دانشگاه بیرجند

دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

آنالیز حرارتی سه بعدی مشعل های متخلخل تحت تأثیر میدان تابشی

با استفاده از روش جهت های مجزا

اساتید راهنما:

دکتر علی صفوی نژاد

دکتر سید عبدالرضا گنجعلیخان نسب

گردآورنده:

هدی شعبانی نژاد

بسم الله الرحمن الرحیم

یک چند به کودکی به استاد شدیم　　یک چند به استادی خود شاد شدیم

پایان سخن شنو که ما را چه رسید　　از خاک درآمدیم و بر باد شدیم

برترین علم آن است که در اعمال و رفتارعیان شود.

حضرت علی (ع)

دانشگاه بیرجند

دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

آنالیز حرارتی سه بعدی مشعل های متخلخل تحت تأثیر میدان تابشی

با استفاده از روش جهت های مجزا

اساتید راهنما:

دکتر علی صفوی نژاد

دکتر سید عبدالرضا گنجعلیخان نسب

گردآورنده:

هدی شعبانی نژاد

تقدیم به:

پدر و مادر بزرگوارم

که هرچه دارم حاصل تربیت مشفقانه و دعای خیر آنهاست.

همسر مهربانم

که مشوق اصلی بنده در این راه بودند.

و

فرزند نازنینم.

تقدیر و تشکر

یا رب دل پاک وجان آگاهم ده

آه شب و گریه سحرگاهم ده

در راه خود اول از خودم، بیخود کن

بیخود چو شدم زخود به خود راهم ده

حمد و سپاس خداوند بلند مرتبه را کـه فرصـتی عنایـت فرمـود برگـی از عظمـت خلقـت و آفرینش را مطالعه نمایم و پله ای دیگر از مدارج علمی را بپیمایم، که این خود نیز راهی بـه سـوی اوست. اکنون بر خود لازم می دانم تا مراتب سپاس و قدردانی خود را از بزرگوارانی به جا آورم کـه در این مسیر مرا یاری نمودند:

اساتید راهنمای گرانقدرم جناب آقای دکتر سید عبدالرضا گنجعلیخان نسب و جنـاب آقـای دکتر علی صفوی نژاد که با رهنمود های دلسوزانه شان راهنمایی این تحقیق را تقبل نمودنـد و در تمامی مراحل آن مرا یاری نمودند. همچنین از جناب آقای مهندس جهانشاهی که در پر بار کـردن محتوای علمی این پایان نامه صمیمانه کوشیدند، تشکر و قدردانی می کنم.

در انتها از خداوند منان برای این بزرگواران توفیق روزافزون مسئلت دارم.

چکیده

تحقیقات و پیشرفت های اخیر در زمینه احتراق و طراحی مشعل ها به سمت داشتن یک محیط پاکیزه و کم کردن اتلاف انرژی سوق داده شده اند. یکی از سیستم های احتراقی بسیار کارآمد با انتشار آلودگی پایین، مشعل های متخلخل تابشی می باشند. احتراق در مشعل های متخلخل تکنیکی است که در آن مخلوط سوخت و هوا وارد یک ماتریس جامد متخلخل می شود، چون دمای مواد جامد بالاتر از دمای گازهای ورودی است، مخلوط سوخت و هوا در حین عبور از خلل و فرج مواد متخلخل، قبل از رسیدن به محفظه احتراق، بواسطه انتقال حرارت جابجایی پیش گرم شده و به دمای اشتعال نزدیک می شود. حال به محض ورود گاز (که دمای آن نسبت به حالت اولیه افزایش یافته) به داخل مشعل، واکنش شیمیایی اتفاق افتاده و آنتالپی احتراق رها می شود. قسمتی از این گرمای واکنش بوسیله انتقال حرارت تابشی و هدایت حرارتی از طریق مواد جامد به ناحیه ورودی (پیش گرمایش) منتقل می شود و مابقی گرمای واکنش از طریق مواد جامد و گازهای محصولات احتراق بواسطه انتقال حرارت هدایت، تابش و جابجایی به پایین دست جریان می رسد. اینگونه مشعل ها مزایای متعددی نسبت به مشعل های معمولی دارند. آنها دارای توان حرارتی بالاتر، پایداری شعله بیشتر و دمای محفظه احتراق کمتر هستندکه موجب کاهش تولید گازهای NO_x وکاهش انتشار گازهای CO می شود.

در کار حاضر، آنالیز حرارتی سه بعدی مشعل های متخلخل تابشی مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجا که دو فاز جامد و گاز در تعادل حرارتی قرار ندارند، لازم است که معادله انرژی برای فاز جامد و فاز گاز به طور جداگانه نوشته شده و حل عددی گردند. اثرات هدایت حرارتی هم برای فاز جامد و هم برای فاز گاز لحاظ شده است. محیط متخلخل علاوه بر انتقال حرارت جابجایی با جریان گاز قادر است انرژی تابشی را جذب، پخش و صادر کند در حالیکه از اثرات تابشی فاز گاز در مقایسه با فاز جامد صرفنظر شده است.

جهت آنالیز حرارتی مشعل متخلخل، معادلات انرژی فاز گاز و فاز جامد و معادله انتقال تابش به طور همزمان حل عددی گردیده است تا توزیع دمای فازهای جامد و گاز و توزیع شار تابشی در طول محیط متخلخل بدست آیند.

از آنجایی که پدیده انتقال حرارت تابشی نقش اساسی را در فرآیند احتراق داخل مشعل های متخلخل تابشی دارد، لذا داشتن مدل حرارتی مناسب برای آنالیز مشخصه های اینگونه مشعل ها بسیار حایز اهمیت است. در کار حاضر سعی شده است جهت آنالیز مشعل متخلخل از روش جهت های مجزا تحت تاثیر میدان تابشی سه بعدی استفاده شود. در ادامه اثر پارامترهای مختلف بر عملکرد سیستم مورد مطالعه قرار گرفته است. انطباق بین نتایج کار حاضر و نتایج دیگر محققین رضایت بخش می باشد، علیرغم اینکه از مدل های تابشی مختلف جهت انجام محاسبات بهره گرفته شده است.

کلمات کلیدی: مشعل های متخلخل تابشی، روش جهت های مجزا، آنالیز سه بعدی

فهرست مطالب

عنوان .....صفحه

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱ مقدمه.....۲

۱-۱-۱ بازیافت انرژی با استفاده از محیط متخلخل.....۳

۱-۱-۲ استفاده از مشعل متخلخل.....۶

۱-۲ مواد سازنده مشعل متخلخل ۹

۱-۳ اشکال مورد استفاده در مشعل های متخلخل ۱۲

۱-۴ کاربرد مشعل های متخلخل.....۱۲

۱-۵ مروری بر کارهای انجام شده ۱۲

۱-۶ هدف از کار حاضر.....۲۰

فصل دوم: شرح مسأله و معادلات حاکم.....۲۱

۲-۱ مقدمه.....۲۲

۲-۲ مشعل متخلخل ۲۲

۲-۳ معادلات حاکم.....۲۴

۲-۳-۱ معادله انرژی فاز گاز ۲۴

۲-۳-۲ معادله انرژی فاز جامد.....۲۵

۲-۳-۳ معادله انتقال حرارت تابشی ۲۹

۲-۴ شرایط مرزی.....۳۰

۲-۴-۱ شرایط مرزی فاز گاز.....۳۱

۲-۴-۲ شرایط مرزی فاز جامد ۳۱

۲-۴-۳ شرایط مرزی معادله انتقال حرارت تابشی.....۳۲
۲-۵ پارامترهای بی بعد.....۳۳
۲-۵-۱ شکل بدون بعد معادلات.....۳۴
۲-۵-۲ شکل بدون بعد شرایط مرزی.....۳۵
۲-۵-۲-۱ شرایط مرزی بی بعد فاز گاز.....۳۵
۲-۵-۲-۲ شرایط مرزی بی بعد فاز جامد.....۳۵
۲-۵-۲-۳ شرایط مرزی بی بعد معادله انتقال تابش.....۳۶
فصل سوم: حل عددی معادلات حاکم.....۳۷
۳-۱ مقدمه.....۳۸
۳-۲ انفصال معادلات.....۳۸
۳-۲-۱ انفصال معادله انرژی فاز گاز.....۳۹
۳-۲-۲ انفصال معادله انرژی فاز جامد.....۴۱
۳-۳ الگوریتم ماتریس سه قطری(الگوریتم توماس).....۴۳
۳-۴ حل معادله انتقال حرارت تابشی.....۴۳
۳-۵ الگوریتم حل معادلات حاکم بر مشعل متخلخل.....۵۰
فصل چهارم: نتایج.....۵۱
۴-۱ مقدمه.....۵۲
۴-۲ اعتبارسنجی روش جهت های مجزا.....۵۲
۴-۳ اعتبار سنجی محاسبات.....۵۴
۴-۴ توزیع درجه حرارت گاز و محیط متخلخل و شار حرارتی تابشی در طول مشعل متخلخل..۵۶
۴-۵ اثر عمق اپتیکی بر توزیع درجه حرارت گاز و شار حرارتی تابشی در طول مشعل متخلخل.۶۳
۴-۶ اثر نسبت پخش بر توزیع درجه حرارت گاز شار حرارتی تابشی در طول مشعل متخلخل...۶۶

۴-۷ اثر ضریب انتقال حرارت جابجایی بر عملکرد مشعل متخلخل.....۶۹
۴-۸ اثرضریب هدایت حرارتی محیط متخلخل بر عملکرد مشعل متخلخل ۷۰
۴-۹ تأثیر ضریب تخلخل بر عملکرد مشعل متخلخل.....۷۲
۴-۱۰ تأثیر موقعیت شعله بر عملکرد مشعل متخلخل.....۷۴
۴-۱۱ آنالیز مشعل متخلخل با در نظر گرفتن چشمه تولید حرارت غیر یکنواخت ۷۶
۴-۱۲ مقایسه نتایج در حالت های دو بعدی و سه بعدی ۸۰
۴-۱۳ توزیع درحه حرارت گاز با در نظر گرفتن شرط مرزی غیر آدیاباتیک ۸۳
فصل پنجم: جمع بندی و پیشنهادات ۸۶
۵-۱ جمع بندی.....۸۷
۵-۲ پیشنهادات ۸۹
فهرست مراجع ۹۰
پیوست ۹۴

فهرست علائم

مساحت سطح انتقال حرارت در واحد حجم	$A\ (m^2/m^3)$
شارتابشی ورودی به محیط متخلخل	$B_{1,2}\ (W/m^2)$
شارتابشی بی بعد ورودی به محیط متخلخل، $B_{1,2}/\sigma T_{g_0}^4$	$B'_{1,2}$
عدد بایوت، hL_x/k_p	Bi
ظرفیت گرمایی ویژه گاز	$c_g\ (J/kgK)$
ضریب انتقال حرارت جابجایی بین فازهای جامد و گاز	$h\ (W/m^2K)$
شدت تابش	$I\ (W/m^2)$
شدت تابش بی بعد، $I/\sigma T_{g_0}^4$	I^*
شمارنده نقاط شبکه در جهت x	i
شمارنده نقاط شبکه در جهت y	j
شمارنده نقاط شبکه در جهت z	k
ضریب انتقال حرارت هدایتی	$K\ (W/mK)$
طول محیط متخلخل	$L_x\ (m)$
عرض محیط متخلخل	$L_y\ (m)$
عرض محیط متخلخل	$L_z\ (m)$
پارامتر بی بعد، $\frac{K_p}{\sigma T_{g_0}^3 L_x}$	P_2
پارامتر بی بعد، $hL_xA/\sigma T_{g_0}^3$	P_3
پارامتر بی بعد، $L_x\dot{q}/\rho_g c_g u_g T_{g_0}$	P_4
عدد پکلت، $\rho_g u_g c_g L_x/k_g$	Pe

تولید حرارت	$\dot{q}\ (W/m_3)$
شار انتقال حرارت تابشی	$q_{rad}\ (W/m^2)$
شار بی بعد انتقال حرارت تابشی، $q_{rad}/\sigma T_{g_0}^4$	Q_{rad}
نسبت دید، L_x/L_z or L_x/L_y	r
بردار نشان دهنده جهت تابش	$\hat{s}_i$
دما	$T\ (K)$
دمای محیط	$T_\infty\ (K)$
دمای گاز ورودی به محیط متخلخل	$T_{g_0}\ (K)$
سرعت گاز ورودی به محیط متخلخل	$u_{g_0}\ (m/s)$
مختصه طول	$x\ (m)$
مختصه ارتفاع	$y\ (m)$
مختصه عرض	$z\ (m)$

علائم یونانی

ضریب استهلاک $\kappa+\sigma_s$	$\beta\ (m^{-1})$
فاصله نقاط شبکه در جهت x	$\Delta x\ (m)$
فاصله نقاط شبکه در جهت y	$\Delta y\ (m)$
فاصله نقاط شبکه در جهت z	$\Delta z\ (m)$
ضریب صدور	ε
مختصه بی بعد در جهت جریان، x/L_x	η_x
مختصه بی بعد در جهت y، y/L_x	η_y
مختصه بی بعد در جهت z، z/L_x	η_z
دمای بی بعد، T/T_{g_0}	θ
لزجت سینماتیک	$\nu\ (m^2/s)$

چگالی گاز	$\rho_g\ (m^3/kg)$
ضریب انعکاس دیواره	ρ_w
ثابت استفان-بولتزمن	$\sigma\ (w/m^2K^4)$
ضریب جذب	$\kappa\ (\boldsymbol{m}^{-1})$
ضریب پخش	$\sigma_s\ (\boldsymbol{m}^{-1})$
ضخامت اپتیکی، $\beta \boldsymbol{L}_x$	τ_0
پارامتر بی بعد، $\sigma_a \boldsymbol{L}_x$	τ_1
موقعیت استقرار شعله	ς
پارامتر بی بعد، $\sigma_s \boldsymbol{L}_x$	τ_2
ضریب تخلخل	ϕ
تابع فاز پخشی در معادله انتقال تابش	φ
ثابت وزنی	w

زیر نویس ها

جسم سیاه	$\boldsymbol{b}$
پایین	$\boldsymbol{B}$
خروجی محیط متخلخل	$\boldsymbol{e}$
گاز	$\boldsymbol{g}$
ورودی محیط متخلخل	$\boldsymbol{i}$
شمال	$\boldsymbol{N}$
جنوب	$\boldsymbol{S}$
جامد	$\boldsymbol{p}$
بالا	$\boldsymbol{T}$

بالا نویس ها

تعادلی	$\boldsymbol{eq}$

جهت تابش خروجی	m
جهت تابش ورودی	m'
جهت بالا دست جریان	+
جهت پایین دست جریان	-

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه

افزایش راندمان حرارتی دستگاههای حرارتی مسئله ای است که همیشه مورد توجه دانشمندان و محققین قرار داشته است. در چند دهه اخیر محیط های متخلخل در بسیاری از زمینه های مهندسی و علوم مورد استفاده قرار گرفته اند. لذا مطالعه پدیده های انتقال حرارت و جریان سیال در این محیط ها حائز اهمیت می باشد[۱].

بدلیل بالا بودن درجه حرارت در مورد دستگاههای حرارتی از قبیل کوره های صنعتی، مبدل های حرارتی، بویلرها و راکتورهای هسته ای مکانیزم انتقال حرارت تابشی از اهمیت بسزایی برخوردار است و عملاً در این گونه دستگاه ها، انتقال حرارت انجام شده از طریق جابجایی و هدایت نقش مهمی نداشته و صرف نظر می شوند. لذا از این جهت سعی بر این بوده که بتوانند قسمت اعظمی از انرژی مصرفی توسط دستگاه حرارتی را به انرژی تابشی تبدیل نمایند. اقدامات انجام شده در این زمینه را می توان بصورت زیر خلاصه کرد:

۱- استفاده از سوخت هایی که دارای ذرات جامد در محصولات احتراق می باشند.

۲- استفاده از گازهایی که دارای ضریب جذب و نشر تابشی بالایی هستند.

۳- کنترل نمودن احتراق جهت رسیدن به شعله ای درخشان تر.

۴- بزرگ نمودن ابعاد هندسی شعله.

با انجام این عملیات اصلاحی توانسته اند افزایش قابل ملاحظه ای در راندمان حرارتی دستگاهها ایجاد کنند. با این حال نیز بخش در خور توجهی از انرژی مصرفی در این سیستم ها بدلیل بالا بودن درجه حرارت در این سیستم ها بدون استفاده مانده و عملاً با خروج گاز های داغ از اگزوز این دستگاههای حرارتی شاهد اتلاف انرژی زیادی هستیم.

استفاده از محیط های متخلخل در ساختمان دستگاههای حرارتی که با درجه حرارت بالا سرو کار دارند یکی از راهکارهایی است که می تواند منجر به افزایش راندمان این گونه سیستم ها شود. محیط های متخلخل مجموعه هایی از ذرات با اشکال و هندسه های پیچیده هستند که

دارای نسبت سطح به حجم زیاد می باشند، میزان این سطح بسته به انـدازه ذرات و اجـزا تشـکیل دهنده محیط متخلخل و تعداد این اجزا در واحد حجم می باشد. محیط های متخلخل مـی تواننـد به صورت فوم‌های[۱] فلزی، کره های اندود شده، فیبرها یا صفحه هایی باشند کـه عـلاوه بـر تبـادل انرژی با جریان سیال از طریق جابجایی می توانند انرژی تابشی را نیز جذب، پخش[۲] و صادر کننـد. با نصب لایه متخلخل در مسیر عبور گازهای داغ حاصل از احتراق می توان انـرژی حرارتـی بسـیار زیادی از گاز دریافت نمود و این انرژی دریافتی را به انرژی تابشی تبدیل نمود.

در زمینه استفاده از محیط های متخلخل تحقیقات متعددی توسط برخی از محققـان صـورت گرفته که عمدتاً می توان آنها را به دو بخش کلی تقسیم نمود:

بخش اول در خصوص بازیابی انرژی به کمک محیط متخلخل از گازهای داغ خروجی از اگزوز دستگاههای حرارتی است بطوری که با نصب یک لایه متخلخل در مسیر عبور گازهای داغ خروجی می توان از طریق انتقال حرارت جابجایی انرژی حرارتی قابل توجهی را از جریان گاز دریافت نمـود و این انرژی دریافتی را به روش مکانیزم تابشی به داخل سیستم بازگرداند[۱]. اخیراً از طریق تبدیل معکوس انرژی تابشی به آنتالپی گاز، امکان طراحی مبدل های حرارتی متخلخل بوجود آمده اسـت [۲].

بخش دوم در خصوص استفاده از مشعل های متخلخل می باشد، به این معنا که با بکارگیری محیط های متخلخل در ساختمان داخلی مشعل‌ها می توان راندمان آن ها را نسبت به مشعل های متداول افزایش قابل توجهی داد[۲].

۱-۱-۱ بازیابی انرژی به کمک محیط متخلخل

کاربرد محیط های متخلخل در ساختمان دستگاه های حرارتی که با درجه حرارت بالا سـر و کار دارند می تواند در افزایش راندمان حرارتی آنها نقش بسزایی داشته باشد. با نصب لایه متخلخل

---

[۱] foam
[۲] scatter

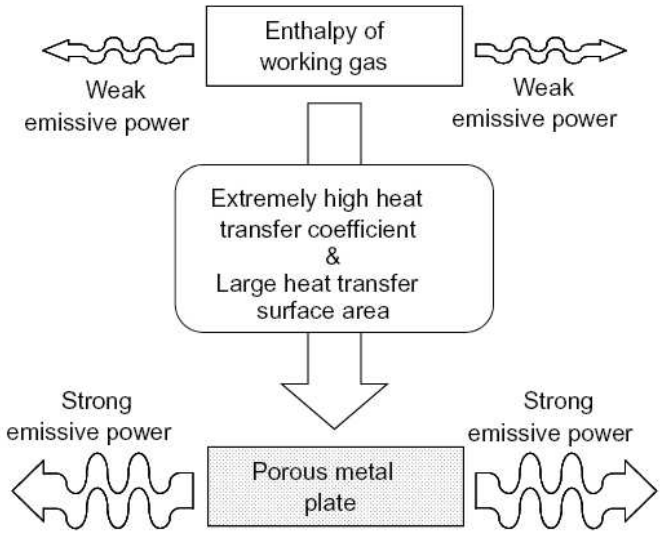
در مسیر عبور گازهای داغ حاصل از احتراق می توان انرژی حرارتی بسیار زیادی از گاز دریافت نمود و این انرژی دریافتی را از طریق تابش منتشر شده از لایه به بالا دست جریان منتقل کرد.

بواسطه کم بودن قدرت انتشار انرژی تابشی گاز، عملاً انرژی تابیده شده از گاز های داغ به محیط پیرامون خود بسیار کم بوده و حال اگر بتوان انرژی حرارتی گاز را به جسم دیگری که دارای قدرت نشر انرژی تابشی بالایی است منتقل نمود در آن صورت انرژی تابشی منتشر شده از جسم دوم قابل توجه خواهد بود.

محیط متخلخل به واسطه اثراتی که بر روی جریان سیال عبوری از آن می گذارد، از جمله ایجاد جریان چرخشی و مغشوش نمودن سیال، باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی می شود. همچنین با داشتن ضریب تخلخل زیاد لایه نصب شده در مسیر عبور گاز داغ، سطح انتقال حرارت بالایی جهت دریافت انرژی حرارتی از محیط متخلخل به گاز و برعکس، از طریق مکانیزم جابجایی وجود دارد. بنابراین نظر به داشتن ضریب انتقال حرارت جابجایی زیاد و سطح بالای انتقال حرارت، آنتالپی سیال داغ عبوری توسط محیط متخلخل جذب شده و باعث افزایش دمای محیط متخلخل می شود، حال محیط متخلخل با دمای بالا توان مناسب را برای صدور انرژی تابشی پیدا می‌کند. در شکل (۱) این موضوع به خوبی نشان داده شده است. حال پارامترهای فیزیکی و تابشی لایه را باید طوری تعیین کرد که قسمت اعظم انرژی تابشی منتشر شده از لایه به طرف بالا دست جریان باشد بدین ترتیب می توان از اتلاف انرژی حرارتی زیادی که از طریق خروج گازهای داغ صورت می‌پذیرفته است، جلوگیری کرد و افزایش راندمان قابل ملاحظه ای را در دستگاه حرارتی مذکور بوجود آورد، به طوریکه اگر لایه متخلخل مناسبی در مسیر عبور گازهای داغ قرار گیرد میتواند بیش از ۶۰ درصد انرژی حرارتی گاز را به صورت تابشی به داخل سیستم برگرداند[۲].

از طرف دیگر در بسیاری از دستگاههای حرارتی بخصوص کوره های صنعتی کسر قابل ملاحظه ای از انرژی تابشی تابیده شده توسط شعله از طریق دهانه خروجی اگزوز از داخل سیستم خارج می شود. بنابراین از این انرژی تابشی تولید شده استفاده ای به عمل نمی آید. نصب لایه

متخلخل با ضخامت اپتیکی مناسب می تواند به صورت یک عایق حرارتی از خروج شار تابشی به خارج از سیستم جلوگیری نماید و این انرژی را به سمت مشخص و مطلوبی که مورد نظر است رهنمون سازد. لذا یکی از جنبه های کاربردی محیطهای متخلخل در دستگاههای حرارتی، ایزوله کردن سیستم از محیط خارج می باشد. نصب لایه متخلخل در ساختمان سیستم های حرارتی نیاز دستگاه را به داشتن محفظه احتراق بزرگ مرتفع می گرداند، چرا که در بسیاری از این دستگاهها از قبیل کوره های صنعتی هر چه ابعاد هندسی شعله بزرگ تر باشد، عملاً سطح تولید انرژی تابشی و در پی آن انرژی تابشی تولیدی بیشتر خواهد شد. داشتن شعله بزرگ احتیاج به وجود محفظه احتراق حجیم و بالاخره داشتن دستگاه حرارتی بزرگ خواهد داشت که از نظر طراحی مطلوب نخواهد بود. وجود محیط متخلخل می تواند نقش بخشی از تولید انرژی تابشی را بعهده داشته باشد و نیاز سیستم را به داشتن شعله بزرگ برطرف نماید که از این نظر محیط متخلخل نقش مهمی را در طراحی دستگاه های حرارتی بازی می نماید.



شکل (۱): مکانیزم تبدیل انرژی با استفاده از محیط متخلخل [۲].