورهای دوتایی (Dual PSD)، این خطا را حذف می‌کند.»

راهنمای جامع الایمنت صنعتی: از تئوری عقربه‌ها تا انقلاب لیزر

حال که با این سه سؤال توانستید عیار متخصص خود را بسنجید، بیایید عمیق‌تر به دنیای الایمنت سفر کنیم؛ جایی که دانش مهندسی مکانیک، متالورژی و ریاضیات کاربردی با هم تلاقی می‌کنند تا طول عمر تجهیزات دوار را تضمین کنند.

چرا ناهم‌راستایی (Misalignment) قاتل خاموش پلنت‌های صنعتی است؟

وقتی دو شفت به طور دقیق هم‌راستا نباشند، کوپلینگ واسط مجبور است در هر دور چرخش، نیروی برشی و خمشی عظیمی را تحمل و منتقل کند. اگر یک موتور با سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه بچرخد، این یعنی در هر ثانیه، ۵۰ بار نیروی ضربه‌ای به یاتاقان‌ها، سیل مکانیکی و شفت وارد می‌شود.

پیامد ناهم‌راستایی	مکانیسم تخریب	نشانه شهودی در پلنت
تخریب سیل مکانیکی	دفرمه شدن لبه‌های آب‌بند و ورود لرزش به وجوه کربنی	نشتی مکرر سیال و توقف خط
کچلی و خستگی یاتاقان	تمرکز بار غیریکنواخت روی ساچمه‌ها و رولرها	بالا رفتن دمای یاتاقان و صدای جیغ
برش پیچ‌های کوپلینگ	تنش‌های تسلیم و خستگی متناوب (Fatigue)	کنده شدن ناگهانی کوپلینگ
افزایش مصرف انرژی	هدر رفتن توان مکانیکی به صورت گرما در کوپلینگ	بالا رفتن جریان مصرفی موتور (آمپر کشیدن)

انواع ناهم‌راستایی که باید بشناسید

یک متخصص باید بداند که ما با یک خطای ساده روبرو نیستیم. در فضا، دو خط می‌توانند نسبت به هم دو نوع انحراف داشته باشند:

۱. ناهم‌راستایی موازی یا جابجایی (Offset / Parallel Misalignment)

در این حالت، محور دو شفت با هم موازی هستند اما در یک راستا نیستند. به این معنی که مراکز آن‌ها با هم فاصله‌ای به نام O دارند.

۲. ناهم‌راستایی زاویه‌ای (Angular Misalignment)

در این وضعیت، محورها موازی نیستند و با یکدیگر زاویه‌ای به نام θ می‌سازند. این خطا باعث می‌شود که فاصله بین دو وجه کوپلینگ در بالا و پایین یا چپ و راست یکسان نباشد.

نکته کلیدی متخصص: در واقعیت، ما همیشه با **ناهم‌راستایی ترکیبی (Combined Misalignment)** روبرو هستیم؛ یعنی شفت‌ها هم جابجایی دارند و هم زاویه، آن هم در هر دو صفحه عمودی (Vertical) و افقی (Horizontal).

متدولوژی‌های الایمنت: از خط‌کش تا نور منسجم (لیزر)

۱. روش‌های سنتی (خط‌کش و فیلرگیج)

این روش تنها برای تجهیزات بسیار کوچک، با دور پایین و ترجیحاً با کوپلینگ‌های انعطاف‌پذیر لاستیکی (مثل پمپ‌های کوچک آب ساختمانی) مجاز است. در صنایع بزرگ، استفاده از این روش روی تجهیزات حساس، چیزی شبیه به خودکشی صنعتی است.

۲. روش‌های ساعتی (Dial Indicators)

ساعت‌های اندیکاتور با دقت ۰.۰۱ میلی‌متر، هنوز هم در بسیاری از پالایشگاه‌ها و پتروشیمی‌ها به عنوان استاندارد مرجع شناخته می‌شوند. دو تکنیک اصلی در این روش عبارتند از:

- **روش Rim and Face:** یک ساعت روی محیط کوپلینگ (Rim) برای خواندن خطای موازی و ساعت دیگر روی وجه کوپلینگ (Face) برای خواندن خطای زاویه‌ای قرار می‌گیرد. این روش برای مواردی که فاصله بین دو کوپلینگ کم است، عالی است اما به بازی محوری شفت حساس است.
- **روش Reverse Indicator (ساعتی متقابل):** در این روش، دو ساعت به طور هم‌زمان روی محیط شفت یا کوپلینگ مقابل بسته می‌شوند. این روش به شدت دقیق است، اثر لقی محوری شفت در آن حذف می‌شود و برای ماشین‌آلات با شفت‌های بلند یا اسپیسر (Spacer) بهترین گزینه ساعتی است. محاسبات این روش بر پایه روابط هندسی و تالس انجام می‌شود:

$$X = D * (S1 - S2)/2C$$

۳. انقلاب الایمنت لیزری (Laser Alignment)

سیستم‌های لیزری با استفاده از دیودهای گسیل‌کننده نور منسجم و سنسورهای دقیق اثر موقعیت (PSD)، محاسبات پیچیده ریاضی را در کسری از ثانیه انجام می‌دهند.

مزایای سیستم لیزری:

- حذف خطای انسانی در خواندن عدد ساعت.
- حذف خطای افتادگی فیکسچر (Sag).
- محاسبه آنلاین شیمزهای مورد نیاز برای پایه‌های جلو و عقب به صورت گرافیکی (Live Move).

- قابلیت ذخیره‌سازی داده‌ها و صدور گزارش رسمی (Report) جهت مستندسازی سیستم‌های مدیریت دارایی فیزیکی و ISO.

چک‌لیست طلایی یک الایمنت بی‌نقص (توصیه به مدیران نت)

برای اینکه مطمئن شوید فرآیند هم‌محوری در کارگاه یا سایت شما به درستی انجام می‌شود، این پروتکل ۵ مرحله‌ای را به عنوان دستورالعمل اجباری (SOP) ابلاغ کنید:

۱. **تمیزکاری و آماده‌سازی فونداسیون (Pre-Alignment):** هرگونه زنگ‌زدگی، پلیسه، رنگ اضافه زیر پایه‌های ماشین و بستر باید با سنگ‌زدن و صیقل‌کاری حذف شود. شیمزهای قدیمی، کج شده یا زنگ‌زده باید دور ریخته شوند و با شیمزهای استاندارد استنلس استیل (SS۳۰۴) جایگزین گردند.

۲. **رفع تنش لوله‌ها (Pipe Strain Check):** لوله‌های متصل به پمپ نباید بار خود را روی پوسته بیندازند. برای تست، ساعت اندیکاتور را روی کوپلینگ بگذارید و فلنج‌های لوله را باز کنید. اگر لرزش سوزن ساعت بیش از ۰.۰۵ میلی‌متر بود، تنش لوله بالاست و باید اصلاح شود.

۳. **تست و رفع پای نرم (Soft Foot):** طبق پروتکلی که در سؤال اول ذکر شد، پای نرم باید به زیر ۰.۰۵ میلی‌متر برسد.

۴. **محاسبه و اعمال رشد حرارتی و تلرانس‌ها:** بر اساس استاندارد جهانی **ISO ۱۰۸۱۶** یا استاندارد **API ۶۱۰** (برای پمپ‌های سانتریفیوژ صنایع نفت و گاز)، تلرانس مجاز الایمنت بر اساس دور ماشین تعیین می‌شود. به عنوان مثال، برای دور ۳۰۰۰ دور بر دقیقه، حداکثر

جابجایی موازی مجاز ۰.۰۴ میلی‌متر و حداکثر انحراف زاویه‌ای مجاز ۰.۰۴ میلی‌متر در ۱۰۰ میلی‌متر قطر است.

۵. **سفت کردن نهایی با گشتاور مشخص (Torque Wrench):** پیچ‌های پایه نباید با آچار معمولی و نیروی دست نامشخص سفت شوند. استفاده از آچار گشتاور (ترکمتر) به صورت ضربدری و در ۳ مرحله (۳۰٪، ۶۰٪ و ۱۰۰٪ گشتاور نامی) الزامی است.

سخن پایانی: از اپراتوری تا تخصص و مِنتورشیپ صنعتی

صنعت امروز ما بیش از آنکه به «دستگاه‌های گران‌قیمت» نیاز داشته باشد، به «ذهن‌های تحلیل‌گر» نیاز دارد. الایمنت، یک مهارت روتین و مکانیکی صرف نیست؛ هنرِ درک زبانِ ماشین و رفتار متالورژیکی آن تحت تنش، دما و گشتاور است. وقتی شما به عنوان یک مدیر یا کارشناس تعمیرات، با این دیدگاه و عمیق به سراغ عارضه‌یابی ماشین‌آلات می‌روید، نه تنها از توقف‌های ناگهانی تولید جلوگیری می‌کنید، بلکه بستری برای انتقال دانش واقعی و تربیت نسل بعدی متخصصان پلنت خود فراهم می‌سازید. دفعه بعد که کسی مدعی تخصص الایمنت شد، این ۳ سؤال را بپرسید و بگذارید دانشِ پشت پاسخ‌ها، راه را برای شما روشن کند.

نویسنده : علی منتظرالظهور تابستان ۱۴۰۵

منابع و مراجع علمی (References)

۱. **کتاب راهنمای الایمنت شفت صنعتی**

Industrial Shaft Alignment Training Manual, John Piotrowski, CRC Press, ۲۰۰۸. (مرجع جامع محاسبات ریاضی و متدولوژی‌های الایمنت).

۲. **استاندارد انستیتو نفت آمریکا (API Standard ۶۱۰)**

Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries, ۱۱th Edition. (بخش مربوط به لرزش مجاز، تنش لوله‌ها و تلرانس‌های هم‌محوری).

۳. **کتاب تکنولوژی الایمنت لیزری**

Michael V. Supchak, Maintenance Technology Publications, ,*Laser Alignment Technics for Rotating Machinery* ۲۰۱۵.

۴. **استاندارد بین‌المللی ارزیابی لرزش ماشین‌آلات (ISO ۱۰۸۱۶-۳)**

Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts.

۵. **مجموعه مقالات تخصصی شرکت پودالِو (Prüftechnik white papers)**

Thermal Growth and Soft Foot Analysis in Hydrocarbon Pumps, ۲۰۲۱.

Montazeralzohour
Leadership, Mentor, Coach