شبیه‌ساز گذرای مافوق گرم‌کن پره‌ای — راهنمای کامل کاربر

نرم‌افزار: شبیه‌ساز گذرای مافوق گرم‌کن پره‌ای واحد شماره ۴ (اندروید)

پلتفرم: اندروید ۸ به بالا (API 26+)

موتور خواص ترمودینامیکی: IAPWS-IF97 (ناحیه‌های ۱، ۲ و ۴) — کتابخانه `com.hummeling.if97` نسخه ۲.۱.۰

نسخه سند: ۱.۰.۰

فهرست مطالب

1. نرم‌افزار چه کاری انجام می‌دهد
2. نصب نرم‌افزار
3. شبیه‌سازی چگونه کار می‌کند — تصویر کلی
4. زبانه شبیه‌سازی — گام به گام
5. قواعد آب اسپری (مهم)
6. رویدادهای سناریو
7. خواندن نتایج و نمودارها
8. نمایش محاسبه — شفافیت کامل
9. زبانه اعتبارسنجی — مقایسه مدل‌ها
10. کالیبراسیون با داده‌های نیروگاه
11. فیزیک داخل مدل — معادلات استفاده‌شده
12. یکاها
13. پیام‌های خطا و معنای آن‌ها
14. پرسش‌های متداول و رفع اشکال
15. ساخت نرم‌افزار از سورس
16. راهنمای داخلی نرم‌افزار

---

۱. نرم‌افزار چه کاری انجام می‌دهد

این یک **ابزار مهندسی شبیه‌سازی** است، نه یک ماشین‌حساب ثابت. این برنامه محاسبه می‌کند که

دمای بخار خروجی مافوق گرم‌کن پره‌ای در دیگ بخار ۳۲۵ مگاواتی با گردش طبیعی و درام‌دار

(واحد شماره ۴) در برابر چه عواملی و **در طول زمان** چگونه پاسخ می‌دهد:

#	عامل اثرگذار
1	تغییر دبی جرمی بخار / بار
2	تغییر دبی آب اسپری در ورودی پره‌ها
3	رویداد روشن/خاموش شدن مشعل‌ها
4	تغییر حرارت ورودی کوره
5	تغییر فشار بخار ورودی
6	تغییر دمای بخار ورودی
7	تغییر خواص با P و T (چگالی ρ، گرمای ویژه cp، ویسکوزیته μ، رسانایی k)
8	تغییر ضریب همرفت داخلی h_i با دبی و خواص
9	تغییر عدد رینولدز با بار
10	تغییر عدد پرانتل با حالت بخار
11	تغییر عدد نورسل با Re و Pr
12	ضریب کلی انتقال حرارت U پویا
13	اینرسی حرارتی فلز لوله (منبع اصلی تأخیر)
14	ظرفیت حرارتی بخار / زمان ماند
15	دینامیک خنک‌کاری تزریق اسپری

زنجیره علّی از بالا به پایین فیزیکی است:

```
P, T → خواص IF97 (ρ, μ, cp, k)
     → سرعت → Re → Pr → Nu → h_i → U
     → Q (کویل یکنواخت)
     → موازنه انرژی فلز → موازنه انرژی بخار
     → دمای بخار خروجی (با آنتالپی اسپری و حرارت مشعل، به‌صورت دینامیکی)
```

U همیشه یک خروجی محاسبه‌شده و وابسته به بار است — هرگز یک مقدار ثابت هاردکدشده نیست.

داده‌های مرجع نیروگاه (قفل‌شده، واحد شماره ۴)

پارامتر	مقدار
ظرفیت دیگ	۳۲۵ مگاوات
نوع	گردش طبیعی، درام‌دار
مشعل‌ها	۲۴ × ۴۰ مگاوات، ۳ تراز
دبی بخار بار کامل	۱۰۰۰ تا ۱۰۴۰ تن بر ساعت
بازه فشار لغزان	۱۰ تا ۱۶۷ بار
بازه دمای بخار لغزان	حدود ۲۰۰ تا ۵۴۰ درجه سانتی‌گراد
پره‌های موازی	۴۳
لوله در هر پره	۴ (مجموعاً ۱۷۲)
پاس در هر پره	۸ پاس ۶ متری
قطر خارجی / ضخامت / قطر داخلی لوله	۵۷ / ۸ / ۴۱ میلی‌متر
تغذیه هدر	دو نقطه‌ای میانی (پره‌های ۱ تا ۲۱ / ۲۲ تا ۴۳)

متریال یکنواخت پره‌ها (مدل بازطراحی‌شده — کویل به‌صورت یک لوله یکنواخت با یک متریال در نظر گرفته می‌شود):

متریال	ρ (کیلوگرم بر مترمکعب)	cp (ژول بر کیلوگرم کلوین)	k (وات بر متر کلوین)
12Cr2MoWVTiB	۷۸۵۰	۵۲۰	۳۲

دمای اولیه فلز پره‌ها یک ورودی کاربر است (پیش‌فرض **۴۵۰ درجه سانتی‌گراد**) و به‌عنوان

نقطه شروع موازنه انرژی فلز در محاسبه وارد می‌شود.

---

۲. نصب نرم‌افزار

1. فایل `app-debug.apk` را تهیه کنید (خروجی دستور `./gradlew :app:assembleDebug` در مسیر

`app/build/outputs/apk/debug/`).

1. فایل را به دستگاه اندرویدی خود منتقل کنید (کابل USB، فضای ابری یا دانلود مستقیم).
2. روی دستگاه فایل APK را باز کنید. اندروید اجازه نصب از آن منبع را می‌پرسد

(«نصب برنامه‌های ناشناس») — یک بار اجازه دهید.

1. روی **نصب** بزنید و سپس برنامه **شبیه‌ساز گذرای مافوق گرم‌کن پره‌ای** را باز کنید.

هیچ دسترسی خاصی لازم نیست. برنامه کاملاً آفلاین کار می‌کند — کتابخانه خواص IF97 داخل خود برنامه کامپایل شده است.

---

۳. شبیه‌سازی چگونه کار می‌کند — تصویر کلی

کویل پره‌ها به‌صورت **یک لوله یکنواخت** مدل می‌شود (مدل بازطراحی‌شده — قطعه‌بندی حذف شده است): یک متریال (12Cr2MoWVTiB)، شار حرارتی یکنواخت و **دو متغیر حالت تجمعی**:

- **دمای فلز** `T_m` — توده فلز جداره لوله (اینرسی غالب؛ از ورودی دمای فلز کاربر شروع می‌شود، پیش‌فرض ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد)
- **دمای بخار** `T_s` — بخار درون کویل

هر گام زمانی مدل:

1. ورودی‌های لحظه‌ای را می‌خواند (دبی بخار، دبی و دمای اسپری، مشعل‌ها، فشار، دمای بخار) — شامل هر رویداد سناریوی **فعال** که سررسیده باشد.
1. اگر اسپری فعال باشد، **محاسبه اختلاط** را انجام می‌دهد (بخش ۵): موازنه آنتالپی ← آنتالپی مخلوط ← دمای مخلوط با معادله معکوس IF97 یعنی T(P,h).
1. خواص (ρ، μ، cp، k) را از IF97 در حالت فعلی بخار می‌گیرد و زنجیره سرعت ← h_i ← Nu ← Pr ← Re و سپس U از زنجیره مقاومت استوانه‌ای را محاسبه می‌کند.
1. شارهای حرارتی را محاسبه و هر دو موازنه انرژی را با روش **RK4** انتگرال‌گیری می‌کند.
2. همه پارامترهای ترمودینامیکی را برای نتایج و نمودارها ثبت می‌کند.

چرا فلز مهم است: فلز لوله حدود ۳۶ مگاژول بر کلوین ظرفیت حرارتی دارد — هزاران برابر بیشتر از بخار داخل لوله‌ها. وقتی مشعل‌ها پله‌ای زیاد می‌شوند، اول فلز گرم می‌شود و بخار دنبالش؛ همین تأخیر دقیقاً همان چیزی است که مدل بازتولید می‌کند.

فرض توزیع جریان (صریح): کل دبی بخار پره‌ها به‌طور مساوی بین هر ۴۳ پره تقسیم می‌شود؛ درون هر پره، ۴ لوله سهم برابر دارند. پس هر لوله `ṁ_total / 172` حمل می‌کند. در بار کامل (۲۷۷٫۸ کیلوگرم بر ثانیه) و ۱۶۷ بار / ۵۲۰ درجه سانتی‌گراد (ρ ≈ ۵۲ کیلوگرم بر مترمکعب) این با قطر داخلی ۴۱ میلی‌متر یعنی سرعت لوله‌ای حدود ۲۴ متر بر ثانیه و Re ≈ ۱٫۵×۱۰^{6} — از نظر

فیزیکی درست برای بخار سوپرهیت.

---

۴. زبانه شبیه‌سازی — گام به گام

۴.۱ فیلدهای حالت اولیه

فیلد	معنا	پیش‌فرض
دبی بخار (تن بر ساعت)	کل دبی بخار پره‌ها در t = ۰	۳۰۰
فشار (بار)	فشار بخار در ورودی پره‌ها (مطلق)	۱۰۰
دمای بخار (سانتی‌گراد)	دمای بخار ورودی در t = ۰	۴۰۰
دمای اسپری (سانتی‌گراد، ۱۰۰–۱۸۰)	دمای آب اسپری — داخل بازه الزامی	۱۵۰
دمای فلز (سانتی‌گراد)	دمای اولیه فلز پره‌ها — **ورودی کاربر**	۴۵۰
مشعل روشن	تعداد مشعل‌های در حال کار در t = ۰	۲
مدت (دقیقه)	طول شبیه‌سازی	۱۵

۴.۲ سناریوها — زبانه Scenarios

رویدادهای سناریو زبانه مخصوص خودشان را دارند (**Simulate | Scenarios | Validation | Help | About**). در آن می‌توانید یک **خط‌زمانی دلخواه با چند رویداد** بسازید:

- روی **+ Add** بزنید، کمیت را انتخاب کنید (دبی بخار، دبی اسپری، دمای اسپری، تعداد مشعل، کسر بار مشعل، فشار بخار، دمای بخار) و **Add** را بزنید.
- هر کارت رویداد **زمان** (ثانیه)، **مقدار هدف** (با یکای نمایش)، کلید **Enabled** و دکمه حذف ✕ خودش را دارد.
- **هر تعداد رویداد برای هر کمیت** — مثلاً سه پله دبی بخار در ۲۰۰، ۵۰۰ و ۸۰۰ ثانیه — هر کدام در زمان خودشان اعمال می‌شوند.
- سطرهای نامعتبر خطای درون‌خطی قابل‌فهم نشان می‌دهند (زمان بد، دبی صفر، مشعل > ۲۴، کسر خارج از ۰ تا ۱) و در زمان اجرا رد می‌شوند.
- رویدادهای خاموش هرگز اجرا نمی‌شوند؛ همه رویدادهای روشن در ترتیب زمانی اعمال می‌شوند.

یک کلید روشن = اجرای **تک‌سناریویی**؛ چند کلید روشن = اجرای **چندسناریویی**.

در زبانه **Simulate** بخش سناریوها همه رویدادهای فعال را به ترتیب زمانی فهرست می‌کند، سطرهای فعال ولی نامعتبر را هشدار می‌دهد و دکمه **Disable all events** را برای اجرای سریع پایه دارد. حالت مشترک است — ویرایش در هر زبانه همان خط‌زمانی است.

رویدادها در موتور: تغییر تعداد مشعل طی ۶۰ ثانیه شیب‌دار اعمال می‌شود (قابل تنظیم در موتور)؛ بقیه انواع در زمان رویداد پله‌ای‌اند.

۴.۳ اجرا

روی **RUN SIMULATION** بزنید. موتور مدل با گام dt = ۱ ثانیه انتگرال‌گیری می‌کند. نتایج زیر ظاهر می‌شوند: ابتدا اعداد خلاصه، سپس تراشه‌های انتخاب پارامتر و نمودارها، سپس پنل جزئیات محاسبات.

اگر ورودی مشکلی داشته باشد (مثلاً اسپری بیرون از ۱۰۰–۱۸۰ درجه یا فشار غیرفیزیکی)، به‌جای کرش، کارت قرمز خطا با توضیح قابل‌فهم مهندسی ظاهر می‌شود.

---

۵. قواعد آب اسپری (مهم)

برنامه **قاعده نیروگاهی** آب اسپری را در خود موتور اعمال می‌کند:

> **آب اسپری همیشه ساب‌کول (زیر سیرشدگی) و بین ۱۰۰ تا ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد است — در هر شرایطی.**

به‌طور مشخص، موتور پیش از هر محاسبه اختلاط دو بررسی انجام می‌دهد:

1. **بازه دما:** دمای اسپری باید **بین ۱۰۰ و ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد** باشد.
2. **ساب‌کول بودن:** دمای اسپری باید همچنین **زیر دمای اشباع Tsat** در فشار نقطه اختلاط باشد. در ۲۰ بار، Tsat ≈ ۲۱۲ درجه است، پس بازه ۱۰۰–۱۸۰ تعیین‌کننده است؛ زیر حدود ۱۳ بار، Tsat داخل بازه می‌افتد و شرط ساب‌کول اول زده می‌شود.

اگر هر بررسی شکست بخورد، شبیه‌سازی با خطای نوع‌دار رد می‌کند که دقیقاً توضیح می‌دهد کدام شرط و با چه فاصله‌ای نقض شده — مثلاً:

```
دمای اسپری ۲۰۰٫۰ درجه بیرون از بازه ۱۰۰-۱۸۰ درجه نیروگاه است
در ۱٫۵۰ بار آب اسپری باید ساب‌کول باشد: T=120.0 >= Tsat=110.8
```

چرا: اسپری‌های دی‌سوپرهیتور باید کامل در جریان بخار تبخیر شوند. آبی که در فشار

تزریق سیرشده یا در حال جوش است، به‌جای اختلاط «فlash» می‌کند و مدل تک‌ناحیه‌ای اختلاط

چنین حالتی را بازنمایی نمی‌کند. این قاعده همه نتایج را در ناحیه معتبر فیزیکی نگه می‌دارد.

دمای اسپری به‌عنوان رویداد: می‌توانید دمای اسپری را در طول سناریو هم تغییر دهید

(رویداد `SPRAY_TEMP_K`)؛ همان قاعده در هر رویداد اعمال می‌شود.

محاسبه اختلاط (وقتی اسپری روشن است چه می‌شود)

چهار حالت متمایز همیشه جدا نگه داشته می‌شوند:

1. **بخار بالادست** (پیش از اسپری): P، T، h از IF97
2. **آب اسپری**: h از IF97 ناحیه ۱ در فشار تزریق و دمای اسپری
3. **حالت مخلوط** (پس از اسپری، ورودی پره‌ها): موازنه آنتالپی ← T(P,h)
4. **خروجی پره‌ها**: توسط موازنه انرژی کویل یکنواخت محاسبه می‌شود

```
h_mix = (ṁ_steam·h_steam + ṁ_spray·h_spray) / (ṁ_steam + ṁ_spray)
T_mix = T(P, h_mix)          ← معادله معکوس ناحیه ۲ IF97
```

توان خنک‌کاری ناشی از اسپری برابر است با `Q_spray = ṁ_spray·(h_steam - h_mix)`.

---

۶. رویدادهای سناریو

در درون، هر ورودی یک **سری زمانی** ساخته‌شده از رویدادهاست. زبانه **Scenarios** فهرست‌های

دلخواه رویداد را ویرایش می‌کند — هر تعداد رویداد برای هر کمیت، هر کدام با زمان، مقدار و

کلید فعال/غیرفعال خودش:

نوع رویداد	یکا	رفتار پیش‌فرض
دبی بخار	کیلوگرم بر ثانیه (رابط: تن بر ساعت)	پله در زمان رویداد
دبی اسپری	کیلوگرم بر ثانیه (رابط: تن بر ساعت)	پله (یا شیب‌دار در صورت پیکربندی)
دمای اسپری	کلوین (رابط: سانتی‌گراد)	پله؛ باید در بازه ۱۰۰–۱۸۰ بماند
مشعل روشن	تعداد	**شیب‌دار** طی ۶۰ ثانیه (قابل تنظیم)، نه پله‌ای
کسر بار مشعل	۰ تا ۱	پله
فشار بخار	پاسکال (رابط: بار)	پله
دمای بخار	کلوین (رابط: سانتی‌گراد)	پله

سناریوی نمونه مشخصات فنی همان مجموعه رویدادهای پیش‌فرض است (هر رویداد به‌صورت خاموش ارائه می‌شود — هر کدام را خواستید فعال کنید):

t (ثانیه)	رویداد
۰	دبی بخار = ۳۰۰ تن بر ساعت، ۲ مشعل روشن، اسپری = ۰
۳۰۰	دبی بخار ← ۴۵۰ تن بر ساعت
۴۰۰	اسپری ۰ ← ۵ تن بر ساعت
۵۰۰	مشعل ۲ ← ۳

می‌توانید رویدادهای بیشتری به همان خط‌زمانی اضافه کنید — مثلاً افت کسر بار مشعل به ۰٫۸ در ۶۰۰ ثانیه، یا پله دوم اسپری در ۷۰۰ ثانیه.

---

۷. خواندن نتایج و نمودارها

اعداد خلاصه (پایان شبیه‌سازی)

سطر	معنا
دمای خروجی (ابتدا ← انتها)	دمای بخار خروجی کویل یکنواخت، ابتدا در برابر انتها
دمای فلز (ابتدا ← انتها)	دمای تجمعی فلز (از ورودی دمای فلز شما شروع می‌شود)
دمای مخلوط (پایان)	دمای مخلوط پس از اسپری (بدون اسپری = دمای بخار)
سرعت (پایان)	سرعت بخار در یک لوله، متر بر ثانیه
h_i (پایان)	ضریب همرفت داخلی، وات بر مترمربع کلوین
U (پایان)	ضریب کلی انتقال حرارت، وات بر مترمربع کلوین
Re (پایان)	عدد رینولدز در لوله
گرمای جذب‌شده (پایان)	گرمای گرفته‌شده توسط بخار، مگاوات
ρ و cp (پایان)	چگالی و گرمای ویژه IF97 در حالت خروجی

نمودارها — همه پارامترها قابل انتخاب

پس از هر اجرا، **همه پارامترهای ترمودینامیکی** به‌صورت تراشه قابل انتخاب‌اند: دمای خروجی، دمای فلز، دمای مخلوط، دمای بخار ورودی، فشار، دبی‌ها، حرارت‌ها، سرعت، Re، Pr، k، μ، cp، ρ، U، h_i، Nu و h — هر ترکیبی را بزنید تا برحسب زمان رسم شود.

تفسیر پاسخ پله: پس از پله مشعل، فوراً دمای فلز شروع به بالا رفتن می‌کند و خروجی پس از یک تأخیر کوتاه دنبال می‌کند؛ پس از پله اسپری، خروجی تقریباً بلافاصله پایین می‌آید (اسپری در ورودی اثر می‌کند) و به مقدار پایدار جدیدی می‌نشیند.

---

۸. نمایش محاسبه — شفافیت کامل

هر نتیجه باید قابل ردیابی باشد. پایین نتایج روی **Show calculation details** بزنید تا برای حالت پایان شبیه‌سازی ببینید:

سطر	منبع
P، T_out	حالت فعلی بخار در خروجی
ρ	چگالی IF97 در (P, T_out)
cp	گرمای ویژه فشار ثابت IF97
μ	ویسکوزیته دینامیکی IF97
k	رسانایی حرارتی IF97
Pr	عدد پرانتل IF97
Re	ρ·v·D_i/μ از مدل جریان
Nu	Re^0.8·Pr^0.4·0.023 (دیتوس–بولتر)
h_i = Nu·k/D_i	همرفت داخلی
U	زنجیره مقاومت استوانه‌ای

این یک الزام اصلی ابزار (ردیابی مهندسی) است، نه یک قابلیت تزئینی.

---

۹. زبانه اعتبارسنجی — مقایسه مدل‌ها

برنامه **سه سطح مدل** دارد و آن‌ها را روی یک سناریوی یکسان کنار هم اجرا می‌کند:

مدل	توضیح	هدف
U ثابت	توده واحد، U ثابت (۸۰۰ وات بر مترمربع کلوین)	رفتار مرجع داده‌های YAML نیروگاه
h_i پویا	توده واحد، h_i از زنجیره Re←Pr←Nu در هر گام	جداسازی اثر انتقال حرارت پویا
یکنواخت (RK4)	مدل گذرای تجمعی یکنواخت (گره فلز + گره بخار)	مدل اصلی تولیدی

روی **Run comparison** بزنید تا دمای خروجی پایان اجرای هر سه روی سناریوی مرجع دیده شود (۱۰۰←۱۵۰ تن بر ساعت و ۲←۳ مشعل در t = ۳۰۰ ثانیه).

اختلاف ۸۰۰ در برابر حدود ۱۷۰ وات بر مترمربع کلوین پنهان نمی‌شود. داده‌های YAML نیروگاه در بار کم U ≈ ۸۰۰ می‌دهد، در حالی که زنجیره دیتوس–بولتر در بار کامل حدود ۱۷۰ می‌دهد. هر دو مسیر به‌صورت مدهای جدا و با برچسب مشخص فراهم‌اند — برنامه هرگز بی‌سروصدا آنان را ترکیب نمی‌کند. رفع این اختلاف کار کالیبراسیون است (بخش بعد)، نه تصمیم خودسرانه برنامه.

---

۱۰. کالیبراسیون با داده‌های نیروگاه

گردش کار **Fit parameters** اجازه می‌دهد دو پارامتر مؤثر با داده‌های اندازه‌گیری‌شده نیروگاه کالیبره شوند:

1. یک بازه از داده‌های historion شامل **دمای خروجی** با نمونه‌برداری یکنواخت صادر کنید (شبکه شبیه‌سازی ۱ ثانیه × ۹۰۰ ثانیه است؛ داده‌های خود را با آن تطبیق دهید یا یک سری نماینده با دست‌کم ۱۰ نقطه بچسبانید).
1. مقادیر (سانتی‌گراد) را با ویرگول یا خط جدید در فیلد متنی بچسبانید.
2. روی **Fit parameters** بزنید.

برازنده به‌صورت جست‌وجوی شبکه‌ای این‌ها را می‌گردد:

- **F_platen** (کسر حرارت کوره که به پره‌ها می‌رسد) در بازه ۰٫۰۵ تا ۰٫۵
- **h_o** (همرفت سمت خارجی/کوره) در بازه ۲۰ تا ۵۰۰ وات بر مترمربع کلوین

و کیفیت برازش را گزارش می‌کند:

سنجه	معنا
MAE	میانگین قدرمطلق خطا، کلوین
RMSE	جذر میانگین مربع خطا، کلوین
Max error	بدترین خطای لحظه‌ای، کلوین
Bias	میانگین خطای علامت‌دار، کلوین (مدل کلی گرم است یا سرد)
R^2	کسر واریانس تبیین‌شده

مقادیر برازش‌شده با برچسب «تجربی» و جدا از پارامترهای فیزیکی نگه داشته می‌شوند —

برنامه هرگز فیزیک را با اعداد برازش‌شده بازنویسی نمی‌کند. از F_platen و h_o برازش‌شده

به‌عنوان پیکربندی اجراهای بعدی شبیه‌سازی استفاده کنید.

---

۱۱. فیزیک داخل مدل — معادلات استفاده‌شده

۱۱.۱ موتور خواص (IAPWS-IF97)

همه خواص ترموفیزیکی از IAPWS-IF97 می‌آیند:

- **ناحیه ۱** — آب فشرده/ساب‌کول (آب تغذیه، آب اسپری)
- **ناحیه ۲** — بخار سوپرهیت (جریان اصلی و معادله معکوس T(P,h))
- **ناحیه ۴** — خط اشباع (Tsat برای بررسی ساب‌کول اسپری)

در مجموعه تست‌ها با جدول‌های رسمی IAPWS تأیید شده، مثلاً:

کمیت	حالت	مقدار رسمی
h	۳ مگاپاسکال، ۳۰۰ کلوین	۱۱۵٫۳۳۱ کیلوژول بر کیلوگرم
h	۳ مگاپاسکال، ۵۰۰ کلوین	۹۷۵٫۵۴۲ کیلوژول بر کیلوگرم
h	۳۰ مگاپاسکال، ۷۰۰ کلوین	۲۶۳۱٫۴۹۵ کیلوژول بر کیلوگرم
μ	۰٫۱ مگاپاسکال، ۲۹۸٫۱۵ کلوین	۰٫۸۹۰۰۲۲۵۵۱ میلی‌پاسکال‌ثانیه
k	۰٫۱ مگاپاسکال، ۲۹۸٫۱۵ کلوین	۰٫۶۰۷۵۰۹۸۰۶ وات بر متر کلوین
Tsat	۱۶٫۷ مگاپاسکال	۶۲۳٫۹۸۸ کلوین

۱۱.۲ جریان

```
A_flow   = π·D_i²/4              D_i = ۴۱ میلی‌متر
ṁ_tube   = ṁ_total / (43·4)
v        = ṁ_tube / (ρ·A_flow)
Re       = ρ·v·D_i/μ
```

۱۱.۳ انتقال حرارت

```
Pr  = cp·μ/k
Nu  = 0.023·Re^0.8·Pr^0.4        (n = 0.3 گرم‌شدن؛ برای سردشدن)
h_i = Nu·k/D_i
```

اعتبار دیتوس–بولتر (Pr بین ۰٫۷ تا ۱۶۰ و Re > ۱۰٬۰۰۰) بررسی و هشدار داده می‌شود؛ هرگز

خارج از بازه به‌صورت بی‌صدا اعمال نمی‌شود.

۱۱.۴ U کلی (استوانه‌ای، بر واحد سطح خارجی)

```
1/(U·A_o) = 1/(h_i·A_i) + ln(D_o/D_i)/(2π·k_wall·L) + R_fouling + 1/(h_o·A_o)
```

هر چهار مقاومت نمایش داده می‌شوند؛ مقاومت غالب در نتایج مشخص می‌شود.

۱۱.۵ حرارت ورودی کوره

```
Q_platen = n_burners · 40 MW · firing_fraction · F_platen
```

F_platen پیش‌فرض ۰٫۱۵. تغییرات مشعل طی ۶۰ ثانیه شیب‌دار اعمال می‌شود.

۱۱.۶ موازنه‌های انرژی یکنواخت

```
C_metal · dT_m/dt = Q_platen − h_i·A_i·(T_m − T_s) − Q_loss
C_steam · dT_s/dt = ṁ·cp·(T_in − T_s) + h_i·A_i·(T_m − T_s)
```

یک گره فلز و یک گره بخار برای کل کویل (مدل یکنواخت). موازنه بخار به فرم آرامش نمایی با

`τ = max(C_steam/(ṁ·cp + h_i·A_i), Δt)` انتگرال‌گیری می‌شود — همان نقطه پایدار، پایدار

در هر گام زمانی.

۱۱.۷ حل‌کننده

RK4 با Δt = ۱ ثانیه پیش‌فرض (قابل تنظیم ۰٫۱ تا ۲ ثانیه). با تست همگرایی نصف‌کردن گام

زمانی تأیید شده: dt = ۲ ثانیه و dt = ۱ ثانیه در سناریوی مرجع کمتر از ۵ کلوین اختلاف دارند.

---

۱۲. یکاها

زمینه	یکاها
نمایش رابط کاربری	بار، سانتی‌گراد، تن بر ساعت، مگاوات، وات بر مترمربع کلوین
داخل موتور	فقط SI: پاسکال، کلوین، کیلوگرم بر ثانیه، ژول بر کیلوگرم، وات، متر، کیلوگرم بر مترمکعب، ژول بر کیلوگرم کلوین، پاسکال‌ثانیه، وات بر متر کلوین

تبدیل‌ها دقیقاً یک‌بار، در مرز رابط کاربری انجام می‌شوند. داخل هیچ‌وقت مخلوط نمی‌شود.

۱۳. پیام‌های خطا و معنای آن‌ها

پیام	علت	کار
`درجه بیرون از بازه X دمای اسپری ۱۰۰-۱۸۰ درجه نیروگاه است`	دمای اسپری بیرون از ۱۰۰–۱۸۰	دمای اسپری را داخل بازه ببرید
`T=… >= : آب اسپری باید سابکول باشد در … بار Tsat=…`	دمای اسپری ≤ Tsat در فشار اختلاط	دمای اسپری را زیر Tsat ببرید
`… :خارج از بازه است IF97 حالت`	فشار/دما خارج از اعتبار IF97 (مثلاً > ۱۰۰ مگاپاسکال، < ۰ درجه)	ورودی‌ها را به بازه فیزیکی ببرید
`دبی بخار باید مثبت باشد`	دبی صفر یا منفی	دبی مثبت وارد کنید
`t=… خطای شبیه‌سازی در`	حالتی در میانه اجرا غیرفیزیکی شد	اندازه رویداد را کم کنید، حالت اولیه را بررسی کنید

همه خطاها نتیجه نوع‌دارند — برنامه روی ورودی بد کرش نمی‌کند؛ توضیح می‌دهد.

۱۴. پرسش‌های متداول و رفع اشکال

پ: دمای خروجی کل مدت بالا می‌رود — اشتباه است؟

ج: احتمالاً نه. فلز از دمای فلز ورودی شما شروع می‌کند (پیش‌فرض ۴۵۰ درجه)؛ اگر حرارت مشعل از چیزی که جریان می‌برد بیشتر باشد، سیستم به سمت تعادل بالاتری گرم می‌شود و ۱۵ دقیقه برای تثبیت کافی نیست. مدت را بیشتر کنید یا اجرای اسپری‌دار و بدون‌اسپری را مقایسه کنید.

پ: چرا سرعت لوله در بار کامل حدود ۲۴ متر بر ثانیه است؟

ج: بخار سوپرهیت در ۱۶۷ بار/۵۲۰ درجه چگالی حدود ۵۲ کیلوگرم بر مترمکعب دارد — یک‌دهم آب. با قطر داخلی ۴۱ میلی‌متر سرعت حدود ۲۴ متر بر ثانیه و $Re \approx 1.5\times10^6$ به‌دست می‌آید — به‌راحتی آشفته و از نظر فیزیکی درست.

پ: چرا فلز قبل از خروجی پاسخ می‌دهد؟

ج: کوره مستقیماً فلز را گرم می‌کند؛ بخار گرما را فقط از طریق فلز می‌گیرد. همان تأخیر آبشاری، رفتار گذرای غالب مافوق گرم‌کن است.

پ: می‌توانم برای تست حد، اسپری را روی ۲۰۰ درجه بگذارم؟

ج: موتور رد می‌کند — این همان قاعده نیروگاهی است که درست کار می‌کند. آب اسپری در این نیروگاه همیشه ساب‌کول و در بازه ۱۰۰–۱۸۰ درجه است.

پ: می‌توانم دمای فلز را تغییر دهم؟

ج: بله — دمای فلز (سانتی‌گراد) یک ورودی کاربر است (پیش‌فرض ۴۵۰ درجه) و به‌عنوان دمای اولیه گره فلز در محاسبه وارد می‌شود.

پ: می‌توانم فقط یک سناریو را اجرا کنم؟

ج: بله — هر کارت سناریو کلید خودش را دارد. یک کلید روشن = اجرای تک‌سناریویی؛ چند کلید روشن = اجرای چندسناریویی. سناریوهای خاموش هرگز اجرا نمی‌شوند.

پ: فشار مطلق یا نسبی؟

ج: مطلق (bar a). IF97 با فشار مطلق کار می‌کند.

پ: کتابخانه IF97 از کجاست؟

ج: `com.hummeling.if97` نسخه ۲٫۱٫۰ از Hummeling Engineering BV، به‌صورت سورس در برنامه گنجانده شده تحت مجوز LGPL (فایل مجوز در درخت سورس هست).

---

۱۵. ساخت نرم‌افزار از سورس

```
# پیش‌نیازها: JDK 17 و Android SDK (در local.properties) و اینترنت برای وابستگی‌های گریدل
git clone https://github.com/mohsenRahimi1708/SteamMixerCalculator.git
cd SteamMixerCalculator   # شاخه unit4-platen-transient
# برنامه در پوشه platen-superheater/ آن شاخه است
./gradlew :app:testDebugUnitTest   # تست، همگی سبز ۲۹
./gradlew :app:assembleDebug       # خروجی در app/build/outputs/apk/debug/app-debug.apk
```

خلاصه معماری:

```
رابط کاربری (Compose) → صفحه‌ها → PlatenSimulator → SteamProperties (IF97)
                                ↓
              FlowModel / HeatTransfer / OverallU
                                ↓
              BurnerModel / SprayModel / ScenarioState
```

بسته موتور، کاتلین/JVM خالص است (بدون وابستگی اندروید) و کاملاً تست واحد دارد؛ موتور خواص پشت یک اینترفیس است تا پیاده‌سازی جایگزین (مثلاً CoolProp) بدون دست‌زدن به مدل جایگزین شود.

---

۱۶. راهنمای داخلی نرم‌افزار

از نسخه ۱٫۱٫۰، کل این راهنما **داخل خود برنامه** هم هست: زبانه **Help** چهارم است (شبیه‌سازی | اعتبارسنجی | **Help** | درباره). همه ۱۱ موضوع راهنما به‌صورت کارت‌های بازشونده نمایش داده می‌شوند، با **جست‌وجو** در عنوان‌ها و متن‌ها و **تراشه‌های پرش** سریع به هر بخش — بدون نیاز به PDF.

نسخه سند ۲٫۱٫۰ — بازتاب مدل یکنواخت بازطراحی‌شده و زبانه ویرایشگر سناریو (هر تعداد رویداد برای هر کمیت با زمان و کلید فعال خودش). برای اشتقاق کامل مهندسی هر معادله، `ENGINEERING.md` را در مخزن ببینید.