

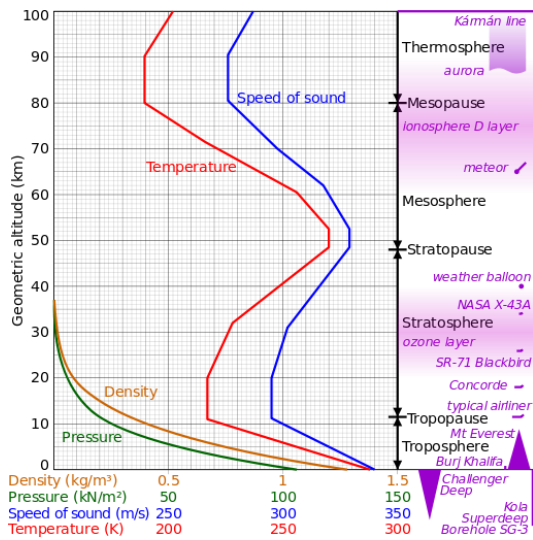
بررسی انتقال حرارت سه بعدی در مبدل حرارتی صفحه‌ای

یحیی شیخ نژاد^۱، ظهیر کریمی^۲، حسین جوپایی قهرودی^۳

^۱دانشگاه صنعتی امیرکبیر، y.sheykhnjad@aut.ac.ir

^۲دانشگاه علمی کاربردی، zahirkarimi7@gmail.com

^۳دانشگاه آزاد علوم تحقیقات، h.joopaii@gmail.com



شکل ۱: تغییرات دما، فشار، چگالی در ارتفاع‌های مختلف از جو زمین

تحلیل رفتار هیدرولیکی و حرارتی جریان سیال و نیز پیش‌بینی نتایج حاصل از تغییر شرایط مرزی و مشخصات ترموهیدرودینامیکی سیال در مکان‌های مختلف درون هندسه مورد بررسی، تنها با حل معادلات حاکم امکان پذیر است. معادلات حاکم شامل مجموعه‌ای از معادلات مشتقات جزئی غیرخطی کوپل هستند که در حالت کلی هیچ جواب تحلیلی برای آنها یافت نشده است. معادلات حاکم بر جریان آرام و پایای سیال تراکم‌ناپذیر و نیوتنی شامل معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (1)$$

معادله ممتمم:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2 - \eta \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv - \eta \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho uw - \eta \frac{\partial u}{\partial z}) = -\frac{\partial p}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho uv - \eta \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v^2 - \eta \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho vw - \eta \frac{\partial v}{\partial z}) = -\frac{\partial p}{\partial y} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho uw - \eta \frac{\partial w}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vw - \eta \frac{\partial w}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w^2 - \eta \frac{\partial w}{\partial z}) = -\frac{\partial p}{\partial z} \quad (3)$$

و معادله انرژی:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho CuT - k_{th} \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho CvT - k_{th} \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho CwT - k_{th} \frac{\partial T}{\partial z}) = 0 \quad (4)$$

است که می‌بایست همزمان باهم حل شوند.

فرضیات حاکم بر مسئله

باید به این نکته‌ی مهم توجه داشت که جریان هوا در شرایط عادی (حداقل تا ارتفاع ۱ کیلومتر از سطح دریا و در شرایط غیر طوفانی)

چکیده

در این پژوهش به بررسی سه بعدی انتقال حرارت جابجایی اجباری در مبدل حرارتی صفحه‌ای سه لایه‌ای پرداخته شد. معادلات حاکم بر جریان سیال شامل پیوستگی، ممتمم و انرژی با روش حجم محدود گسسته‌سازی شد و با الگوریتم سیمپل پاتانکار برای بدست آوردن مشخصات جریان در شبکه‌ی جابجا شده حل گردید. حل عددی به روش تکراری تا رسیدن به همگرایی در شرایطی که مجموع خطاهای تمام سلول‌ها برای هر معادله کمتر از 10^{-3} باشد، انجام شد.

واژه‌های کلیدی

انتقال حرارت جابجایی، مبدل حرارتی صفحه‌ای، دینامیک سیالات محاسباتی.

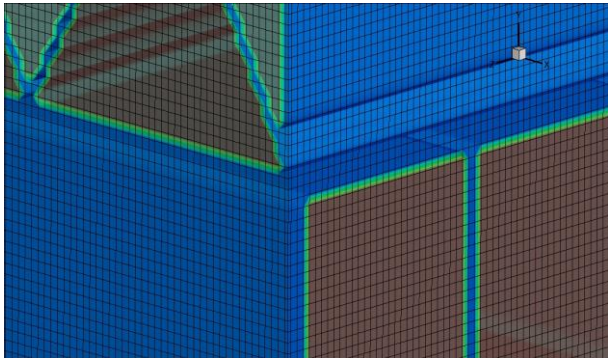
مقدمه

این مبدل که جزو مبدل‌های صفحه‌ای دسته‌بندی می‌شود، قرار است که محصولات احتراق را در دمای بالا، نزدیک به ۸۰۰ درجه فارنهایت، گرفته و توسط هوای سرد محیط، که در ارتفاع ۲۰۰۰۰ پا ۲۵۰ کلوین یا ۲۳.۱۵- درجه سانتی‌گراد است، به هوای معتدل جهت گرمایش تجهیزات تبدیل نماید. هوای داغ با سرعت ۵۰۰ متر بر ثانیه در دمای ۸۰۰ درجه فارنهایت و فشار ۱۹۰ بار، از لوله‌ای با قطر ۱۱.۵ سانتی‌متر به سمت مبدل حرارتی انتقال می‌یابد. سرعت هوای سرد ورودی به مبدل حرارتی در حدود ۹۰۰-۷۰۰ کیلومتر بر ساعت خواهد بود. همچنین ارتفاع کاری برای این مبدل حرارتی بین ۲۰۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ پا، بسته به شرایط و موقعیت، برآورد می‌شود. قابل ذکر است که هوای سرد پس از عبور از مبدل حرارتی دوباره به هوای بیرون (محیط) تخلیه می‌شود.

جدول ۱: شرایط مرزی ورودی مبدل حرارتی

گرم	سرد	
190 bar	42 KPa	فشار
800 F	250 K	دما
500 ft/s	700 Km/h	سرعت
6/177 Kg/m ³	0/64 Kg/m ³	چگالی
3/332*10 ⁻⁵ Kg/m.s	1/488*10 ⁻⁵ Kg/m.s	ویسکوزیته

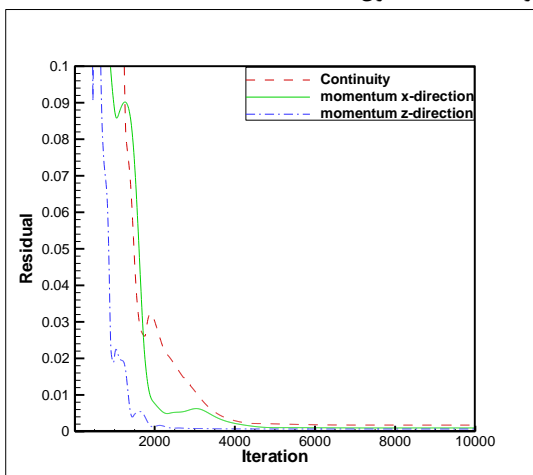
مثلی) با ۴ کانال مستطیلی، اجرا شد. این یعنی برای ساخت چنین هندسه‌ای از شش میلیون و شش هزار سلول (۶۰۰۶۰۰۰) استفاده شده است. قابل ذکر است که این تعداد سلول، حداقل تعدادی است که برای این تعداد کانال می‌توان در نظر گرفت به گونه‌ای که کوچکترین اندازه‌ی آن (ضخامت صفحات) حداقل حاوی دو سلول باشد



شکل ۲: بزرگنمایی شبکه تولید شده برای وضوح بیشتر

در حل عددی برای بدست آوردن مقادیر سرعت در سه راستا (U, V, W) ، فشار P و دما T برای ۶۰۰۶۰۰۰ سلول تا رسیدن به همگرایی، ده هزار (۱۰۰۰۰) تکرار انجام شد. همانطور که قبلاً اشاره شد همگرایی برای معادلات وقتی اتفاق می‌افتد که مجموع خطای تمام سلول‌ها در یک مقدار معین بسیار کوچک ثابت شده باشد. در هر یک از این ۱۰۰۰۰ تکرار ماتریس مربعی ۵ قطرری با ۶۰۰۶۰۰۰ تعداد ردیف و ستون به روش خط به خط و با الگوریتم توماس، ۵ بار (برای ۵ متغیر مجهول در ناحیه‌ی حل) حل شده است.

همانطور که انتظار می‌رود چنین حجم بالایی از محاسبات حتی با سیستم ۴ هسته‌ای ۳ گیگا هرتزی مدت زیادی به طول می‌انجامد. در این حالت از ابتدای اجرای کد تا اتمام ۱۰۰۰۰ تکرار مدت ۴۲ ساعت و ۲۵ دقیقه به طول انجامید.



شکل ۳: روند کاهش خطای محاسباتی تا رسیدن به همگرایی

روند کاهش خطای محاسبات برای معادله‌ی پیوستگی و ممنتوم در دو راستای آورده شده است. از این نمودار به خوبی می‌توان روند کاهش خطای هر معادله در تمام ناحیه‌ی حل را تا رسیدن به همگرایی پیگیری نمود.

تراکم‌ناپذیر فرض می‌شود. این نکته بسیار حائز اهمیت است که توجه کنیم تراکم‌ناپذیری به جریان نسبت داده شده است تا سیال.

جدول ۲: خلاصه فرضیات حاکم بر مسئله

$\tau_{ij} \propto \gamma_{ij}$ $\frac{D\rho}{Dt} = 0$	۱- هوا سیالی نیوتنی، تراکم‌ناپذیر و همگن
$V = \bar{V}, V' = 0$	۲- جریان آرام
$g_x = g_y = g_z = 0$	۳- تاثیر ناچیز گرانش
$\frac{\partial}{\partial t} = 0$	۴- جریان در حال توسعه و شرایط پایا
$\Phi \approx 0$	۵- تلفات ویسکوز ناچیز

شرط مرزی

شرط مرزی عدم لغزش روی مرز جامد برای معادلات مکانیک سیالات برای دیواره‌ی نفوذ ناپذیر خواهیم داشت:

$$n \cdot V = 0, \quad n \times V = 0 \quad (5)$$

در معادلات بالا n بیانگر نرمال یکه‌ی عمود بر سطح است.

بطور معمول شرط مرزی برای فشار بصورت زیر اعمال می‌شود:

$$\frac{\partial P}{\partial n} = 0 \quad (6)$$

شرط مرزی حرارتی نیز در مرزهای جامد بصورت زیر اعمال شد:

$$T_+ = T_-, \quad q_+'' = q_-'' \quad (7)$$

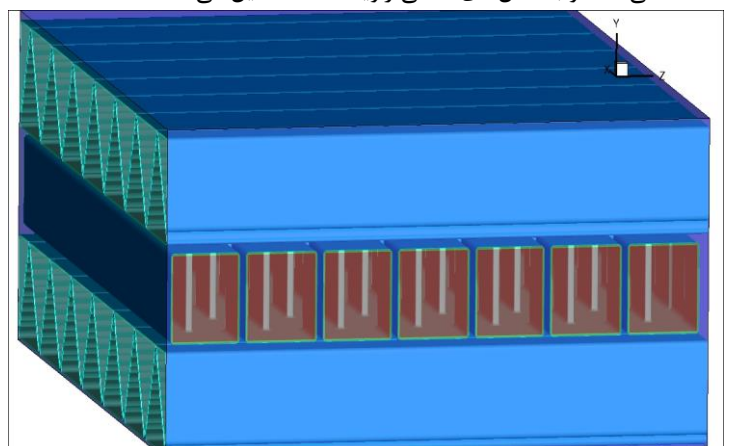
همچنین شرط مرزی هیدرودینامیکی و حرارتی برای انتهای کانال‌ها، شرط توسعه یافتگی است:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} = 0 \quad (8)$$

که i می‌تواند هر یک سه راستای x, y, z باشد

شکل هندسی:

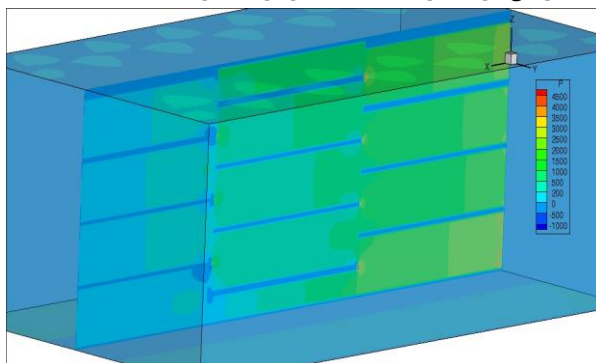
با توجه به هندسه ارائه شده در شکل (۴-۶) کانال‌های مستطیلی در عمق خود در هر فاصله‌ی ۰.۲۵ اینچ در جهت عرضی شیفت پیدا می‌کنند و با کانال‌های مثلثی زاویه قائمه تشکیل می‌دهند



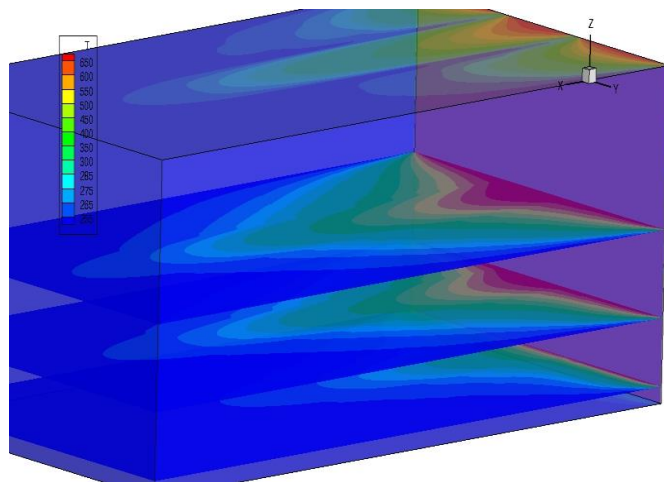
شکل ۱: هندسه تولید شده توسط کد فرترن

نهایتاً کد نوشته شده به زبان فرترن به ازای مقادیر عدد رینولدز و پراتل به دست آمده برای کانال‌های سرد و گرم با ۳۳۰ سلول در راستای (راستای کانال‌های مستطیلی) با ۱۳ کانال مثلثی، ۱۳۰ سلول در راستای و ۱۴۰ سلول در راستای (راستای کانال‌های

(کاهش سرعت در ناحیه‌ی نزدیک به دیوارها و افزایش سرعت در وسط کانال) پیش می‌روند. در شکل ۶ توزیع فشار در طول کانال مستطیلی رسم شده است. گرادین فشار منفی در طول کانال کاملاً ملموس بوده و حتی مشخصه‌ی افزایش فشار ناشی از برخورد سیال با دیواره‌ی عمودی کانال مستطیلی که در وسط جریان قرار دارد نیز قابل رؤیت است. این افزایش فشار ناشی از تغییرات در سرعت است که در راستای خودش ایجاد می‌شود. به علاوه در ابتدای کانال بیشینه‌ی فشار در گوشه‌های نزدیک به دیوارها اتفاق می‌افتد که با همین تفسیر می‌توان توجیه نمود. همچنین به خوبی می‌توان مشاهده نمود که در کانالی که ارتفاع آن کمتر است افت فشار آن بیشتر است.



شکل ۶: کانتور فشار P در سه صفحه عمود بر هم

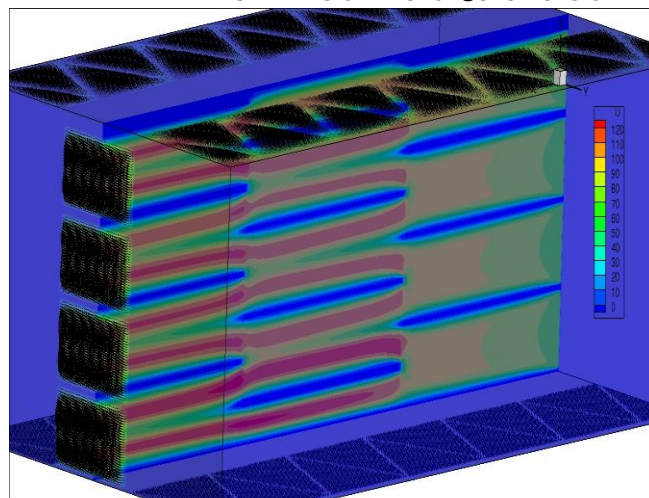


شکل ۷: کانتور دما در برش صفحات $z = cte$ از مبدل حرارتی در طول کانال مستطیلی

شکل ۷ نمایش کانتور توزیع دما در صفحات برش خورده‌ی $x = cte$ در طول کانال مستطیلی را نشان می‌دهد. نفوذ حرارت بصورت عرضی و طولی کاملاً آشکار است. از چهار کانال مستطیلی، دو کانال وسط تأثیر حرارتی بیشتری داشتند و در انتهای کانال مستطیلی بیشینه‌ی دما در مرکز (وسط) سطح مقطع مبدل قرار دارد.

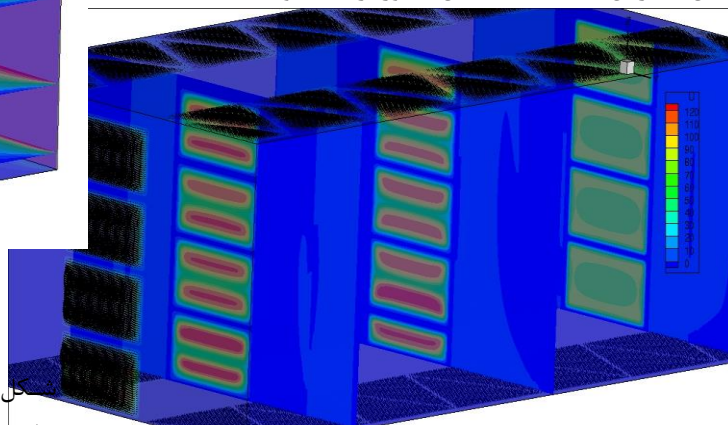
بیشترین گرادین‌های دما در نزدیکی ورودی گرم قرار دارد. این موضوع در شکل ۷ نیز قابل مشاهده است. جریان هوای گرم در ورودی چهار کانال مستطیلی را از برجستگی خطوط قرمز ابتدای

با رسیدن به همگرایی قابل قبول، نتایج عددی بصورت سه بعدی در ادامه آورده شده است. توجه شود که نمودارها و کانتورها همگی با بعد بوده و مقادیر در سیستم SI ارائه شده‌اند. این یعنی برای متغیرهای سرعت، فشار و دما به ترتیب واحدهای متر بر ثانیه، پاسکال (نیوتن بر متر مربع) و درجه کلوین لحاظ گردیده است.



شکل ۴: کانتور سرعت U در صفحه $y = L_y/2$ همراه با بردار سرعت در ورودی-خروجی

نکات بسیار زیادی را از این نمودارها می‌توان استخراج نمود که بصورت دسته‌بندی شده به آن اشاره می‌گردد. همان‌طور که در شکل ۱ و ۲ نشان داده شده، کانال‌های U (که به شکل مستطیل مدل شده‌اند) در هر فاصله‌ی 0.25 اینچ به اندازه‌ی نصف عرض کانال در جهت عرض کانال شیفت پیدا می‌کنند. این هندسه‌ی خاص کانال‌های U باعث می‌شود تا در هر فاصله‌ی 0.25 اینچ، جریان در هر کانال نصف شده و جریان نصف شده‌ی هر کانال با جریان نصف شده‌ی کانال مجاور ترکیب شود.



شکل ۵: کانتور سرعت U در سه صفحه $x = cte$ همراه با بردار سرعت در ورودی-خروجی

این حالت ترکیب شدن جریان‌ها که در شکل ۴ و ۵ به خوبی ترسیم شده است، با هدف اختلاط بیشتر و در نتیجه بهبود انتقال حرارت طراحی شده است. در نزدیکی نصف شدن جریان با توجه به کوچک شدن محلی سطح مقطع کانال، سرعت افزایش می‌یابد. شکل ۵ نشان می‌دهد که دو ناحیه‌ی پر سرعت از جریان با هم مخلوط شده که به تدریج در طول کانال به سمت همگن شدن

کانال‌های سردی (کانال‌های مثلی) که ورودی آنها از ورودی کانال‌های گرم دور هستند اثرات حرارتی ناچیزی را احساس خواهند نمود. از این رو کوتاه‌تر بودن طول کانال‌های گرم کارایی بیشتری برای گرم کردن هوای سرد خواهد داشت.



شکل ۸: عکس واقعی گرفته شده از هسته‌ی کارکرده‌ی مبدل حرارتی

مراجع

- ۱ J79, TECHNICAL PUBLICATIONS, AIRCRAFT ENGINE GROUP, EVENDALE, OHIO 45215
- ۲ White, F. M. Viscous fluid flow, 2nd edition, 1991(McGraw-Hill, Inc)
- ۳ http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page
- ۴ Patankar, S. V. and Spalding, B. D. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three dimensional parabolic flow. Int. J. Heat Mass Transf., 1972
- ۵ Third Branch of Physics, Norbert Schorghofer, August 19, 2012
- ۶ Heat exchanger design handbook, T.Kuppan, MARCEI,DEKKER,INC. NEWYORK BASE

کانال می‌توان پی برد که به تدریج به سمت یکنواخت‌تر شدن پیش می‌رود.

شکل ۷ نشان می‌دهد که در جهت طولی حرارت بیشتری نفوذ کرده است که این بخاطر وجود جریان سیال است که حرارت را جابجا نموده است (انتقال حرارت جابجایی اجباری^۱). به طور کلی هدایت حرارتی^۲ نسبت به جابجایی حرارت توسط سیال^۳ بسیار کند و زمانبر است.

نتیجه گیری:

در این پروژه با توجه به امکانات موجود حداکثر تعداد کانال و سلول برای ساخت هندسه مورد بررسی در نظر گرفته شد و معادلات حاکم بر جریان پایا، آرام و سه بعدی سیال تک‌فاز نیوتنی و تراکم‌ناپذیر و با خواص ثابت، شامل پیوستگی، ممنتم و انرژی همزمان با معادله هدایت در محیط جامد در تماس با سیال با الگوریتم پتنکار بصورت عددی در ۱۰۰۰۰ تکرار برای رسیدن به همگرایی حل شد. بخاطر حجم محاسبات بسیار بالا، مدت اجرای کد تا رسیدن به همگرایی (۴۲ ساعت و ۲۵ دقیقه) قابل توجه بود.

خلاصه‌ی نتایج و پیشنهادات این تحقیق را می‌توان در بندهای زیر خلاصه نمود:

با توجه به توزیع دمای جریان هوای گرم، می‌توان نتیجه گرفت که فقط کانال‌های موجود در یک هسته برای گرفتن عمده‌ی حرارت جریان هوای گرم کافی بوده و هسته‌ی دوم کارایی حرارتی چندانی نخواهد داشت.

این نکته بسیار حائز اهمیت است که بدانیم جدا شدن لایم استفاده شده برای چسباندن کانال‌ها، در جایی اتفاق می‌افتد که دو عامل همزمان حضور داشته باشند. اول دمای بالا برای نرم و سست کردن لایم و دوم گرادیان دمای بالا برای ایجاد نیروی حرارتی کافی است. در حضور این دو عامل احتمال جدا شدن صفحات لایم شده بسیار زیاد خواهد بود. با توجه به توزیع دمای جریان سیال در کانال‌های گرم و سرد این شرایط در ناحیه‌ی ورودی کانال‌های گرم که در مجاورت دیوارهای خنک قرار دارد اتفاق می‌افتد. این ادعا را شکل ۸، عکس واقعی گرفته شده از هسته‌ی کارکرده‌ی مبدل حرارتی تأیید می‌کند. سمت راست این شکل ورودی کانال گرم قرار دارد و گسیختگی لایم در کانال‌های سرد مثلی محرز است.

نواحی بحرانی دیگر که در رتبه‌های بعدی، به لحاظ احتمال جدا شدن صفحات لایم شده، قرار دارد کانال‌های U شکل جابجا شده در مسیر هوای گرم هستند. البته به لحاظ بحرانی بودن دیواره‌ی اولین ردیف جابجا شده بیشترین احتمال خرابی را دارا است. این امر نیز به خاطر فشار دینامیکی بالایی است که در برخورد سیال گرم با دیواره ایجاد می‌گردد. فشار دینامیکی زیادی که در لبه‌ی حمله‌ی سیال ایجاد می‌شود همراه با دمای بالای سیال احتمال خرابی لایم صفحات را افزایش می‌دهد.

^۱ Forced convection heat transfer
^۲ Conduction
^۳ Convection