شرکت مهندسی فربد صنعت ایرانیان

مقاله‌ی تخصصی تجهیزات دوار، متالورژی و فناوری ساخت قطعات حساس صنعتی

# پروانه‌ای که کپی نمی‌شود

## روایت مهندسی معکوس و بومی‌سازی پروانه‌ی پمپ‌های اسلری و وارمن

### کالبدشکافی چالش‌های هندسی، شبیه‌سازی انجماد، میکروآلیاژسازی و عملیات حرارتی در ساخت قطعات ضدسایش

تهیه و تدوین: آرزو آذرپرور

واحد مهندسی ، تحقیق و توسعه‌ی شرکت فربد صنعت ایرانیان

### پرسش کلیدی و چالش بنیادین صنعت

**چرا پروانه‌ای که با نرم‌افزار شبیه‌سازی ریخته‌گری شده، آنالیز شیمیایی‌اش درست است و ابعادش هم تقریباً دقیق، چند هفته پس از نصب در سایت به کاویتاسیون، ترک ریشه‌ی پره و افت شدید راندمان می‌رسد؟ و چرا خروجی بسیاری از کارگاه‌ها با استاندارد کارخانه‌ی سازنده‌ی اصلی، به‌جای یک تفاوت جزئی، یک فاصله‌ی ساختاری دارد؟**

ساعت سه بامداد است و خط انتقال اسلری یکی از واحدهای فولاد، مس یا فرآوری معدن ایستاده است. پمپ را باز می‌کنند. پروانه‌ای که فقط چند هفته پیش نصب شده، در ریشه‌ی یکی از پره‌ها ترک خورده و لبه‌ی ورودی پره‌ها حفره‌دار و خورده‌شده است. برگه‌ی بازرسی همین قطعه می‌گوید ابعاد در محدوده‌ی تلرانس است، آنالیز شیمیایی مطابق است و کارگاه سازنده هم از «شبیه‌سازی ریخته‌گری» حرف زده بود.

این صحنه در صنایع ما بیش از آنچه فکر می‌کنیم تکرار می‌شود و هر بار جمله‌ی آشنایی هم شنیده می‌شود: «ما که همه‌چیز را مثل نمونه‌ی اصلی ساختیم.» مسئله دقیقاً همین‌جاست. **شباهت ظاهری با شباهت رفتاری یکی نیست.** پروانه‌ای که از بیرون شبیه نمونه‌ی اصلی است، اگر زاویه‌ی ورودی

پره‌اش چند درجه جابه‌جا شده باشد، اگر ساختار کاربیدی‌اش درشت و ناهمگن باشد یا اگر در کوره شوک حرارتی دیده باشد، در سایت همان رفتاری را نشان می‌دهد که در آن بامداد دیدیم.

این مقاله روایت ما از همین مسئله است؛ از اینکه در فربد صنعت ایرانیان، پروانه‌ی پمپ‌های اسلری و وارمن (Warman) را چگونه از یک قطعه‌ی ساییده‌شده به قطعه‌ای هم‌رفتار با نمونه‌ی اصلی تبدیل می‌کنیم، چه نقطه‌هایی مردم را زمین می‌زند و کدام نکته‌ها را فقط کارگاه و کوره یاد می‌دهد، نه کتاب.

### نقشه‌ی راه این مقاله

ابتدا می‌بینیم چرا پروانه سخت‌ترین قطعه‌ی پمپ اسلری است. بعد از هندسه و تله‌ی اسکن قطعه‌ی ساییده شروع می‌کنیم، به ریخته‌گری و شبیه‌سازی انجماد می‌رسیم، سراغ مهندسی ذوب و میکروآلیاژ می‌رویم، از ماشین‌کاری و عملیات حرارتی می‌گذریم و در پایان به کنترل کیفیت، جدول عیب‌یابی سایت و فهرست پرسش‌هایی می‌رسیم که پیش از سفارش هر پروانه باید از سازنده بپرسید.

بخش اول

## چرا ساخت پروانه‌ی وارمن این‌قدر دشوار است؟

در صنایع سنگین و مادر، مانند فولاد، پتروشیمی، مس و معدن، پمپ‌های سانتریفیوژ قلب جریانی خطوط تولید هستند. در حوزه‌ی انتقال اسلری و مواد ساینده، برند وارمن (Warman) سال‌هاست مرجع جهانی این صنعت به شمار می‌آید و بسیاری از واحدهای ما با همین پمپ‌ها کار می‌کنند.

مشکل از جایی شروع می‌شود که پروانه ساییده می‌شود. پمپ اسلری ذاتاً مصرف‌کننده‌ی قطعه‌ی یدکی است؛ ذراتی که از داخل آن عبور می‌کنند هر روز بخشی از فلز را می‌برند. حدود بیست سال است که تأمین قطعات مصرفی پمپ‌های صنعتی از سازندگان معتبر دنیا با مانع تحریم روبه‌رو شده و بومی‌سازی از یک انتخاب به یک ضرورت تبدیل شده است. این مشکل برای پمپ‌های اسلری شدیدتر است، چون عمر قطعات آن‌ها کوتاه‌تر است و نیاز به قطعه‌ی یدکی بیشتری دارند.

از میان همه‌ی این قطعات، ساخت پروانه با فاصله‌ی زیاد تکنیکال‌تر و دشوارتر است. دلیلش ساده است: در یک قطعه، چهار تخصص هم‌زمان باید درست از آب درآیند.

- هیدرولیک: هندسه‌ی سه‌بعدی و زاویه‌ی دقیق پره‌ها که راندمان و الگوی سایش را تعیین می‌کند.
- ریخته‌گری: شکل پیچیده‌ی روبسته، ماهیچه‌ی بزرگ و مقاطع نازک و ضخیم کنار هم.
- متالورژی: چدن سفید پرکروم، آلیاژی بسیار سخت و در عین حال ترد و حساس.
- ماشین‌کاری و عملیات حرارتی: دو مرحله‌ای که روی آلیاژ ترد، کوچک‌ترین بی‌دقتی را با ترک تلافی می‌کنند.



تصویر شماره ۱: نمونه‌ی واقعی پروانه‌ی ریخته‌گری‌شده‌ی پمپ اسلری وارمن (Warman) پیش از ماشین‌کاری تکمیلی و کنترل ابعادی

### قاعده‌ای که از تجربه آموختیم

اگر یکی از این چهار تخصص ضعیف باشد، سه‌ی دیگر نمی‌توانند جبرانش کنند. پروانه‌ای با هندسه‌ی عالی و ریزساختار بد، و پروانه‌ای با متالورژی عالی و زاویه‌ی ورودی غلط، هر دو در سایت زودتر از انتظار از کار می‌افتند.

بخش دوم

# مهندسی معکوس واقعی یا کپی‌کاری؟

## نگاه جزیره‌ای؛ اشتباه رایج

در بسیاری از کارگاه‌ها مهندسی معکوس به دو کار خلاصه می‌شود: از قطعه یک نقشه برای ساخت مدل بگیر و از آن یک آنالیز برای تهیه‌ی ذوب بردار. این نگاه جزیره‌ای است. نقشه‌ی دقیق و اصولی پروانه دست‌کم به اندازه‌ی آنالیز شیمیایی یا عملیات حرارتی در عمر قطعه نقش دارد، چون هندسه‌ی پره‌هاست که تعیین می‌کند جریان چگونه وارد پروانه شود، چگونه شتاب بگیرد و ذرات ساینده کجا به فلز برخورد کنند.

قطعه‌ای هم که روی میز ماست، فقط یک عضو از یک مجموعه است. از کنار هم قرار گرفتن قطعات، مکانیزم‌ها شکل می‌گیرند و از کنار هم قرار گرفتن مکانیزم‌ها، تجهیز. پروانه را باید در کنار لاینرهای مکش و پشت، محفظه‌ی پمپ و شرایط واقعی پمپاژ، یعنی غلظت، دانه‌بندی ذرات، دبی و هد، تحلیل کرد. به همین دلیل مهندسی معکوس واقعی کار یک تیم چندتخصصی است، نه یک نفر با کولیس و ذوب.

**ما در فربد همواره کوشیده‌ایم نیاز مشتری را فراتر از خواسته‌ی اولیه‌اش ببینیم. مشتری می‌گوید «یک پروانه بساز»؛ نیاز واقعی او این است که پمپش با همین پروانه تا زمان مشخصی بدون توقف کار کند. مسیر ما برای رسیدن به این نیاز، سه گام اساسی دارد.**

## سه گام بنیادین

| گام | اقدام | چرا حیاتی است |
|---|---|---|
| ۱. تحلیل عملکردی | درک ارتباط پروانه با قطعات مجاور و مستندسازی دقیق عملکرد آن با کوچک‌ترین جزئیات | پروانه‌ای که با لاینر و محفظه هماهنگ نباشد، حتی با هندسه‌ی درست هم راندمان نمی‌دهد |
| ۲. مستندسازی هندسی | اسکن سه‌بعدی و کروکی‌برداری دقیق با هدف حذف خطای سایش، و راستی‌آزمایی نتیجه با نرم‌افزارهای شبیه‌ساز | اگر خطای سایش حذف نشود، کپی‌کردن سایش را به قطعه‌ی نو منتقل می‌کند |
| ۳. مهندسی معکوس متالورژیکی | شناسایی مشخصات نمونه‌ی سازنده‌ی اصلی با XRF، کوانتومتری، سختی‌سنجی، ضخامت‌سنجی پوشش و متالوگرافی | آنالیز و ریزساختار، نصف شناسنامه‌ی کارکرد قطعه‌اند |

## تله‌ی اسکن قطعه‌ی ساییده

اگر پروانه‌ای را که هزاران ساعت کار کرده اسکن کنید، سایش را هم اسکن کرده‌اید. لبه‌ی ورودی پره‌ها گرد شده، ضخامت پره‌ها تغییر کرده و زاویه‌ی ورودی دیگر زاویه‌ی طراحی نیست. وقتی از چنین مدلی نقشه بگیرید و الگو بسازید، خطای سایش مستقیماً به پروانه‌ی نو منتقل می‌شود. الگوی قدیمی و فرسوده هم، خودش خطای دیگری اضافه می‌کند. در مقایسه‌ای که روی یک نمونه‌ی کپی‌شده به روش سنتی انجام دادیم، سایش مدل انحرافی در حدود ۴٫۵ درجه در زاویه‌ی ورودی پره ایجاد کرده بود.

راه‌هایی که در عمل جواب می‌دهد:

- هندسه را از نواحی کم‌سایش بازسازی کنید، مانند ریشه‌ی پره‌ها نزدیک هاب، سطوح ماشین‌کاری‌شده و نشیمن‌ها، و بخش‌هایی که به جریان ساینده کمتر برخورد می‌کنند.
- بیش از یک پروانه را اسکن کنید، ترجیحاً از پمپ‌ها و زمان‌های کارکرد مختلف، و نتیجه را روی هم بیندازید. بخشی که در همه‌ی نمونه‌ها یکسان است، به طراحی اصلی نزدیک‌تر است.

- هندسه‌ی بازسازی‌شده را با داده‌های پمپ، یعنی دور، قطر، دبی و هد طراحی، و با شبیه‌سازی راستی‌آزمایی کنید. هندسه‌ای که منحنی هد و دبی درستی نمی‌دهد، هنوز آماده‌ی ساخت نیست.
- مدل و جعبه‌ی ماهیچه را با ماشین‌کاری CNC یا روش‌های مدرن بسازید و سایش آن‌ها را در تعداد ریخته‌گری کنترل کنید. مدل چوبی که ده بار قالب‌گیری شده، دیگر همان مدل اول نیست.

## چرا چند درجه این‌قدر مهم است؟

جریان داخل پروانه از قوانین هندسه پیروی می‌کند. معادله‌ی اویلر هد تئوریک پروانه را به سرعت‌های محیطی و مؤلفه‌ی مماسی سرعت مرتبط می‌کند:

$$H_{th} = \frac{u_2 \, c_{u2} - u_1 \, c_{u1}}{g}$$

اگر جریان بدون چرخش وارد پروانه شود، مؤلفه‌ی مماسی سرعت خروجی از زاویه‌ی پره در خروج به دست می‌آید:

$$c_{u2} = u_2 - \frac{c_{m2}}{\tan \beta_2}$$

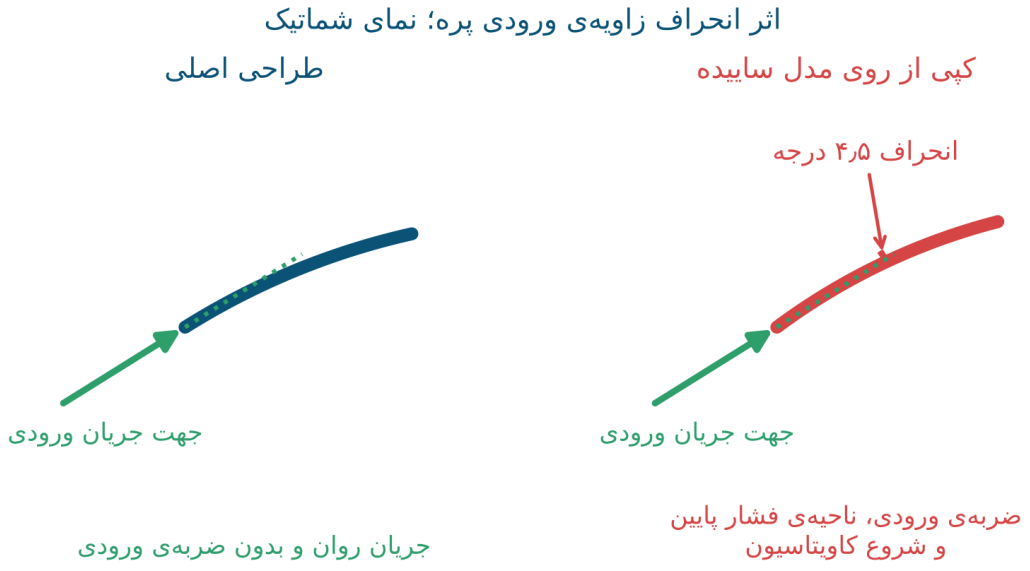
در این روابط u۲ سرعت محیطی در خروجی پروانه، cm۲ مؤلفه‌ی شعاعی سرعت و β۲ زاویه‌ی پره در خروجی است. نکته‌ی عملی در همین رابطه‌ی ساده پنهان است: زاویه، داخل تانژانت می‌نشیند و هر درجه خطا، مستقیماً در هد پمپ ضرب می‌شود.

یک مثال ساده برای حس‌کردن موضوع: پروانه‌ای با قطر ۴۵۰ میلی‌متر را در نظر بگیرید که با دور ۱۴۸۰ دور بر دقیقه می‌چرخد (u۲ حدود ۳۴٫۹ متر بر ثانیه) و cm۲ برابر ۴ متر بر ثانیه است. با زاویه‌ی خروجی ۲۴ درجه، هد

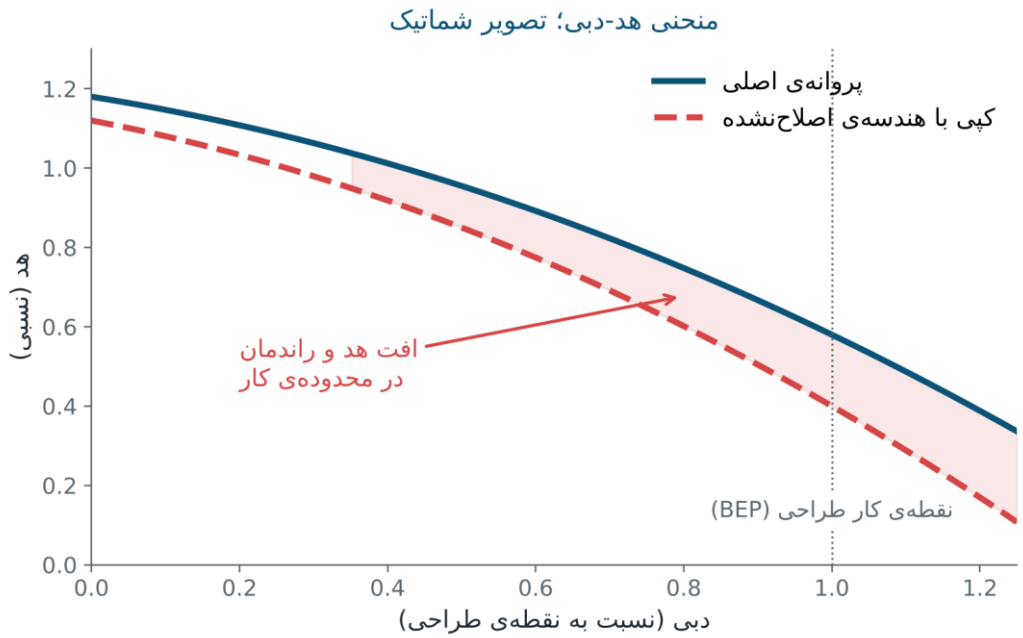
تئوریک حدود ۹۲ متر می‌شود. اگر همین زاویه ۴٫۵ درجه کمتر ساخته شود (۱۹٫۵ درجه)، هد تئوریک به حدود ۸۴ متر می‌رسد، یعنی نزدیک به ۹ درصد افت.

این عدد تئوریک است و برای یک پروانه‌ی ایده‌آل محاسبه شده؛ مقدار واقعی در هر پمپ متفاوت خواهد بود، اما جهت حرکت همین است. اسم این مثال را «فقط برای فهمیدن مفهوم» بگذارید، نه مشخصات یک پمپ واقعی.

خطای زاویه‌ی ورودی پره داستان دیگری دارد. وقتی زاویه‌ی لبه‌ی ورودی با جهت واقعی جریان نسبی هم‌خوان نباشد، جریان به‌جای ورود روان، به لبه‌ی پره ضربه می‌زند. پشت این ضربه یک ناحیه‌ی فشار پایین روی سطح مکش پره پدید می‌آید و اگر فشار از فشار بخار مایع پایین‌تر برود، حباب‌ها شکل می‌گیرند و فرو می‌ریزند. این همان کاویتاسیونی است که در سایت با صدای «شن‌ریزه» و لبه‌ی حفره‌دار پره آشکار می‌شود.




**تصویر شماره ۲: اثر انحراف زاویه‌ی ورودی پره: در طراحی اصلی جریان هم‌جهت با پره وارد می‌شود، اما در کپی ساخته‌شده از مدل ساییده، انحراف حدود ۴٫۵ درجه‌ای ضربه‌ی ورودی و ناحیه‌ی فشار پایین ایجاد می‌کند (طرح شماتیک)**




**تصویر شماره ۳:** مقایسه‌ی شماتیک منحنی هد و دبی پروانه‌ی اصلی با کپی دارای هندسه‌ی اصلاح‌نشده؛ ناحیه‌ی سایه‌خورده نشان‌دهنده‌ی افت هد و راندمان در محدوده‌ی کار است

## نکته‌ی میدانی

هر وقت پروانه‌ی کپی‌شده زودتر از انتظار صدای «شن‌ریزه» داد، پیش از تغییر هر چیز دیگر، هندسه‌ی ورودی پره و NPSH سیستم را کنار هم بررسی کنید. بسیاری از «کاویتاسیون‌های سیستمی»، در واقع کاویتاسیون هندسی‌اند.

بخش سوم

# چالش‌های ریخته‌گری پروانه‌ی روبسته

در پروانه‌ی روبسته، پره‌ها بین دو دیواره قرار دارند و مسیر جریان با یک ماهیچه‌ی بزرگ و پیچیده ساخته می‌شود. هندسه‌ی پیچیده و حجم زیاد ماهیچه باعث می‌شود وقتی قطعه با روش‌های سنتی ریخته شود، معمولاً سه عیب سراغ آن بیایند.

- مک‌های گازی: حفره‌های بزرگ و کوچک گازی در بدنه و مقاطع پروانه.
- نیامد (Misrun): ناقص ماندن پره‌ها و بخش‌های نازک، به دلیل افت سیالیت مذاب.
- ترک‌های انقباضی و گرم: ترک در نواحی حساس و محل اتصال پره‌ها به هاب و دیواره‌ها.

شرکت‌های بزرگ جهانی چون تعداد زیادی از یک مدل پروانه را می‌سازند، معمولاً از ریخته‌گری دقیق (Investment Casting) یا فوم‌ازدست‌رفته (Lost Foam) استفاده می‌کنند و این عیوب در آن‌ها مجال بروز پیدا نمی‌کند. در پروژه‌ی بومی‌سازی ما با تعداد انگشت‌شماری سفارش روبه‌رو هستیم و به ناچار باید از قالب‌گیری ماسه‌ای استفاده کنیم، روشی که اقتصادی و در

دسترس است. پس کاری که قالب‌های گران‌قیمت می‌کنند، باید در ماسه با مهندسی انجام شود.

| عیب | ریشه‌ی رایج | اقدام عملی |
|---|---|---|
| مک گازی | رطوبت یا چسب زیاد در ماسه و ماهیچه، تهویه‌ی ناکافی ماهیچه، گاز محلول در مذاب | خشک‌کردن و کنترل مقدار چسب، طراحی مسیر تهویه‌ی ماهیچه، ذوب‌گیری و گاززدایی |
| نیامد | دمای پایین ریختن، سیالیت کم، راهگاه کند یا نامتقارن | تعیین پنجره‌ی دمای ریختن، اصلاح سیستم راهگاهی، تنظیم ترکیب برای سیالیت |
| ترک گرم و انقباضی | گیرداری ماهیچه، تغییر ناگهانی ضخامت در اتصال پره و هاب، تغذیه‌ی ناکافی | افزایش شعاع اتصال، کاهش گیرداری، تغذیه‌گذاری هاب، استفاده از سرمادهنده |
| حفره‌ی انقباضی | نقطه‌ی داغ در هاب، تغذیه‌ی کوچک یا دیر منجمدشونده‌ی نامناسب | انجماد جهت‌دار و تغذیه‌گذاری کنترل‌شده با کمک شبیه‌سازی |

### نکته‌ی میدانی

**ماهیچه‌ی پروانه‌ی روبسته مثل یک ریه است؛ اگر نتواند نفس بکشد، قطعه گاز می‌خورد. بسیاری از مک‌هایی که به «کیفیت آلیاژ» نسبت داده می‌شوند، در واقع از ماهیچه‌ای می‌آیند که راه فرار گاز نداشته است.**

بخش چهارم

## شبیه‌سازی انجماد؛ ابزار است، نه ضمانت

ما در فربد با نرم‌افزارهای SUTCAST و ProCAST کار می‌کنیم و بسیاری از عیوب را پیش از ریختن، در محیط شبیه‌سازی می‌بینیم و پارامترهای فرآیند را طوری اصلاح می‌کنیم که قطعه با کم‌ترین عیب بریزد. در تدوین تکنولوژی ریخته‌گری، همه‌چیز مستند می‌شود: طراحی مدل، نوع ماسه و چسب، روش قالب‌گیری، نحوه‌ی تهیه‌ی ذوب و حتی آنالیز ذوب با حد و حدود دقیق عناصر، به‌گونه‌ای که مذاب سیالیت مناسبی داشته باشد و گاز موجود در آن به حداقل برسد. به این ترتیب می‌توان با امکانات موجود در کشور، قطعه‌ای کاملاً سالم ریخت.

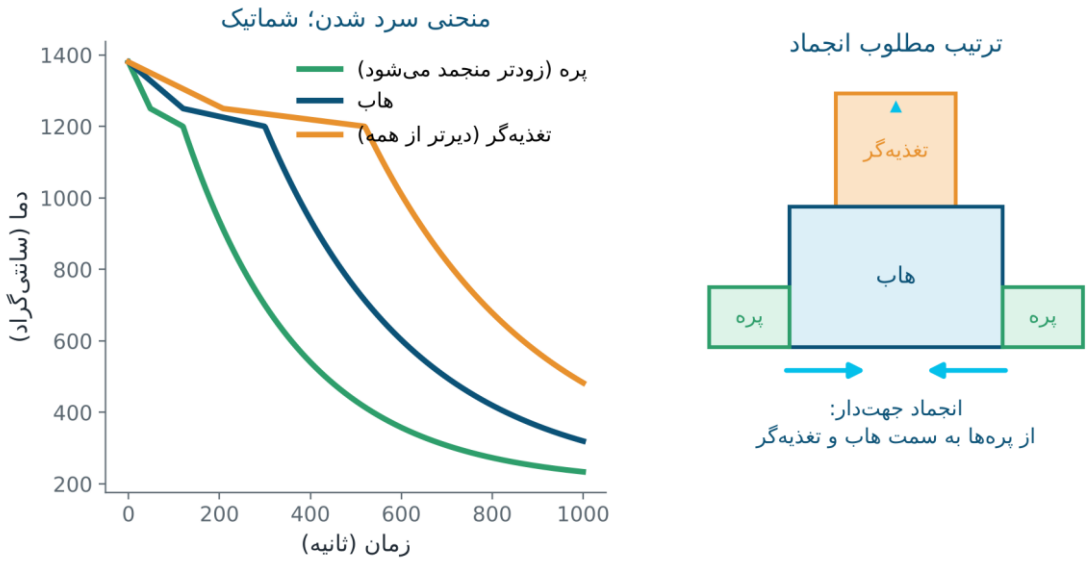
اما به تجربه یاد گرفته‌ایم که شبیه‌سازی بدون واسنجی فقط یک تصویر رنگارنگ است. همین نکته پاسخ بخش بزرگی از پرسش ابتدای مقاله است: چرا با وجود ادعای استفاده از نرم‌افزار پیشرفته، قطعه عیب دارد؟ چون نرم‌افزار همان‌قدر درست می‌گوید که شما درست به آن می‌گویید.

## ضریب انتقال حرارت؛ ورودی‌ای که همه فراموشش می‌کنند

مهم‌ترین ورودی شبیه‌سازی انجماد شاید همان باشد که نرم‌افزار به‌طور پیش‌فرض خودش پر می‌کند: ضریب انتقال حرارت بین قطعه و قالب (HTC). مقدار پیش‌فرض برای یک شرایط عمومی است؛ ماسه‌ی شما، چسب شما، پوشش شما و ضخامت قالب شما با آن شرایط تفاوت دارند. در یکی از مقایسه‌های ما، شبیه‌سازی ProCAST با ضریب پیش‌فرض، حفره‌ی انقباضی را در یک نقطه پیش‌بینی کرد، اما قطعه‌ی واقعی پس از برش، همان حفره را کمی آن‌طرف‌تر نشان داد. وقتی ضریب را با داده‌ی آزمایشی اصلاح کردیم، پیش‌بینی بر واقعیت منطبق شد.

نتیجه‌ی عملی: ما هیچ شبیه‌سازی را نهایی نمی‌دانیم، مگر اینکه یک حلقه‌ی کامل واسنجی را طی کرده باشد.

| مرحله | کار | خروجی |
|---|---|---|
| ۱. شبیه‌سازی اولیه | انجماد و پرشدن قالب با ضرایب اولیه | نقشه‌ی نقاط داغ و حفره‌ی احتمالی |
| ۲. ریخته‌گری آزمایشی | ثبت دما با ترموکوپل در نقاط کلیدی قالب | منحنی‌های سرد شدن واقعی |
| ۳. برش و بررسی | برش قطعه‌ی آزمایشی و بررسی ماکروسکوپی و متالوگرافی | موقعیت واقعی حفره‌ها |
| ۴. واسنجی مجدد | اصلاح ضریب انتقال حرارت تا پیش‌بینی و واقعیت منطبق شوند | مدل قابل اعتماد برای ریختن نهایی |




**تصویر شماره ۴:** منحنی سرد شدن شماتیک بخش‌های مختلف پروانه و ترتیب مطلوب انجماد: پره‌های نازک زودتر، سپس هاب و در آخر تغذیه‌گر منجمد می‌شود تا تغذیه‌گر تا آخرین لحظه به قطعه مذاب برساند

اصل حاکم بر طراحی راهگاه و تغذیه، انجماد جهت‌دار است. پره‌های نازک زودتر از همه سرد می‌شوند، هاب که حجم بیشتری دارد بعد از آن‌ها، و تغذیه‌گر باید آخرین بخشی باشد که منجمد می‌شود تا تا لحظه‌ی آخر بتواند انقباض هاب را جبران کند. در طراحی ما، سیستم راهگاهی پیرامونی و

تغذیه‌گذاری کنترل‌شده‌ی هاب، با همین منطق چیده می‌شود و نمودار انجماد قطعه با داده‌ی واقعی واسنجی می‌شود.

### جمله‌ای که در کارگاه تکرار می‌کنیم

نرم‌افزار همان‌قدر درست می‌گوید که شما درست به آن می‌گویید. قبل از اعتماد به یک شبیه‌سازی بپرسید: ضریب انتقال حرارتش با کدام آزمایش واسنجی شده است؟

بخش پنجم

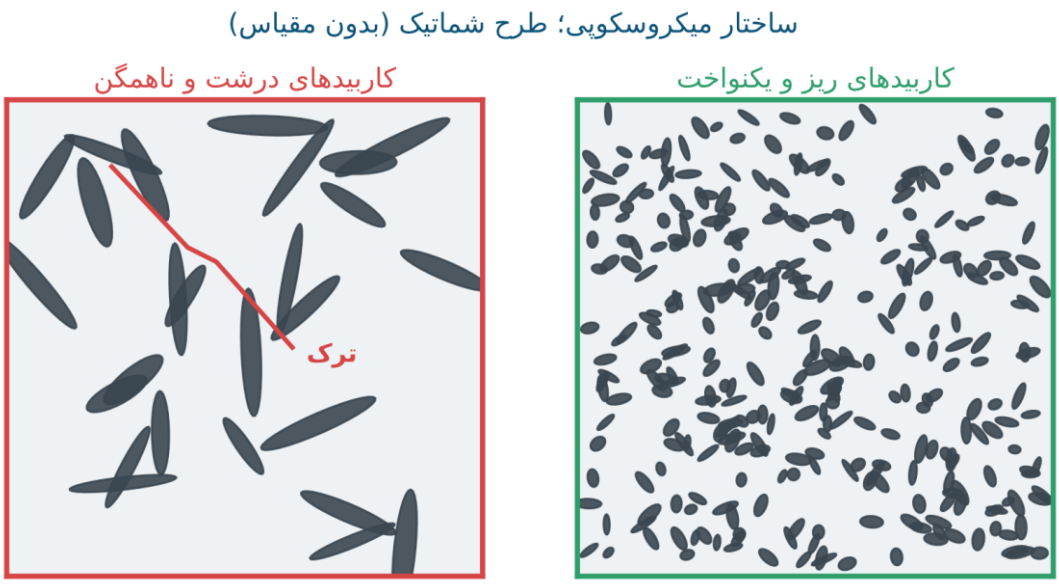
## مهندسی ذوب و میکروآلیاژ؛ آنچه در آنالیز دیده نمی‌شود

پروانه‌ی پمپ‌های اسلری معمولاً از چدن سفید پرکروم ریخته می‌شود تا در برابر دوغاب حاوی ذرات ساینده مقاومت بالایی داشته باشد. در این آلیاژها حدود ۲۵ تا ۲۸ درصد کروم و کربن بالا، کاربیدهای بسیار سختی در زمینه می‌سازند و همین کاربیدها هستند که سایش را تحمل می‌کنند. اما سختی تنها نیمی از ماجراست؛ اندازه، شکل و نحوه‌ی توزیع این کاربیدها است که تعیین می‌کند قطعه سایش را تحمل می‌کند یا از ریشه‌ی پره ترک می‌خورد.

اینجا به یکی از مهم‌ترین نکته‌های تجربی می‌رسیم: دو ذوب با آنالیز شیمیایی یکسان می‌توانند دو رفتار کاملاً متفاوت داشته باشند. تفاوت از سرعت سرد شدن، تعداد مراکز جوانه‌زنی، نحوه‌ی عملیات روی مذاب و مقدار گاز موجود در آن می‌آید و هیچ‌کدام از اینها در برگه‌ی آنالیز دیده نمی‌شوند. کارگاهی که فقط به آنالیز پایه اکتفا می‌کند، عملاً نیمی از متغیرها را کنترل نمی‌کند.

ما در مرحله‌ی ذوب‌سازی، با تکیه بر فناوری میکروآلیاژها، تلاش می‌کنیم دانه‌بندی ساختار میکروسکوپی را هنگام انجماد کنترل کنیم. نتیجه‌ی این کار سه چیز است: عیوب ریخته‌گری کمتر و قابل کنترل‌تر، بستر مناسب‌تر برای

عملیات حرارتی مؤثرتر، و پروانه‌ای که در برابر سایش مقاوم‌تر است و عمر بهره‌برداری بیشتری دارد. نوع و مقدار دقیق این افزودنی‌ها همان چیزی است که در صنعت به «فوت کوزه‌گری» شهرت دارد و در آنالیزهای شیمیایی معمولی مشخص نمی‌شود، چیزی که کمپانی‌های معتبر جهانی هم آن را برای خودشان نگه می‌دارند.




تصویر شماره ۵: مقایسه‌ی شماتیک ریزساختار: در ساختار ناهمگن، کاربیدهای درشت مسیر ترک را فراهم می‌کنند و در ساختار ریزدانه و یکنواخت، تنش و سایش به طور یکسان‌تری توزیع می‌شود (طرح شماتیک و بدون مقیاس)

## دستورالعمل ذوب، نه حدس ذوب

در فربد، ذوب هر پروانه با یک دستورالعمل مستند پیش می‌رود. این دستورالعمل شامل آنالیز هدف و حد مجاز هر عنصر، دمای ریختن، ترتیب شارژ و افزودنی‌ها، زمان‌بندی عملیات روی مذاب و معیار پذیرش است. وقتی هر ذوب شماره‌ای دارد که روی قطعه ثبت می‌شود، اگر روزی پروانه در سایت رفتار غیرعادی نشان داد، می‌توانیم برگردیم و بفهمیم کدام حلقه تغییر کرده است. مهندسی بدون ردیابی، فقط یک قصه است.

### نکته‌ی میدانی

همراه هر ذوب یک نمونه‌ی آزمایشی بریزید و برای متالوگرافی و سختی نگه دارید. اگر پروانه جایی ترک یا سایش غیرعادی داشت، اولین سؤال شما این است که ریزساختار همان ذوب چه می‌گفت.

بخش ششم

# ماشین‌کاری و عملیات حرارتی؛ سخت‌ترین امتحان

## ماشین‌کاری پروانه‌ی دوجنسی

همان سختی‌ای که پروانه را در برابر سایش مقاوم می‌کند، ماشین‌کاری آن را دشوار می‌کند. به همین دلیل پروانه به صورت دوجنسی ریخته می‌شود: در بخش مرکزی که به شفت متصل می‌شود، جنس قطعه چدن خاکستری است، چون این ناحیه با مواد ساینده و خورنده تماس مستقیم ندارد و به خاصیت ضدسایش نیازی ندارد. حتی برای بخش‌هایی که قرار است رزوه شوند، از اینزرت چدنی داخل قالب استفاده می‌شود.

با وجود این، ماشین‌کاری قطعه همچنان سخت و زمان‌بر است. ما قبل از ماشین‌کاری، سیکل آنیل کامل را روی پروانه اعمال می‌کنیم و قابلیت ماشین‌کاری آن را به شکل چشمگیری بالا می‌بریم. این کار هم زمان ماشین‌کاری را کم می‌کند و هم ابزار را کمتر می‌شکند.

## عملیات حرارتی؛ جایی که قطعه ترک می‌خورد

عملیات حرارتی چدن سفید پرکروم به دلیل ترد و شکننده بودن آن بسیار حساس است. از آنجا که قطعه پس از اتمام ماشین‌کاری وارد این مرحله می‌شود، باید از سطوح ماشین‌کاری‌شده با دقت محافظت کرد. سرعت گرم‌کردن در کوره، کنترل اتمسفر و نحوه‌ی استقرار قطعه در کوره یا سبد حمل‌کننده باید طوری باشد که کمترین شوک حرارتی به پروانه وارد شود، وگرنه قطعه ترک خواهد خورد.

فرآیند عملیات حرارتی این قطعات شامل گرم‌کردن کنترل‌شده تا حدود ۱۰۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، نگهداری در این دما برای شکل‌گیری زمینه‌ی مناسب و سپس سرد کردن سریع است. نکته‌ی تجربی این است که «کنترل‌شده» فقط به معنی رسیدن به دمای هدف نیست؛ شیب گرم‌کردن، توقف همدما برای یکنواخت‌شدن دمای مقاطع ضخیم و نازک و نوع سرد کردن، همگی در رفتار نهایی قطعه تعیین‌کننده‌اند. پس از سخت‌کاری هم معمولاً یک مرحله‌ی تنش‌گیری لازم است تا تنش‌های باقی‌مانده کاهش یابد.




**تصویر شماره ۶:** مقایسه‌ی شماتیک دو سیکل حرارتی: آنیل پیش از ماشین‌کاری برای نرم‌کردن قطعه، و سخت‌کاری کنترل‌شده‌ی نهایی با گرمایش آهسته، نگهداری در حدود ۱۰۰۰ درجه، خنک‌کاری کنترل‌شده و تنش‌گیری (دماها نمونه‌اند و برای هر آلیاژ به صورت جداگانه تعیین می‌شوند)

### هشداری که از تجربه می‌آید

ترک ناشی از شوک حرارتی همیشه بلافاصله دیده نمی‌شود؛ گاهی چند روز بعد یا در اولین راه‌اندازی خودش را نشان می‌دهد. بازرسی نفوذی (PT) روی ریشه‌ی پره‌ها پس از سخت‌کاری، ارزان‌ترین بیمه‌ی ماجراست.

بخش هفتم

# کنترل کیفیت، بالانس و شناسنامه‌ی قطعه

**هر مرحله‌ای که تا اینجا گفتیم، اگر ثبت و اندازه‌گیری نشود، به یک ادعا تبدیل می‌شود. کنترل کیفیت برای ما یک مرحله‌ی پایانی نیست؛ مجموعه‌ای از ایستگاه‌هاست که در طول مسیر ساخت قرار دارند و هر کدام جلوی یک نوع خطا را می‌گیرند.**

| آزمون | چه چیزی را نشان می‌دهد | چه زمانی |
|---|---|---|
| XRF و کوانتومتری | ترکیب شیمیایی ذوب و انطباق با آنالیز هدف | برای هر ذوب |
| سختی‌سنجی | سطح و یکنواختی سختی در نقاط مختلف پروانه | پس از عملیات حرارتی |
| متالوگرافی | اندازه، شکل و توزیع کاربیدها و نوع زمینه | روی نمونه‌ی همراه هر ذوب |
| بازرسی نفوذی (PT) | ترک‌های سطحی، به‌ویژه در ریشه‌ی پره‌ها | پس از سخت‌کاری |
| کنترل ابعادی و اسکن | انطباق هندسه با مدل اصلاح‌شده | قبل و بعد از ماشین‌کاری |

| آزمون | چه چیزی را نشان می‌دهد | چه زمانی |
|---|---|---|
| بالانس دینامیکی | کاهش ارتعاش و بار روی یاتاقان‌ها، مطابق ISO ۱۹۴۰ و معمولاً در محدوده‌ی G۶٫۳ | پس از ماشین‌کاری نهایی |

هدف ما این است که هر پروانه همراه با یک پرونده تحویل شود: شماره‌ی ذوب، گزارش آنالیز، تصویر ریزساختار، نمودار سیکل حرارتی، گزارش بازرسی و گواهی بالانس. این پرونده فقط برای مشتری نیست؛ سرمایه‌ی دانشی ماست. هر بار که پروانه‌ای از سایت برمی‌گردد، این پرونده به ما می‌گوید کجا را باید بهتر کنیم.

بخش هشتم

# مقایسه‌ی دو رویکرد در یک نگاه

| شاخص فنی و متالورژیکی | کپی‌کاری سنتی و جزیره‌ای | رویکرد مهندسی فربد صنعت ایرانیان |
|---|---|---|
| طراحی و هندسه‌ی هیدرولیکی | تهیه‌ی نقشه‌ی ساده از روی قطعه‌ی مستهلک بدون اصلاح زوایای ورود و خروج پره | تحلیل عملکردی در مجموعه‌ی پمپ، اسکن سه‌بعدی و اصلاح پروفیل ساییده‌شده |
| فناوری ریخته‌گری ماسه‌ای | ریخته‌گری تجربی و سنتی، همراه با مک گازی، نیامد و حفره‌ی انقباضی | شبیه‌سازی انجماد با SUTCAST و ProCAST، تنظیم HTC و تدوین دستورالعمل ذوب |
| مهندسی ذوب و متالورژی | اکتفا به آنالیز شیمیایی پایه بدون کنترل ساختار میکروسکوپی انجماد | استفاده‌ی هدفمند از میکروآلیاژها برای ریزدانه‌سازی و ارتقای مقاومت به سایش |
| ماشین‌کاری و عملیات حرارتی | سختی بیش از حد هنگام ماشین‌کاری و ترک‌خوردگی ناشی از شوک حرارتی | آنیل کامل پیش از ماشین‌کاری و سخت‌کاری کنترل‌شده در حدود ۱۰۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد |

| شاخص فنی و متالورژیکی | کپی‌کاری سنتی و جزیره‌ای | رویکرد مهندسی فربد صنعت ایرانیان |
|---|---|---|
| کنترل کیفیت و ردیابی | بازرسی چشمی و ابعادی، بدون پرونده‌ی ذوب | آزمون‌های چندمرحله‌ای، بالانس و شناسنامه‌ی قطعه |

یک حساب ساده هم حرف را روشن‌تر می‌کند. فرض کنید پروانه‌ای ارزان‌تر، ۶۰ درصد قیمت پروانه‌ی استاندارد را داشته باشد، اما فقط ۳۰ درصد عمر آن را. هزینه‌ی هر ساعت کارکرد آن دو برابر می‌شود، و هزینه‌ی توقف خط، که در این حساب نیامده، از هر دو بیشتر است. این یک مثال فرضی برای فهم منطق است، ولی همه‌ی ما چنین حساب‌هایی را در سایت دیده‌ایم.

بخش نهم

# عیب‌یابی سایت؛ از علامت تا ریشه

**وقتی پروانه‌ای زودتر از انتظار از کار می‌افتد، علامتی که دیده می‌شود معمولاً با ریشه‌ی مسئله فاصله دارد. این جدول، نقطه‌ی شروع ما برای تحلیل است، نه یک حکم قطعی؛ ریشه‌ی واقعی را فقط بررسی قطعه و شرایط کار نشان می‌دهد.**

| علامت در سایت | ریشه‌ی محتمل | اولین بررسی |
|---|---|---|
| صدای شن‌ریزه و حفره‌دار شدن لبه‌ی ورودی | خطای زاویه‌ی ورودی پره، NPSH ناکافی یا ورودی ناصاف | مقایسه‌ی پروفیل ورودی با طراحی و بررسی شرایط مکش |
| ترک در ریشه‌ی پره | ترک گرم، تنش باقی‌مانده، شوک حرارتی در سخت‌کاری | PT و بررسی سیکل حرارتی و شعاع ریشه |
| افت راندمان در مدت کوتاه | خطای هندسه، لقی نامناسب، سایش تند ناشی از ریزساختار | بررسی منحنی عملکرد، لقی‌ها و متالوگرافی |
| سایش ناهمگن و موضعی | ساختار کاربیدی ناهمگن یا ناحیه‌ی نرم‌تر از حد | نقشه‌ی سختی و متالوگرافی از نقاط مختلف |
| ارتعاش پس از نصب | نابالانسی، ماشین‌کاری نامتقارن یا مک داخلی | گزارش بالانس و بازرسی داخلی |

بخش دهم

# ده پرسش پیش از سفارش هر پروانه

**اگر قرار است پروانه‌ای را به کارگاهی بسپارید، این ده پرسش را بپرسید.**

**پاسخ‌های مبهم، خودشان یک جواب‌اند.**

| ردیف | پرسش | پاسخ مطمئن‌کننده |
|---|---|---|
| ۱ | نقشه‌ی پروانه از چه منبعی و چگونه اصلاح شده است؟ | حذف خطای سایش با اسکن و مقایسه‌ی چند نمونه |
| ۲ | هندسه چگونه راستی‌آزمایی شده است؟ | محاسبه یا شبیه‌سازی منحنی عملکرد |
| ۳ | مدل و جعبه‌ی ماهیچه از چه جنسی و با چه روشی ساخته شده‌اند؟ | ساخت دقیق و کنترل سایش مدل |
| ۴ | آیا شبیه‌سازی انجماد انجام شده است؟ | بله، با ضریب انتقال حرارت واسنجی‌شده |
| ۵ | دستورالعمل ذوب مستند است؟ | آنالیز هدف، دمای ریختن و معیار پذیرش |
| ۶ | ریزساختار هر ذوب ثبت می‌شود؟ | نمونه‌ی همراه و تصویر متالوگرافی |

| ردیف | پرسش | پاسخ مطمئن‌کننده |
|---|---|---|
| ۷ | نمودار سیکل حرارتی هر قطعه موجود است؟ | ثبت دما و زمان کوره |
| ۸ | ریشه‌ی پره‌ها بعد از سخت‌کاری بازرسی می‌شود؟ | بازرسی نفوذی ثبت‌شده |
| ۹ | بالانس انجام و گواهی می‌شود؟ | گزارش بالانس دینامیکی |
| ۱۰ | شماره‌ی ذوب روی قطعه ثبت می‌شود؟ | ردیابی تا ذوب و بازخورد از سایت |

جمع‌بندی

## از ساخت قطعه تا مالکیت دانش

برای ساخت پروانه‌ی پمپ اسلری وارمن با کیفیتی هم‌تراز نمونه‌ی خارجی، همه‌ی مراحلی که گفتیم باید با نگاه دقیق تکنیکال کامل مستند شوند، گام‌به‌گام اجرا گردند و با تکیه بر گزارش‌های کنترل کیفیت و عیوب ثبت‌شده در هر مرحله بازنگری شوند. پروانه فقط یک قطعه‌ی ریخته‌گری نیست؛ نقطه‌ی تلاقی هیدرولیک، ریخته‌گری، متالورژی و عملیات حرارتی است.

تجربه‌ی ما می‌گوید کسی که پروانه را «می‌سازد» با کسی که دانش ساخت آن را «دارد»، یک نفر نیست. اولی می‌تواند یک بار موفق شود؛ دومی می‌تواند هر

بار، با داده و سند، همان نتیجه را تکرار کند. هدف ما در فربد صنعت ایرانیان همین دومی است: تبدیل بومی‌سازی از یک ریسک به یک فرآیند قابل تکرار.

### پیام نهایی

پروانه را نمی‌سازیم؛ رفتار پروانه را بومی می‌کنیم. اگر پروانه‌ای دارید که زودتر از انتظار از کار افتاده، یا می‌خواهید قطعه‌ای را برای اولین بار بومی کنید، تیم مهندسی فربد صنعت ایرانیان آماده‌ی بررسی مسئله‌ی شماست.

## مراجع و استانداردهای تخصصی


۱. Sulzer Pumps Technical Quality Specification (PS-۳۱۲۵): Duplex and Super Duplex Impellers Requirements.

۲. Sulzer Supplementary Requirements (۴۰-۲۰۲): Cast Impellers and Diffusers Quality and Testing Standards.

۳. Weir Warman Slurry Pump Materials Specifications: High-Chrome Alloy Specifications (A۰۵, A۰۷, A۴۹) and Microstructure Guidelines.

۴. ASTM A۵۳۲/A۵۳۲M: Standard Specification for Abrasion-Resistant Cast Irons.

۵. ANSI/HI ۱۲/۱-۱۲/۶: Rotodynamic (Centrifugal) Slurry Pumps.

۶. ISO ۱۹۴۰-۱: Mechanical vibration, Balance quality requirements for rotors in a constant (rigid) state.

۷. Gülich, J. F.: Centrifugal Pumps, Springer.