روشهای تفکیک شار حرارت در مرز مشترک جامد و سیال در محیط متخلخل با استفاده از مدلسازی انتقال حرارت عدم تعادل حرارتی(LTNE)

شیرین وفاجو [۱]، دکتر محمد قلمباز [۲*]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

[۲] استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

دریافت: تابستان ۹۵ پذیرش:پائیز ۹۸

چکیده

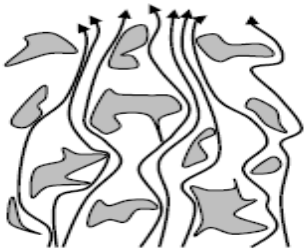
در این مطالعه شرایط گرمایی برای یک محیط متخلخل در شرایط عدم تعادل حرارتی (LTNE) مورد بررسی قرار گرفته است. اگر چه در بسیاری از کاربردهای مهندسی فرض تعادل حرارتی دارای دقت خوبی است اما در محیط متخلخل و در حالتی که اختلاف دمای بین فاز سیال و جامد زیاد باشد، از دقت پایینی برخوردار است. در این حالت باید از روش عدم تعادل حرارتی برای مدلسازی بهره برد. همچنین با ورود شار حرارت به مرز مشترک محیط متخلخل و تقسیم شدن آن بین سیال و ماتریس جامد پدیده ای بنام« شاخه ای شدن شار حرارت در مرز مشترک بین سیال و جامد» به وجود خواهد آمد. در این مطالعه این پدیده و نیز پنج مدل برای توزیع دما در مرز مشترک، تجزیه و تحلیل شده است. از آنجایی که ساختار محیط متخلخل پیچیده می باشد، در این مطالعه سعی شده است روشهایی برای مدلسازی شرایط مرزی، به وسیله مرور مطالعاتی از گذشته تا به حال مورد بررسی قرار گیرد.

* **عهده‌دار مکاتبات:** m.ghalambaz@gmail.com

کلمات کلیدی: ماده متخلخل، شرایط عدم تعادل حرارتی(LTNE)، پدیده شاخه ای شدن شار حرارت

۱- مقدمه

منظور از یک ماده متخلخل، ماده ای با شبکه جامد به همراه فضاهای خالی به هم پیوسته است.ارتباط داخلی بین این فضاهای خالی اجازه ایجاد جریان یک یا چند سیال، در میان ماده را می دهد. در صورت وجود تنها یک سیال بین دانه های جامد، محیط را اصطلاحا محیط متخلخل اشباع می نامند .در شکل(۱) یک محیط متخلخل مدل شده است. همان طور که مشاهده می شود سیالی از پایین به بالا، بین فضاهای خالی و پر به صورت نامنظم جریان دارد[۱].



شکل۱: جریان نامنظم سیال در محیط متخلخل [۱]

محیطهای متخلخل به وسیله پارامترهایی که خواص مواد متخلخل را تشکیل میدهند، مشخص می شوند. از جمله این پارامترها می توان به موارد ذیل اشاره کرد[۲].

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.1.4.1]

۱) تخلخل(ε): در محیطهای متخلخل بصورت کسری از کل حجم محیط متخلخل که توسط فضای سوراخها اشغال شده است، تعریف می شود. بنابراین ε -1 کسری است که توسط محیط جامد اشغال می شود .

$$\varepsilon = \frac{V_P}{V_T} = \frac{V_T - V_S}{V_T} \qquad (۱)$$

در رابطه بالا V_T حجم کل، V_S حجم ناحیه جامد و V_P حجم فضای خالی است .

۲) نفوذپذیری(K): یکی از خاصیتهای اساسی برای محیط های متخلخل می باشد. از این خاصیت برای تخمین زدن نسبت تزریق یا وارد شدن مایع به داخل محیط متخلخل استفاده می شود.

۳) سطح ویژه و شکل خلل و فرج

۴) ضرایب ویسکوزیته و اینرسی مواد متخلخل

۵) خواص فیزیکی و مکانیکی مواد متخلخل

در طبیعت و صنعت مواد متخلخل فراوانی یافت می شوند و در اکثر موارد نیز جریانی از میان این مواد می گذرد. در قلمرو مدلسازی و نگرش نوین، محیط متخلخل تنها به محیط های متخلخل کلاسیک مانند خاک، ماسه، چوب و محیطهای مشابه محدود نمی شود، بلکه محیط هایی با هندسه پیچیده و دارای جزییات زیاد نیز یک محیط متخلخل فرض شده و می توان تحلیل جریان در این محیط ها را از روش جریان درون محیط های متخلخل شبیه سازی و تحلیل نمود. به عنوان مثال یک محیط با فینهای زیاد و یا یک دسته لوله را می توان یک محیط متخلخل فرض کرد[۱].

دو روش متفاوت در مدل کردن انتقال حرارت در محیط متخلخل به نامهای مدل تعادل حرارتی[۱] و عدم تعادل حرارتی[۲] وجود دارد. در مدل تعادل حرارتی، فرض شده است فاز سیال و فاز جامد محیط متخلخل، در تعادل حرارتی باشند و بنابراین فقط یک معادله انرژی برای پیش بینی رفتار انتقال حرارت لازم است. از جمله کاربرد فرض تعادل حرارتی، جریان سیال در داخل محیط متخلخل، با دبی پایین و ضریب انتقال حرارت موضعی بالا بین دو فاز است. در مدل کردن عدم تعادل حرارتی، فازهای سیال و جامد در شرایط تعادل حرارتی نیستند و بنابراین سیال و جامد دماهای متفاوتی دارند. در این مورد، دو معادله انرژی یکی برای سیال و دیگری برای ماتریس جامد در نظر گرفته می شود که توسط تبدیل ترمهایی بین آنها جفت می شوند[۲].

با توجه به کاربردهای زیاد در مهندسی، انتقال حرارت جابجایی در محیط متخلخل در سالهای اخیر مورد توجه قرار گرفته است. این کاربردها شامل مهندسی زمین گرمایی، لوله های حرارتی، مبدل های حرارتی، خنک کننده های الکترونیکی، عایق حرارتی و راکتورهای شیمیایی است که در این میان انتقال گرما در سیستمهای کامپوزیت مهمتر است. این سیستم شامل یک سیستم متخلخل و یه سیستم باز است. مثال آن یک کانال پر شده با مواد متخلخل است که در این مقاله بطور کامل راجب آن بحث خواهد شد.

وفایی و تیاگاراجا[۳] آنالیز جامعی روی جریان و انتقال حرارت در سطح مشترک در محیط متخلخل را انجام دادند. آنها سه حالت کلی که ممکن است سطح مشترک داشته باشد را در نظر گرفتند.

۱) سطح مشترک بین دو محیط متخلخل متفاوت

۲) بین یک سیال و یک محیط متخلخل

۳) بین یک محیط نفوذناپذیر و یک محیط متخلخل

آنها حل تحلیلی کاملی برای توزیع دما و سرعت برای همه شرایط سطح مشترک بدست آوردند. حل عددی و تحلیلی بخوبی با هم سازگاری پیدا کردند. همچنین حل عددی و تحلیلی هر دو به وسیله یک فرضیه تجربی بررسی شدند که با آن هم سازگاری داشتند. آنها منطقه سطح مشترک را به عنوان یک لایه مرزی در نظر گرفتند و اثرات مرزی و اینرسی را که می تواند نقش مهمی در معادلات انتقال حرارت داشته باشد را در نظر گرفتند. برای آنالیز انتقال حرارت در مورد حالت دوم، دو حالت سیال با عدد پرانتل بالا و عدد پرانتل پایین را بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که اگر عدد پرانتل سیال پایین باشد، توزیع دما در داخل لایه مرزی سرعت، ثابت و برابر با دمای سطح مشترک است. این حالت شبیه حالت گذرا است. پروفیل دما در هر زمانی تغییر می کند در حالیکه دمای سطح مشترک ثابت می ماند. اما اگر عدد پرانتل زیاد باشد، توزیع دما متناسب با تغییرات ζ که پارامتر بی بعد طول است، تغییر خواهد کرد[۳]. همچنین الزمی و وفایی [۴] در حالتی جزئی تر، ویژگیهای جریان سیال و انتقال حرارت در مرز مشترک یک محیط متخلخل با سیال اشباع را بررسی نمودند. آنها پنج حالت برای شرایط مرزی جریان سیال و چهار حالت برای انتقال حرارت بین منطقه متخلخل و لایه سیال را جمع بندی کردند، که در جدول (۱)، چهار حالت انتقال حرارت نشان داده شده است.

جدول ۱: حالات شرایط مرزی انتقال حرارت بین یک محیط متخلخل و یک لایه سیال[۴]

مدل	دما	گرادیان دما
I	$T_+ = T_-$	$k_{\text{eff}}\frac{\partial T_-}{\partial y} = k_f\frac{\partial T_+}{\partial y}$
II	$T_+ = T_-$	$\Phi + k_f\frac{\partial T}{\partial y}\big\vert_- = k_{\text{eff}}\frac{\partial T}{\partial y}\big\vert_+$
III	$\frac{dT}{dy}\big\vert_+ = \frac{\alpha_T}{\lambda}(T_+ - T_-)$	$k_{\text{eff}}\frac{\partial T_-}{\partial y} = k_f\frac{\partial T_+}{\partial y}$
VI	$\frac{dT}{dy}\big\vert_+ = \frac{\alpha_T}{\lambda}(T_+ - T_-)$	$k_{\text{eff}}\frac{\partial T_-}{\partial y} = k_f\frac{\partial T_+}{\partial y}$

[۱] LTE (Local Thermal equilibrium)

[۲] LTNE (Local Thermal Nonequilibrium)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.1.4.1]

که در آن T_+ دما در سمت متخلخل، T_- دما در قسمت باز، k_f ضریب هدایت حرارتی فاز سیال، k_{eff} ضریب هدایت حرارتی موثر و α_T ضریب لغزش دما می باشد.

نوع اول از شرایط مرزی انتقال حرارت (مدل I) براساس پیوستگی دما در دیواره و همچنین شار حرارتی در مرز مشترک است. دومین مدل شامل یک افزایش ناگهانی در شار حرارتی در مرز مشترک است. مدلهای شرایط مرزی انتقال حرارت III و IV دارای یک افزایش ناگهانی در دما در مرز مشترک هستند. مشخص شد که برای شرایط مرزی انتقال حرارت در جدول (۱-۱)، در کاربردهای عملی هر چهار دسته تولید نتایج یکسان می کنند. با اینحال اختلاف کوچکی ممکن است در رینولدزهای کوچک و دارسی های بالا اتفاق بیفتد[۴].

تحقیق یانگ و وفائی[۵] یکی از نخستین تلاش‌ها برای مطالعهٔ پدیدهٔ شاخه ای شدن شار حرارتی در محیط متخلخل بشمار می رود. آنها پدیده شاخه ای شدن گرادیان دما در محیط متخلخل را با استفاده از تجزیه و تحلیل انتقال حرارت همرفتی درون یک کانال پرشده با متخلخل و با تولید حرارت داخلی و در حالت عدم تعادل حرارتی، بررسی کردند. پاسخ‌های دقیقی برای هر دو الگوی توزیع دمای سیال و جامد در انتقال حرارت همرفتی بدست آوردند. درعین حال شرایط لازم برای شاخه ای شدن گرادیان دمای فازهای سیال و جامد در دیوارهٔ کانال را تعیین کردند. راه حل دقیق برای توزیع دما در دو فاز سیال و جامد برای دو مدل A و B برای شار ثابت در دیواره بررسی شده است، که در ادامه بطور کامل در مورد این مدلها صحبت خواهد شد. اما بطور خلاصه در مدل A دمای جامد و مایع در سطح مشترک دیواره با هم برابر است و در مدلB، بخشی از تولید حرارتی می تواند به فاز مایع منتقل شود و بخش دیگر وارد فاز جامد شود. به این صورت انتقال حرارت داخلی بین سیال و جامد جابجا می شود. این موضوع باعث شاخه ای شدن گرادیان دما در دیواره می شود. نشان داده شد که توزیع دمای بی بعد برای دو فاز، مستقل از تولید حرارت داخلی فاز مایع برای مدل A و B است. با افزایش عدد Bi، اختلاف دما بین فاز سیال و جامد کاهش می یابد. همچنین آنها نتیجه گرفتند که تولید حرارت داخلی در فاز جامد تاثیر قابل توجهی روی ویژگیهای انتقال حرارت می گذارد که با پارامتر β نشان داده می شود[۵].

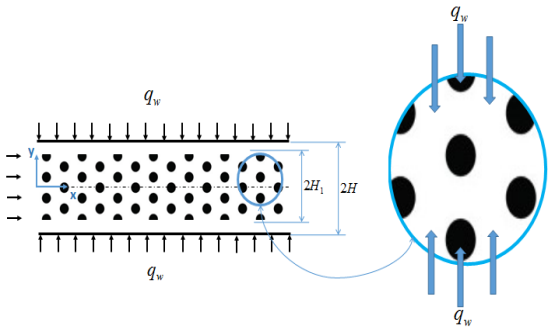
$$Bi = \frac{h_i \alpha H^2}{k_{s.eff}} \quad (۲)$$

$$\beta = \frac{S_s H}{q_w} \quad (۳)$$

در ادامه یانگ و وفایی در[۶] حل دقیق توزیع دما برای سیال و جامد بصورت پنج مدل در مرز مشترک محیط متخلخل، در [۱۰] پدیده شاخه ای شدن شار حرارت در محیط متخلخل در حالت شرایط ناپایدار و در [۱۱] پدیدهٔ شاخه ای شدن شارحرارت در کانال متخلخلی با در نظر گرفتن تاثیرات پراکندگی و اینرسی را تحلیل کردند. پس از انتشار مقالات یانگ و وفایی[۶و۱۰و۱۱]، نیلد [۱۲] طی مقاله ای نقض هایی را به مدلهای ارائه شده توسط یانگ و وفایی وارد دانست. در همان سال یانگ و وفایی [۱۳] مقاله ای در جواب به مقاله آقای نیلد[۱۲] منتشر کردند و در آن مسائل اساسی و مفاهیم مربوط به عدم تعادل حرارتی موضعی و پدیده شاخه ای شدن شارحرارتی در محیط متخلخل را یاداور شدند.

۲- مدلسازی ها و نتایج آنها

یانگ و وفایی [۶] جریان سیالی درون یک کانال مستطیلی را که با متخلخل پر شده و شار حرارتی ثابتی در دیواره به آن وارد می شود، را بررسی نمودند. شماتیک مسئله در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل۲: شماتیک جریان سیال درون کانال پرشده با متخلخل و یک المان حجمی[۳]

فرضیات زیر در نظر گرفته شد:

۱) جریان پایا و تراکم ناپذیر است.

۲) همرفت طبیعی و انتقال حرارت تشعشعی قابل صرفنظر است.

۳) جریان کاملا توسعه یافته و مدل دارسی می باشد.

۴) خواصی مانند تخلخل، گرمای ویژه، چگالی و هدایت حرارتی ثابت در نظر گرفته شد.

معادلات حاکم به طور جداگانه برای محیط متخلخل و محیط باز نوشته شده اند، که برای منطقه متخلخل معادلات انرژی از مقالات امیری و وفایی [۷ و۸] در شرایط عدم تعادل حرارتی مورد استفاده قرار گرفته است[۶].

برای محیط متخلخل:

$$k_{f.eff}\frac{\partial^2 T_f}{\partial y^2} + h_i \alpha (T_s - T_f) = \rho c_p u \frac{\partial T_f}{\partial x} \quad (۴)$$

$$k_{s.eff}\frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} - h_i \alpha (T_s - T_f) = 0 \quad (۵)$$

$$-\frac{\mu_f}{K} u - \frac{dP}{dx} = 0 \quad (۶)$$

[۳] The representative elementary volume (r.e.v.)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.1.4.1]

که معادله (۴) و(۵) معادلات انرژی و معادله (۶) معادله مومنتوم برای محیط متخلخل است و در آن T_s و T_f به ترتیب دمای جامد و سیال، u سرعت سیال، $K_{f.eff}$ و $K_{s.eff}$ به ترتیب ضریب هدایت فاز سیال و جامد، ρ دانسیته، c_p ظرفیت حرارتی ویژه سیال ، h_i ضریب انتقال حرارت در مرز مشترک، α سطح در واحد حجم محیط متخلخل، K ضریب گذردهی، μ_f ویسکوزیته دینامیکی سیال و p فشار می باشد.

برای محیط باز :

$$-\frac{dP}{dx}+\mu_f\frac{d^2u}{dy^2}=0 \qquad (۷)$$

$$k_f\frac{d^2T_f}{dy^2}=\rho c_p u\frac{\partial T_f}{\partial x} \qquad (۸)$$

که معادله (۷) معادله مومنتوم و معادله (۸) معادله انرژی برای محیط باز می باشد. آنها پنج مدل برای توصیف شرایط دمایی در منطقه مرز مشترک بین منطقه باز و متخلخل را معرفی نمودند[۶].

مدل A

هنگامیکه انتقال حرارت بین سیال و جامد در مرزمشترک به اندازه کافی بزرگ باشد، این دماها در مرز مشترک با هم برابرند.

$$T_f\big|_{y=H_1^-}=T_s\big|_{y=H_1^-}=T_f\big|_{y=H_1^+} \qquad (۹)$$

$$k_{f.eff}\frac{\partial T_f}{\partial y}\Big|_{y=H_1^-}+k_{s.eff}\frac{\partial T_s}{\partial y}\Big|_{y=H_1^-}=k_f\frac{\partial T_f}{\partial y}\Big|_{y=H_1^+}=q_i \qquad (۱۰)$$

که در آن q_i شار حرارتی در مرز مشترک است.

مدل B

هنگامی که انتقال حرارت در مرز مشترک به اندازه کافی بزرگ نباشد، دماها در سطح مشترک برابر نیستند و پارامتر گرمایی رابط β برای محاسبه شار انتقال حرارت کلی بین جامد و سیال در مرز مشترک معرفی شد.

$$T_f\big|_{y=H_1^-}=T_f\big|_{y=H_1^+} \qquad (۱۱)$$

$$k_f\frac{\partial T_f}{\partial y}\Big|_{y=H_1^+}=q_i \qquad (۱۲)$$

$$k_{f.eff}\frac{\partial T_f}{\partial y}\Big|_{y=H_1^-}=\beta q_i \qquad (۱۳)$$

$$k_{s.eff}\frac{\partial T_s}{\partial y}\Big|_{y=H_1^-}=(1-\beta)q_i \qquad (۱۴)$$

که β نسبت شار حرارتی سیال به شار حرارتی کلی در مرز مشترک است و به سه روش زیر محاسبه می شود

$$Model\ B.1 \qquad \beta_1=\frac{k_{f.eff}}{k_{f.eff}+k_{s.eff}} \qquad (۱۵)$$

$$Model\ B.2 \qquad \beta_2=\frac{k_f}{k_f+k_s} \qquad (۱۶)$$

$$Model\ B.3 \qquad \beta_3=\varepsilon \qquad (۱۷)$$

مدل C

در مدل C دماهای فاز سیال و جامد براساس مرز مشترک مطرح نشده اند و شار انتقال حرارت برای دو مرز مشترک به وسیله مقاله [۸] مورد استفاده قرار گرفته است که در آن h_{int}(ضریب انتقال حرارت مرز مشترک)، برای محاسبه انتقال حرارت بین سیال و جامد در مرز مشترک مورد استفاده قرار می گیرد.

$$T_f\big|_{y=H_1^-}=T_f\big|_{y=H_1^+} \qquad (۱۸)$$

$$k_f\frac{\partial T_f}{\partial y}\Big|_{y=H_1^+}=q_i \qquad (۱۹)$$

$$k_{f.eff}\frac{\partial T_f}{\partial y}\Big|_{y=H_1^-}=q_i-h_{int}\left(T_f\big|_{y=H_1^-}-T_s\big|_{y=H_1^-}\right) \qquad (۲۰)$$

$$k_{s.eff}\frac{\partial T_s}{\partial y}\Big|_{y=H_1^-}=h_{int}\left(T_f\big|_{y=H_1^-}-T_s\big|_{y=H_1^-}\right) \qquad (۲۱)$$

برای بی بعد سازی معادلات حاکم متغیرهای بی بعد بصورت زیر تعریف می شوند:

$$\theta=\frac{k_{s.eff}(T-T_{s.i})}{q_w H} \quad \eta=\frac{y}{H} \quad \eta_1=\frac{H_1}{H}$$
$$k=\frac{k_{f.eff}}{k_{s.eff}} \quad k_1=\frac{k_f}{k_{s.eff}} \quad Bi=\frac{h_i\alpha H^2}{k_{s.eff}}$$
$$Bi_{int}=\frac{h_{int}H}{k_{s.eff}} \quad Da=\frac{K}{H^2} \quad U=\frac{u}{-\frac{H^2}{\mu_f}\frac{dP}{dx}} \qquad (۲۲)$$

از مقایسه راه حل مدلهای A، B و C برخی ویژگیهای جالب فیزیکی حاصل می شود و این نتیجه بدست می آید که این راه حل ها می توانند بین یکدیگر، طبق شرایط زیر تبدیل شوند :

۱) وقتیکه $\beta=\beta_{cr}$ دمای فاز سیال و جامد در مرز مشترک معادل هم هستند، بنابراین راه حل مدل B قابل تبدیل به راه حل مدل A است. (β_{cr} نسبت بحرانی شار حرارتی فاز سیال به شار حرارتی کل در مرز مشترک است و نشان دهنده حداقل نسبت شار حرارتی فاز سیال به شار حرارتی کل در مرز مشترک است).

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.1.4.1]

۲) وقتیکه $\beta = 1 - D_8 \mathrm{Bi}_{\mathrm{int}} \eta_1$ راه حل برای مدل B قابل تبدیل به مدل C است.

که در آن پارمترهای D_4 ، D_5 و D_8 بصورت زیر تعریف می شوند

$$D_4 = \frac{Bi\eta_1 + \mathrm{Bi}_{\mathrm{int}}}{\lambda k^2 \sinh(\lambda\eta_1) + \mathrm{Bi}_{\mathrm{int}} k(1+k)\cosh(\lambda\eta_1)} \quad (۲۳)$$

$$D_5 = \frac{\mathrm{D}_4 k^2}{\mathrm{Bi}\eta_1^2(1+k)}\cosh(\lambda\eta_{1)} - \frac{1}{\mathrm{Bi}\eta_1^2(1+k)} - \frac{1}{2(1+k)} \quad (۲۴)$$

$$D_8 = \frac{\mathrm{D}_4}{\lambda^2\eta_1^2}\cos(\lambda\eta_1) + \frac{1}{2(1+k)} + \mathrm{D}_5 \quad (۲۵)$$

۳) وقتیکه $\mathrm{Bi}_{\mathrm{int}} \to \infty$ دمای سیال و جامد در مرز مشترک معادل هم است، بنابراین حل مدل C قابل تبدیل به مدل A و فاز جامد در متخلخل می تواند حداکثر کسری از شار حرارتی کلی در مرز مشترک را بگیرد که معادل با $1 - \beta_{\mathrm{cr}}$ باشد.

۴) زمانیکه $\mathrm{Bi}_{\mathrm{int}} \to 0$ تبادل حرارت بین سیال و جامد در مرز مشترک به صفر می رسد. بنابراین حل برای مدل C می تواند برای $\beta = 1$ ، به حل مدل B تبدیل شود.

پس از آن یانگ و وفایی [۱۰] پدیده شاخه ای شدن شار حرارت در محیط متخلخل، برای شرایط ناپایدار و دو نوع اصلی مدل شاخه ای شدن شار حرارت را بررسی کردند. پدیده شاخه ای شدن شار حرارت برای فاز جامد و سیال در دیواره، در یک چهارچوب زمانی در یک منطقه محوری رخ می دهد. این پدیده با زمان تغییر می کند و وابسته به پارامترهایی چون k و β است. هدایت حرارتی در دیواره نشان داد که برای انجام انتقال حرارت کلی بین سیال و جامد درون منطقه شاخه ای شدن، به ترتیب باید η_1 کوچک و k بزرگ باشد. زمان مشخصه، محاسبه زمانی که طول می کشد تا سیال و جامد به پایداری برسند را معرفی می کند. این زمان مشخصه با افزایش β، k و η_1 افزایش می یابد[۱۰].

همچنین یانگ و وفایی[۱۱]پدیدهٔ شاخه ای شدن شارحرارتی در کانال متخلخلی در شرایط عدم تعادل حرارتی و با در نظر گرفتن تاثیرات پراکندگی و اینرسی را تحلیل کرده اند. پاسخ‌های دقیقی برای هر دو الگوی توزیع دمای سیال و جامد برای هرسه مدل حرارتی در سطح مشترک متخلخل- سیال تعیین شدند. در این تحقیق، از سه مدل A,B,C برای توصیف شرایط حرارتی در سطح مشترک سیال- مادهٔ متخلخل بهره گرفته شده است. هنگامی که انتقال حرارت بین فاز سیال و جامد نزدیک بینهایت نیست و دماها در سطح مشترک با هم برابر نیستند، پدیده شاخه ای شدن شار حرارتی درون محیط متخلخل رخ می دهد. نتایج نشان داد که عدد دارسی و ارتفاع بدون بعد در محیط متخلخل دو پارامتر مهم هستند که روی پراکندگی دمایی و پارامتر اینرسی تاثیرگذار هستند. همچنین مشخص شد که اثر پراکندگی دمایی زمانیکه با اثر اینرسی ترکیب شود، تضعیف می شود[۱۱].

بعد از انتشار این مقالات از وفایی و یانگ[۶ و۱۰و۱۱]، نیلد [۱۲] مقاله ای در مورد مقالات یانگ و وفایی نوشت و در آن نقض هایی را به مدلهای ایشان وارد دانست، که به شرح زیرند:

۱) آنها پنج حالت را بررسی کردند و توضیح مختصری راجب فیزیک مدلهای خود ارائه دادند.

۲) پدیده شاخه ای شدن برای پارامتری که از یک مقدار بحرانی گذشته است رخ می دهد. اما یانگ و وفایی، در یک حالت کلی بحث کردند و راه حل معادلات دیفرانسیل آن برخاسته از اطلاعات نامشخص است.

۳) مدلی که به عنوان پایه مدل C در نظر گرفته شده، توسط اوچوا- تاپیا [۹] مطرح شده است، که در آن ضریب انتقال حرارت در مرز مشترک h_{int} است، که به وسیله محاسبه تبادل حرارتی بین فازهای سیال و جامد در مرز مشترک به دست می آید. نتایج مقاله [۹] بر فرض تعادل گرادیان محلی، استوار است. به عنوان مثال گرادیان دمایی در دوفاز متخلخل می تواند حتی زمانیکه دو دما برابر نیستند، یکسان فرض شوند. نویسنده باید بداند که هیچ توجیه فیزیکی برای تعادل گرادیان محلی وجود ندارد.

۴) به طور کلی اگر مرز جامد دارای شار ثابت باشد، نتیجه این می شود که شار منطقه متخلخل در مرز مشترک نیز ثابت است. بنابراین وقتی شار تقسیم می شود، همان شار فاز سیال را در فاز جامد هم داریم. این بدان معناست که انتقال حرارت سطحی بین فاز سیال و جامد به نسبت ε به $(1-\varepsilon)$ تقسیم می شود. به عبارت دیگر در این شرایط مدل B.3 مناسب است. اینگونه به نظر می رسد که هیچ تأیید فیزیکی برای مدلهای B.1 ، B.2 و C وجود ندارد.

در همان سال یانگ و وفایی [۱۳] مقاله ای در جواب به مقاله آقای نیلد[۱۲] منتشر کردند و در آن مسائل اساسی و مفاهیم مربوط به عدم تعادل حرارتی موضعی و پدیده شاخه ای شدن شارحرارتی در محیط متخلخل را یاداور شدند. آنها متذکر شده اند که کار یانگ و وفایی[۵و۶] اولین تلاش برای مطالعه پدیده شاخه ای شدن شار حرارتی در محیط متخلخل تحت شرایط عدم تعادل حرارتی بوده است ودر تمام موارد آن بررسی کاملی صورت گرفته است. برخی نکات این مقاله به شرح زیرند:

۱) نیلد [۱۲] تلاش کرده است که شرایط حرارتی مرز مشترک را براساس شرایط مرزی گرمایی مطالعه کند. باید توجه داشت که تعیین شرایط حرارتی در مرز مشترک و در دیواره کاملا متفاوت است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.1.4.1]

۲) در کار یانگ و وفایی[۶] نتایج برای پنج مدل به دست آمده به هر مدل دیگری قابل تبدیل است و تعادل بین مدلها بررسی شده است که به وضوح می تواند نشاندهنده ثبات فیزیکی بین مدلها باشد.

۳) برخلاف آنچه نیلد [۱۲] اعلام کرد، در کار یانگ و وفایی براساس مدلهای A، B.1 ، B.2 ، B.3 وC شار حرارتی کلی در مرز مشترک (q_i)، بین فازهای جامد و سیال به راحتی قابل محاسبه است.

۴) در کار یانگ و وفایی [۱۲]، مدل B از نظر شار حرارتی کلی بین جامد و سیال در مرز مشترک ارائه شده است. مدلهای B.1 ، B.2 و B.3سه روش محتمل برای مدل B هستند. همچنین مدل B می تواند بطور مستقیم استفاده شود. آنالیز نتایج بخوبی نشان می دهد که اعتبار هر مدل برای طیف وسیعی برقرار است گرچه مدل B.3 همیشه معتبر نیست.

۳-نتیجه گیری

در این مطالعه سعی شده است روشهایی برای تفکیک شار حرارتی در مرز مشترک بین سیال و جامد در محیط متخلخل مورد بررسی قرار گیرد. برای مدلسازی از مدل عدم تعادل حرارتی[۴] استفاده شده است که در آن فازهای سیال و جامد در شرایط تعادل حرارتی نیستند و بنابراین سیال و جامد دماهای متفاوتی دارند. در این حالت باید دو معادله انرژی یکی برای سیال و دیگری برای ماتریس جامد در نظر گرفته شود. این پدیده بیان می کند که جهت شیب دمایی برای سیال و جامد در دیواره متفاوت است. از طرفی قسمت شدن شار حرارتی در مرز مشترک محیط متخلخل که اولین بار توسط وفایی و یانگ[۵] در سال ۲۰۱۰ «پدیده شاخه ای شدن شار حرارتی در مرز مشترک بین سیال و جامد محیط متخلخل» نامیده شد، در این مطالعه بحث شده است. برای بررسی این پدیده پنج مدل برای سطح مشترک سیال و جامد ارائه شده است. تجزیه و تحلیل نتایج اینگونه نشان می دهد که این پنج مدل در محدوده زیادی معتبر می باشند و همچنین ثبات فیزیکی بین آنها برقرار است. از آنجاییکه شرایط مرزی تاثیر مهمی در انتقال حرارت محیط متخلخل در شرایط عدم تعادل حرارتی دارد، مدلهای ارائه شده توسط یانگ و وفایی[۶] می توانند برای تعیین توزیع شار حرارتی کلی در دیواره، در زمانیکه یک محیط متخلخل به دیواره کانال متصل است، مورد استفاده قرار گیرند .

۴-علامت ها و اختصارات

V_T	حجم کل(m^3)
V_s	حجم ناحیه جامد(m^3)
V_p	حجم فضای خالی(m^3)
ε	تخلخل
K	ضریب گذردهی(m^2)
k_f	ضریب هدایت حرارتی فاز سیال(W/mK)
k_s	ضریب هدایت حرارتی فاز جامد(W/mK)
$k_{s.eff}$	ضریب موثر هدایت فاز سیال(W/mK)
$k_{f.eff}$	ضریب موثر هدایت فاز جامد(W/mK)
T	دما(K)
T_s	دمای جامد(K)
T_f	دمای سیال(K)
H	ارتفاع کانال(m)
H_1	ارتفاع منطقه متخلخل (m)
q_w	شار حرارتی دیواره(W/m^2)
q_i	شار حرارتی کل(W/m^2)
Bi	عدد بایو ($Bi=\frac{h_i \alpha H^2}{k_{s.eff}}$)
β	نسبت شار حرارتی فاز سیال به شار حرارتی کل در مرز مشترک
α	سطح در واحد حجم محیط متخلخل($1/m$)
Bi_{int}	عدد بایو در سطح مشترک($Bi_{int}=\frac{h_{int} H}{k_{s.eff}}$)
β_{cr}	نسبت بحرانی شار حرارتی سیال به شار حرارتی کل در مرز مشترک
Da	عدد دارسی($Da=\frac{K}{H^2}$)
η	پارامتر بی بعد(معادله ۲۲)($\eta=\frac{y}{H}$)
η_1	پارامتر بی بعد(معاده ۲۲)
μ_f	ویسکوزیته دینامیکی (Kg/ms)
P	فشار(atm)
S_s	تولید حرارت داخلی در فاز جامد(W/m^3)
α_T	ضریب لغزش دما در جدول(۱-۱)
ρ	دانسیته(Kg/m^3)
u	سرعت سیال(m/s)
D_8	ضریب ثابت(معادله ۲۵)

[۴] LTNE (Local Thermal Nonequilibrium)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.1.4.1]

D_4	ضریب ثابت(معادله ۲۳)
D_s	ضریب ثابت(معادله ۲۴)
h_{i}	ضریب انتقال حرارت در مرز مشترک(W/m^2K)
k_{eff}	ضریب هدایت موثر(W/mK)
ζ	پارامتر بی بعد طول $\zeta = \frac{x}{\mathrm{L}}$
+	سمت محیط متخلخل
-	سمت محیط باز

۵- منابع

[1] D.A.Nield, A.Bejan , "convection in porous media", third ed, springer, New York ,2006.

[2] ن.علیمردانی، "بهبود انتقال حرارت همرفتی اجباری با استفاده از محیط متخلخل"، مجله مبدل گرمایی، ۱۳۹۳.

[3] K.Vafai, R.Thiyagaraja,(1986), "Analysis of flow and heat transfer at the interface region of a porous medium", Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 30, No. 7, PP. 1391-1405, 2006.

[4] B.Alazmi, K.Vafai, "Analysis of fluid flow and heat transfer interfacial conditions between a porous medium and a fluid layer", Int. J. Heat and Mass Transfer 44 ,pp. 1735-1749,2001.

[5] K.Yang, K.Vafai, "Analysis of temperature gradient bifurcation in porous media–An exact solution", Int. J. Heat and Mass Transfer 53,pp. 4316–4325, ,2010.

[6] K.Yang, K.Vafai, "Restrictions on the Validity of the Thermal Conditions at the Porous-Fluid Interface-An Exact Solution", Int. J. Heat Transfer, , Vol. 133 / 112601-1,2011.

[7] A.Amiri, K.Vafai, "Analysis of Dispersion Effects and Non-Thermal Equilibrium Non-Darcian, Variable Porosity Incompressible Flow Through Porous Medium", Int. J. Heat Mass Transfer, 37, pp. 939–954,1994.

[8] A.Amiri, K.Vafai, "Transient Analysis of Incompressible Flow Through a Packed Bed", Int. J. Heat Mass Transfer, 41, pp. 4259–4279,1998.

[9] J.A Ochoa-Tapia, S.Whitaker, "Heat Transfer at the Boundary Between a Porous Medium and a Homogeneous Fluid", Int. J. Heat Mass Transfer, 40(11), pp. 2691–2707,1997.

[10] K.Yang, K.Vafai, "Transient Aspects of Heat Flux Bifurcation in Porous Media: An Exact Solution",Int. J. Heat Transfer, Vol. 133/ 052602-1,2011.

[11] K.Yang, K.Vafai, "Analysis of heat flux bifurcation inside porous media incorporating inertial and dispersion effects –An exact solution", Int. J. Heat and Mass Transfer, pp. 54 5286–5297,2011.

[12] D. A. Nield, "A Note on Local Thermal Non-Equilibrium in Porous Media Near Boundaries and Interfaces", Transp Porous Med, DOI 10.1007/s11242-012-0063-4, 2012.

[13] K.Vafai, K.Yang, "A Note on Local Thermal Non-equilibrium in Porous Media and Heat Flux Bifurcation Phenomenon in Porous Media",Transp Porous Med, DOI 10.1007/s11242-012-0080-3,2012.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.1.4.1]