



مطالعه انتقال حرارت در تونل نگهداری زباله‌های هسته‌ای و تأثیر آن بر افزایش دمای سطح زمین اطراف

حبیب امین‌فر، جلال قاسمی*

دانشکده فنی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، صندوق پستی: ۱۴۷۶۶-۵۱۶۶۶، تبریز - ایران

چکیده: یافتن راه حل مناسب برای دفع حرارت تولید شده از زباله‌های سوخت مصرف شده هسته‌ای، با توجه به طولانی بودن مدت نگهداری، از مسائل مهم مهندسی هسته‌ای بوده و ذخیره‌سازی این مواد در تونل‌های عمیق زیرزمینی، یکی از روش‌های متداول در این زمینه است. به دلیل طولانی بودن مدت نگهداری و هزینه‌های زیاد ساخت تونل، مطالعه دقیق موضوع از جهات مختلف از جمله تأثیر مقدار حرارت تولید شده در بسته‌های سوخت مصرف شده، تعداد آنها در تونل، کنترل دماهای سطح بسته‌ها و سطح زمین و روش‌های انتقال حرارت در تونل ضروری است. در این مقاله با استفاده از مدل سه بعدی برای نوعی از تونل متعارف و بسته‌های سوخت مصرف شده، از روش عددی حجم محدود و از نرم‌افزار FLUENT 6.0 برای محاسبات و از نرم‌افزار GAMBIT برای شبکه‌بندی دامنه محاسباتی و از مدل K-ε برای جریان آشفته با در نظر گرفتن تشعشع حرارتی و بدون آن، استفاده شده است. در این محاسبات تأثیر پارامترهای مختلف از جمله انرژی تولید شده در هر بسته از سوخت مصرف شده هسته‌ای، سرعت هوای ورودی به تونل برای خنک کردن آن و عمق تونل در دو حالت همرفت طبیعی و اجباری بر درجه حرارت سطح بسته‌های سوخت و سطح زمین مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحلیل نشان می‌دهد در حالت همرفت اجباری، برای نگهداری ۶۷ بسته از سوخت مصرف شده اورانیوم با ۳/۲ درصد غنا، با ابعاد مشخص و تولید انرژی ۷/۶ کیلووات در هر یک از آنها در ابتدای دفع، سرعت هوای ورودی لازم جهت خنک کاری، ۰/۶ متر بر ثانیه خواهد بود تا حداکثر دمای بوجود آمده در سطح بسته‌ها کمتر از حد استاندارد که ۹۳ درجه سانتی‌گراد تعیین گردیده است، باشد.

واژه‌های کلیدی: بسته‌های زباله هسته‌ای، انتقال حرارت تشعشی، تونل نگهداری زباله‌های هسته‌ای، سوخت هسته‌ای مصرف شده

Heat Transfer Study of High Level Nuclear Waste Stored in Deep Underground Tunnel and Its Effect on Ground Surface Temperature

H. Aminfar*, J. Ghasemi

Engineering Technical Mechanical Department, P.O. Box: 51666-14766, Tabriz - Iran

Abstract: Storage of high-level waste and spent fuels from nuclear reactors is a main concern in the field of nuclear engineering. Generally, deep geological repository is suggested for this purpose. Heat transfer by high-level waste and spent fuels and their impacts on environment in a deep geological repository is an important subject for study. In this paper a three dimensional model for heat transfer in canisters and a deep tunnel was developed. FLUENT 6.0 with K-ε turbulence model was used to simulate the turbulent flow with and without radiation. The influence of parameters such as heat flux, air velocity, and depth of tunnel and the ground and canisters surface temperature were studied for two cases of forced and natural convection. For the air velocity of 0.6m/s with 67 canisters in the tunnel and 360kW/m² the initial heat flux for each canister, it is shown that the surface temperature reaches its allowed maximum limit of 93°C for concrete.

Keywords: Canisters, Radiation Heat Transfer, Repository of Nuclear Waste Package, Spent Nuclear Fuel (SNF)



۱- مقدمه

بسته‌های زباله سوخت مصرف شده هسته‌ای^(۱) از قابلیت تولید حرارت قابل ملاحظه برخوردارند و باید تا مدت نسبتاً طولانی، ضمن خنک‌کاری، در مکانی مناسب نگهداری شوند. یکی از روشهای متداول، نگهداری آنها درون تونل‌های طویل زیرزمینی با شرایط مناسب است.

Moujaes و همکاران [۱] امکان انتقال حرارت به روش هدایت در صخره بالای تونل را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این مطالعه، دمای دیواره تونل که انتقال حرارت به آن از بسته‌های زباله سوخت مصرف شده هسته‌ای درون تونل صورت می‌گیرد، بعنوان شرط مرزی در نظر گرفته شده و برای تحلیل مسأله، نرم افزار FIDAP بکار رفته است. Danko و همکاران [۲] نیز با استفاده از نرم افزار VTOUGH، اثر رطوبت بر میزان و توزیع دمای صخره‌ها را در مورد مسأله‌ای مشابه مورد مطالعه قرار داده‌اند. مدلی دو بعدی از تونل نگهداری بسته‌های زباله سوخت مصرف شده هسته‌ای واقع در کوه‌های Yucca در USA, Nevada نیز توسط Roald و همکاران [۳] مورد مطالعه قرار گرفته است. در این کار پژوهشی، یک مدل سه بعدی از تونل نگهداری بسته‌های زباله سوخت مصرف شده هسته‌ای مورد مطالعه قرار گرفته، همچنین علاوه بر انتقال حرارت به روشهای همرفت اجباری و تشعشع، اثرهای انتقال حرارت به روش همرفت طبیعی که در مطالعات قبلی مورد توجه قرار نگرفته بود نیز در آن منظور شده است. مطالعه همرفت طبیعی امکان بررسی شرایط بحرانی را که در اثر قطع جریان هوا بوجود می‌آید، فراهم آورده است، و در حالت عادی، تعیین حدود مدتی را که آن به بعد به علت کاهش حرارت تولیدی در بسته‌های سوخت مصرف شده احتیاج به همرفت اجباری نخواهد بود، امکان‌پذیر می‌سازد. برای تحلیل مسأله، ضمن استفاده از مدل دو معادله‌ای (k-ε) برای جریان آشفته، از نرم افزارهای: GAMBIT برای مدلسازی و شبکه‌بندی ناحیه محاسباتی و FLUENT 6.0 برای حل معادلات حاکم به روش حجم محدود^(۲) و محاسبه عددی استفاده شده است.

۲- ابعاد هندسی تونل و بسته‌های زباله هسته‌ای ذخیره شده در آن

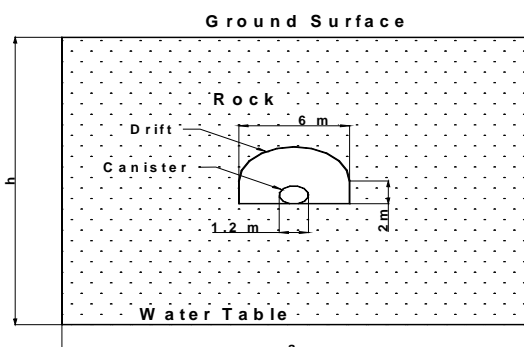
در این کار تحقیقی، یک تونل نمونه برای نگهداری زباله‌های سوخت مصرف شده هسته‌ای به طول ۱۰۶۱ متر و با ابعاد سطح مقطع مطابق شکل ۱ مورد مطالعه قرار گرفته است [۳]. همچنین هر یک از بسته‌های زباله هسته‌ای به شکل استوانه‌ای به قطر ۱/۲ متر و طول ۵ متر انتخاب شده است که سطح خارجی هر یک از آنها برابر ۲۱/۱ مترمربع خواهد بود. این بسته‌ها به صورت خوابیده در تونل نصب می‌شوند. مدل سه بعدی تونل و بسته‌های زباله سوخت مصرف شده هسته‌ای و نحوه نصب آنها در تونل، در شکل ۲ نشان داده شده است.

۳- حالات مختلف تحلیل حرارتی

انتقال حرارت تولید شده در بسته‌های زباله سوخت مصرف شده هسته‌ای از تونل به دو روش همرفت اجباری و طبیعی به همراه تشعشع مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

۳-۱ همرفت اجباری و تشعشع

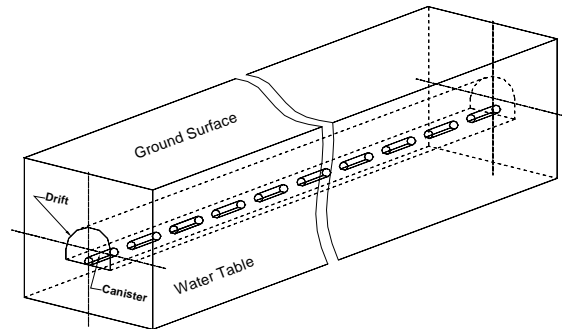
در این حالت فرض شده است که حرارت تولیدی در بسته‌های زباله سوخت مصرف شده هسته‌ای به دو صورت همرفت اجباری و تشعشع از تونل خارج می‌گردد. از انتقال حرارت به روش هدایت دیواره تونل به محیط اطراف که در مقایسه با همرفت اجباری ناچیز است، صرف نظر شده و صخره بالای تونل بی‌دررو (آدیاباتیک) فرض می‌شود. مدل حرارتی تونل به همراه شرایط مرزی آن در شکل ۳ نشان داده شده است.



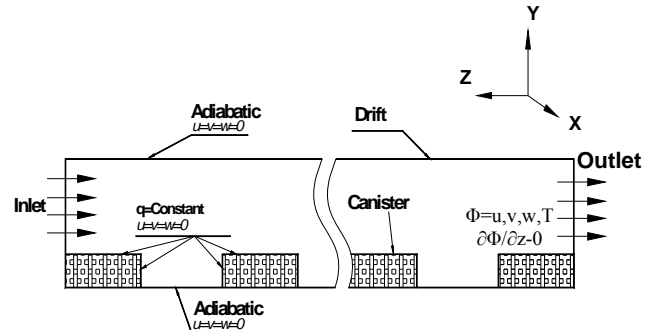
شکل ۱- سطح مقطع تونل نگهداری بسته‌های سوخت مصرف شده هسته‌ای.



بصورت بی‌دررو فرض شده است، تنها مسیر انتقال حرارت از تونل و صخره بالای آن تا سطح زمین خواهد بود [۱ و ۳]. با توجه به اینکه در این حالت برای هر یک از بسته‌های سوخت هسته‌ای مصرف شده از نظر انتقال حرارت از فضای متقارنی استفاده می‌شود، برای کاهش مدت محاسبات، می‌توان با اعمال شرایط مرزی مناسب، مسأله را برای یک بسته حل و نتیجه را به کل دامنه محاسباتی تعمیم داد. برای بالا بردن دقت محاسبات و در نظر گرفتن اثرهای جریان هوای چرخشی ناشی از خنک‌کاری طبیعی بسته‌های مجاور، بر انتقال حرارت بسته موردنظر، فضای تقارنی سه بسته بجای فضای تقارنی یک بسته در حالت همرفت طبیعی، شبکه بندی شده و محاسبات مربوط به این حالت انجام گرفته است. شکل ۴ نظر گرفته شده و شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای همرفت طبیعی را نشان می‌دهد.



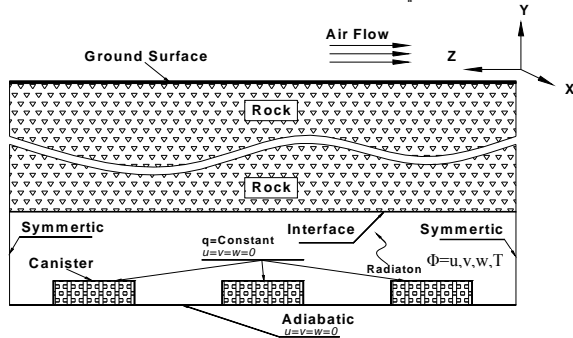
شکل ۲- مدل سه بعدی تونل نگهداری بسته های سوخت مصرف شده هسته‌ای.



شکل ۳- مدل حرارتی تونل نگهداری بسته‌های زباله هسته‌ای و شرایط مرزی آن در حالت همرفت اجباری.

۳-۲ همرفت طبیعی و تشعشع

چون مدت نگهداری بسته‌های زباله سوخت مصرف شده هسته‌ای بسیار طولانی است، تداوم بهره‌برداری از تجهیزات نصب شده برای ایجاد شرایط لازم و مناسب در حالت همرفت اجباری یکی از پارامترهای مهم و از نظر هزینه مورد توجه در این روش خواهد بود. از این رو محاسبه زمان لازم که بعد از آن حرارت تولیدی در بسته‌های زباله سوخت مصرف شده هسته‌ای را بتوان فقط به روش همرفت طبیعی به همراه تشعشع از تونل خارج کرده و نیاز به استفاده از تجهیزات همرفت اجباری نباشد، حائز اهمیت خواهد بود. همچنین پیش‌بینی شرایط بحرانی به هنگام عدم امکان استفاده از تجهیزات، از ضروریات این نوع طرحها می‌باشد. بنابراین در کار حاضر، انتقال حرارت بصورت همرفت طبیعی و تشعشع از بسته‌های زباله سوخت مصرف شده هسته‌ای به دیواره تونل نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. در این حالت دیواره تونل که در مطالعات قبلی



شکل ۴- مدل حرارتی تونل نگهداری بسته‌های زباله هسته‌ای و شرایط مرزی آن در حالت همرفت طبیعی.

۴- معادلات حاکم

معادلات حاکم در حالت سه بعدی که شامل معادله پیوستگی، معادلات منتوم و معادله انرژی است، به ترتیب زیر هستند [۴].

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \left(\mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + F_i + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u'_i u'_j) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} (k + k_r) \frac{\partial T}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \sum_j h_j j_j + \frac{DP}{Dt} \tau_{ik} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + S_h \quad (3)$$



در این معادله مقدار $\frac{Gr}{Re^2}$ معیاری برای مقایسه نقش همرفت طبیعی و اجباری در انتقال حرارت از تونل خواهد بود. برای حالت همرفت طبیعی با در نظر گرفتن تقریب Boussinesq معادلات ممنتوم و انرژی بصورت زیر است [۶]:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = g\beta(T - T_\infty) + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(u_i T) = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} \quad (11)$$

مقدار Φ نشان داده شده در شکل‌های ۳ و ۴ ممکن است هر یک از پارامترهای نظیر مؤلفه‌های سرعت و دما باشد. همچنین ورود هوا به تونل بصورت یکنواخت فرض شده و پارامترهای هوای ورودی بصورت:

$$C_p = 1006 / 43 \text{ (kJ/kg}^\circ\text{K)} \quad \text{و} \quad \rho = 1 / 220 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$\mu = 0 / 00001789 \text{ (kg/m.s)} \quad \text{و} \quad k = 0 / 0242 \text{ (w/m}^\circ\text{K)}$$

در نظر گرفته شده‌اند.

۵- حرارت تولیدی در بسته‌های زباله سوخت مصرف

شده هسته‌ای

حرارت تولید شده در هر یک از بسته‌های زباله سوخت مصرف شده هسته‌ای به مقدار ذخیره آن بستگی دارد. با توجه به ابعاد در نظر گرفته شده برای بسته‌ها و طراحی بدنه آنها [۷]، مقدار زباله قابل ذخیره در هر یک از بسته‌ها حدود ۱۸/۷ تن حساب شده و حاوی زباله سوخت هسته‌ای مصرف شده ناشی از مصرف سوخت اورانیوم با درصد غنای ۳/۲ در نظر گرفته شده است [۸]. با توجه به ابعاد در نظر گرفته شده برای بسته‌ها، شکل ۵ میزان تولید حرارت و تغییرات آن را برای هر یک از این بسته‌ها نشان می‌دهد [۹]. در ابتدای دفع، حرارت تولید شده تقریباً معادل ۷/۶ کیلووات برای هر بسته بوده که با توجه به سطح جانبی هر یک از بسته‌ها، شار حرارتی سطحی آن تقریباً برابر $360 \text{ (w/m}^2\text{)}$ خواهد بود. شکل ۶ نمای ساده‌ای از نحوه

تنش‌های رینولدز وابسته به جریان اصلی مطابق معادله زیر است.

$$(4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho u_i' u_j'}) = \rho \frac{2}{3} \kappa \delta_{ij} - \mu_T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \mu_T \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij}$$

$$(5)$$

$$h = C_p T$$

لزجت آشفته μ_T در هر نقطه از جریان آشفته بر اساس مدل $k-\varepsilon$ قابل محاسبه است، در این صورت:

$$(6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} + G_k - \rho \varepsilon$$

$$(7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

که در آن:

$$(8)$$

$$G_k = \mu_T \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

پس از محاسبه مقادیر k و ε مقدار لزجت آشفته از رابطه جبری زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$(9)$$

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

ثابت‌های C_μ و $C_{2\varepsilon}$ و $C_{1\varepsilon}$ و σ_ε و σ_k بر اساس مقادیر استاندارد ارائه شده، تعیین شده‌اند [۵].

در حالت جریان آرام با در نظر گرفتن نیروهای گرانشی در تحلیل همرفت اجباری به همراه همرفت طبیعی، معادله ممنتوم در حالت بدون بُعد، بصورت زیر است:

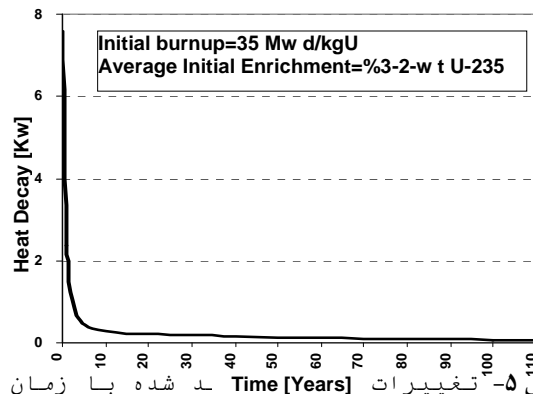
$$(10)$$

$$\frac{DU^*}{Dt^*} = -\nabla^* P^* - \frac{Gr}{Re^2} \beta^* T^* g^* + \frac{1}{Re} \nabla^* \cdot \tau^*$$

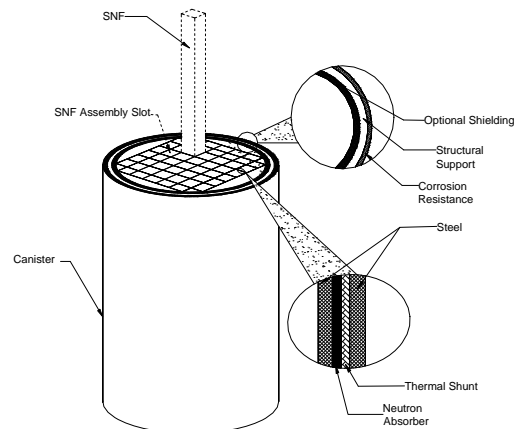


QUICK و روش مرتبه سوم MUSCL استفاده می‌شود. برای جریان آشفته، مدل‌های صفر معادله‌ای، دو معادله‌ای (k-ε)، دو معادله‌ای (k-γ)، مدل Reynolds Stress، مدل Detached Eddy Simulation و مدل Large Eddy Simulation پیش‌بینی شده است. مدل‌های تشعشعی شامل مدل‌های Rosseland، Discrete Transfer (DTRM)، Surface to Surface، Discrete Ordinates (DO) و (S2S) هستند؛ همچنین برای ایجاد یا بهبود همگرایی، امکان تنظیم ضرایب تحت رهایی^(۳) در نرم‌افزار وجود دارد. از آنجاییکه این نرم‌افزار فقط حل کننده^(۴) می‌باشد، برای مدل‌سازی و شبکه‌بندی دامنه محاسباتی از نرم‌افزار GAMBIT و از الگوریتم SIMPLE که برای حل عددی مسائل پایا مناسب است، استفاده شده است. همچنین با توجه به اینکه رژیم‌های جریان مختلفی در تحلیل مسئله ایجاد می‌شوند، همچنین نظر به اینکه روش Power law، خاصیت مناسبی در تأثیرپذیری از جریان بالادست به ویژه در حالت جریان سیال به همراه انتقال حرارت را دارد، از این روش در حل عددی این مسئله استفاده شده است. در این حالت برای همگرایی سریع، ضرایب تحت رهایی برای فشار، چگالی و ممنتوم بر اساس تجربه به ترتیب برابر ۰/۳، ۱، و ۰/۷ انتخاب شده‌اند. شبکه‌بندی از نوع سازمان نیافته انتخاب شده و برای یافتن پاسخ مطمئن، لازمست محاسبات عددی مستقل از شبکه‌بندی باشند و در این مورد به این نکته توجه شده است. ضمن آزمون مناسب بودن شبکه‌بندی، برای افزودن دقت محاسبات، بویژه در حالت آشفته، شبکه‌بندی در مجاورت دیواره بسته‌های سوخت هسته‌ای مصرف شده، فشرده‌تر انتخاب شده است. اجزای بکار رفته برای شبکه‌بندی سطوح، بصورت ترکیبی از Triangular و Quadratic و برای شبکه‌بندی حجم‌ها بصورت Tetrahedral و Hybrid هستند. شکل ۷ این شبکه‌بندی را برای قسمتی از مدل نشان می‌دهد. همچنین در تحلیل انتقال حرارت از طریق تشعشع، مدل Rosseland اعمال گردیده است. با توجه به تقارن تونل و برای کاستن مدت محاسبات، شبکه‌بندی و تحلیل برای نیمه آن صورت گرفته است.

ذخیره زباله‌های سوخت هسته‌ای مصرف شده را نشان می‌دهد [۴].



شکل ۵- تغییرات دما شده با زمان توسط هر یک از بسته‌های زباله سوخت مصرف شده.



شکل ۶- نحوه ذخیره سوخت هسته‌ای مصرف شده (SNF) جهت نگهداری.

۶- تحلیل مسئله به روش عددی

بنا به پیچیدگی هندسه و شرایط مرزی مسئله، لزوم استفاده از حل عددی آن اجتنابناپذیر است. با توجه به کارایی بالای نرم‌افزار Fluent 6.0، که بر اساس روش «حجم محدود» تهیه شده و دارای الگوریتم‌های جدید معرفی شده در روش حجم محدود برای تحلیل انتقال حرارت رسانایی و تشعشع و همچنین رژیم‌های جریان مختلف سیال به همراه انتقال حرارت می‌باشد، از این نرم‌افزار برای تحلیل مسئله استفاده شده است. الگوریتم‌های SIMPLE، SIMPLEC و PISO الگوریتم‌های جدید ارائه شده در این نرم‌افزار هستند. برای گسسته‌سازی معادلات، از روش‌های مختلفی از جمله روش‌های مرتبه اول و دوم UPWIND، روش POWER LAW، روش



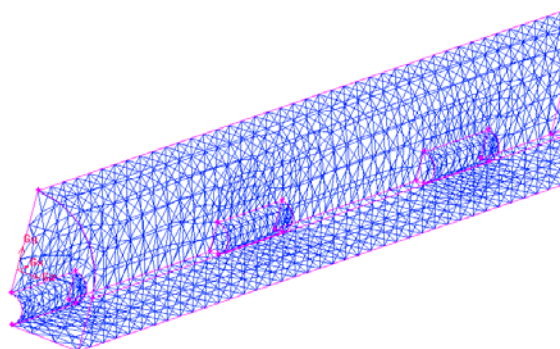
سانتی‌گراد است [۱۰ و ۱۱]. از طرفی معمولاً تونل در عمقی از زمین احداث می‌شود که احتمال نفوذ آبهای زیرزمینی به داخل تونل در مدت نگهداری وجود دارد. از این رو در صورت تخریب حفاظ بسته‌های زباله سوخت هسته‌ای مصرف شده، این آبها با مواد رادیوآکتیو آلوده خواهند شد، مراحل این آلودگی در شکل ۹ به صورت ساده نشان داده شده است [۲]. همچنین در صورت بروز این مشکل، هوایی هم که به منظور خنک‌کردن درون تونل بکار می‌رود در معرض آلودگی قرار خواهد گرفت. در نتیجه، ضرورت تحلیل دقیق حرارتی مسأله و محاسبه دمای ماکزیموم در سطح بسته‌ها در حالات همرفت طبیعی و اجباری، برای جلوگیری از بروز مسائل مخرب زیست محیطی و تلاش به منظور کاستن آثار آن بسیار حائز اهمیت است.

۷-۱ تحلیل نتایج در حالت همرفت اجباری به همراه تشعشع

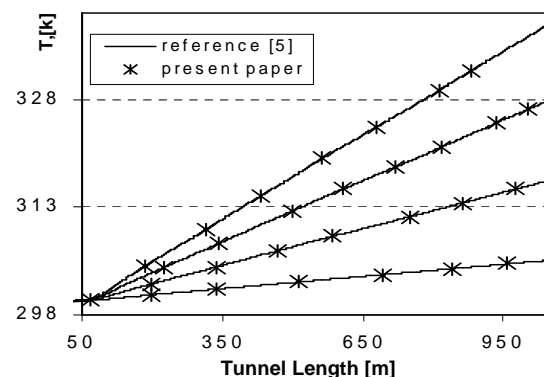
در شکل ۱۰ تغییرات دمای متوسط سطح دیواره بسته‌ها به ازای شار حرارتی سطحی ثابت ۳۶۰ وات بر مترمربع و تشعشع و تعمداد بسته زباله سوخت مصرف شده هسته‌ای، برای سرعت‌های مختلف هوای ورودی به تونل نشان داده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده در این حالت‌ها، افزایش متوسط دمای سطح دیواره بسته‌های انتهایی نسبت به دمای ورودی، برای شرایط اعمال شده و سرعت هوای ورودی m/s ۱، برابر ۴۱ درجه سانتی‌گراد و برای سرعت هوای ورودی m/s ۰/۵ برابر ۶۷ درجه سانتی‌گراد و برای سرعت هوای ورودی m/s ۰/۱ برابر ۱۳۳ درجه سانتی‌گراد خواهد بود. با توجه به مقدار حد مجاز دمای ۹۳ درجه سانتی‌گراد در سطح بسته‌ها، سرعت متوسط هوای ورودی لازم برای خنک کاری در شرایط فوق m/s ۰/۶ حساب شده است. شکل ۱۱ تغییرات دمای متوسط و ماکزیموم سطح دیواره بسته‌ها به ازای شار حرارتی سطحی ثابت ۳۶۰ وات بر مترمربع و سرعت هوای ورودی m/s ۰/۶ را برای ۱۷، ۳۳ و ۶۷ عدد از بسته‌های زباله سوخت مصرف شده هسته‌ای نشان می‌دهد. شکل ۱۲ تغییرات دمای متوسط دیواره بسته‌ها را در حالت

۷- تحلیل نتایج

قبل از بررسی نتایج بدست آمده از تحلیل سه بعدی مسأله، ابتدا مدل دو بعدی آن بررسی و با نتایج بدست آمده در شرایط مشابه مندرج در مرجع [۵]، مقایسه شده است. همخوانی جوابهای بدست آمده در حالت‌های مختلف دو بعدی، مبنای مطالعه حالت سه بعدی این کار می‌باشد. برای نمونه، نتایج بدست آمده برای دمای متوسط دیواره تونل در حالت دو بعدی، در مقایسه با نتایج مرجع [۵] در شکل ۸ نشان داده شده است.

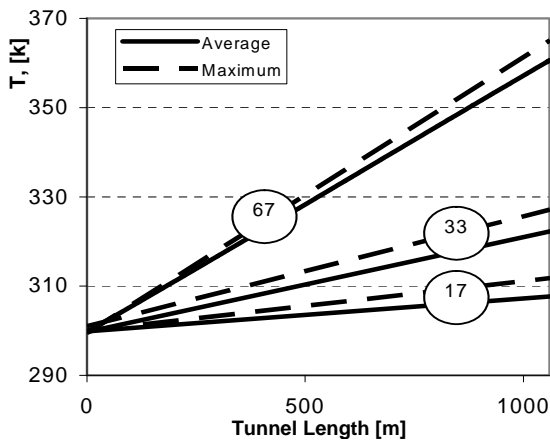


شکل ۷- قسمتی از شبکه‌بندی دامنه محاسباتی داخل تونل نگهداری بسته‌های زباله هسته‌ای.

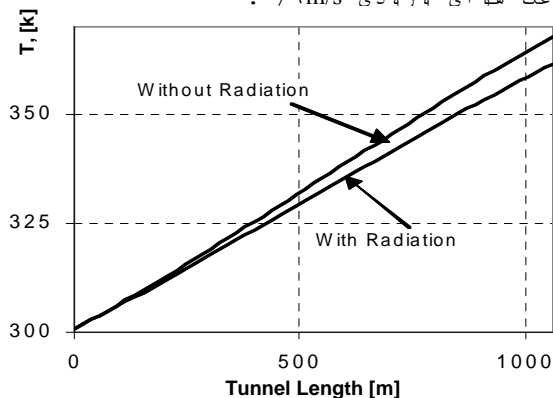


شکل ۸- تغییرات دمای متوسط دیواره تونل در حالت دو بعدی و مقایسه آن با نتایج مرجع.

یکی از مشکلات نگهداری بسته‌های زباله سوخت مصرف شده هسته‌ای به روش بیان شده، بروز تخریب در حفاظ آنها با گذشت زمان است. تخریب عمدتاً از نقاطی از حفاظ که مدتی طولانی دارای دمایی بیش از حد مجاز باشند، شروع می‌شود. این دما برای بتن ۹۳ درجه



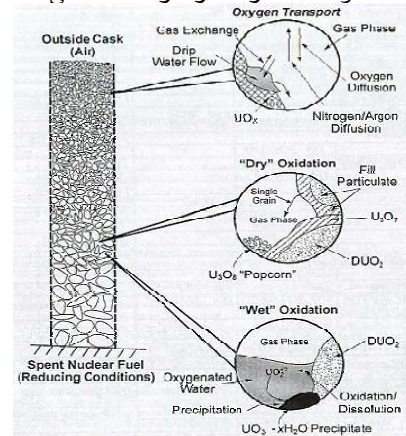
شکل ۱۱- تغییرات دمای متوسط و ماکزیموم سطح دیواره بسته‌ها، برای تعداد بسته‌های زباله سوخت مصرف شده هسته‌ای ۶۷، ۳۳ و ۱۷ در حالت شار حرارت سطحی 360 W/m^2 و سرعت هوای ورودی 0.67 m/s .



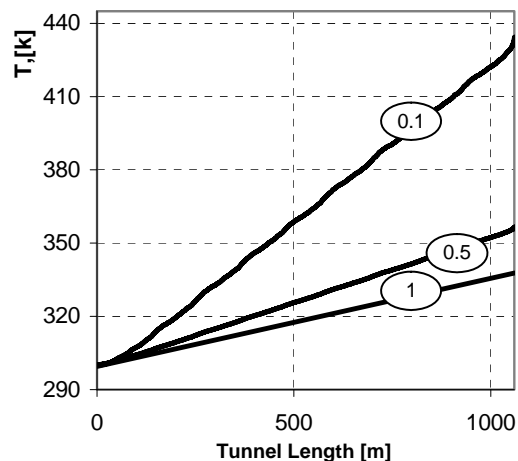
شکل ۱۲- تغییرات دمای متوسط دیواره بسته‌ها در حالت شار حرارت سطحی 360 W/m^2 و سرعت هوای ورودی 0.67 m/s با ۶۷ بسته از زباله سوخت مصرف شده هسته‌ای، با در نظر گرفتن انتقال حرارت از طریق تشعشع و بدون در نظر گرفتن آن.

۳۶۰ وات بر متر مربع در مقایسه با حالت انتقال حرارت بدون در نظر گرفتن تشعشع، نشان می‌دهد. طوری که مقدار ماکزیموم دما تقریباً به میزان ۶ درجه سانتی‌گراد کمتر از حالتی است که بدون در نظر گرفتن تشعشع صورت گرفته باشد. از آنجاییکه زمان نگهداری زباله‌های هسته‌ای خیلی طولانی است لذا در نظر گرفتن میزان حرارت تشعشعی، باعث کاهش هزینه‌های جاری، نظیر کاهش دبی هوای خنک‌کننده و در نتیجه بار هواکش‌ها خواهد شد. شکل ۱۳ تغییرات دمای ماکزیموم روی بسته‌های سوخت مصرف شده را برحسب زمان نگهداری، برای سرعت‌های مختلف هوای ورودی نشان می‌دهد که با

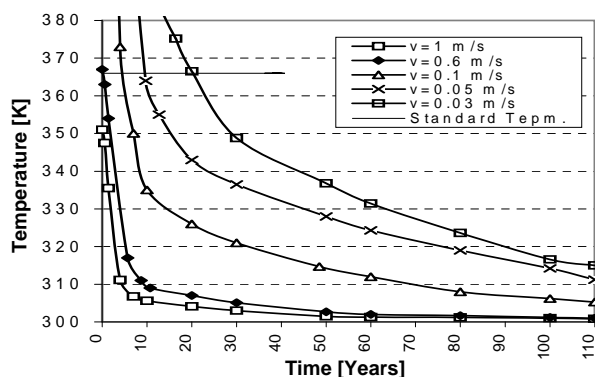
همرفت اجباری به همراه انتقال حرارت از طریق تشعشع برای سرعت هوای ورودی 0.67 m/s متر بر ثانیه و شار حرارت سطحی



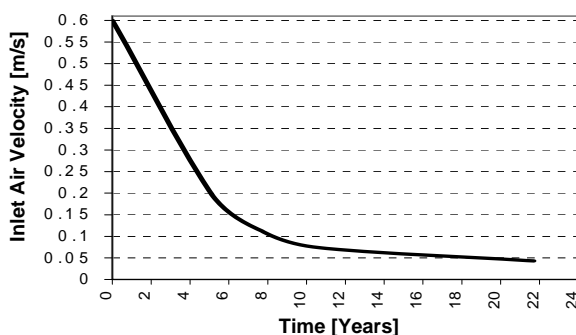
شکل ۹- مکانیزم اکسید شدن زباله و آلاینده‌های آبهای زیرزمینی در صورت بروز تخریب در حفاظ بسته‌های زباله سوخت مصرف شده هسته‌ای.



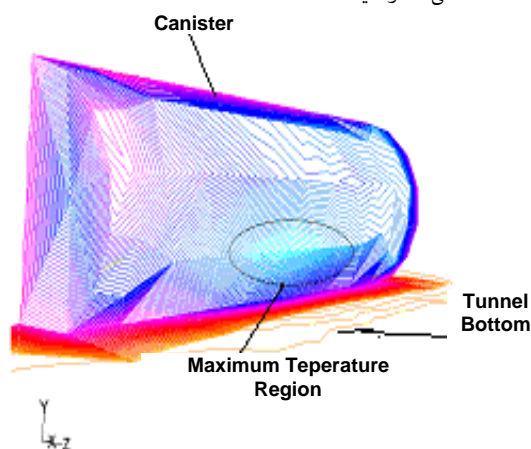
شکل ۱۰- تغییرات دمای متوسط سطح دیواره بسته‌ها به ازای تغییرات سرعت هوای ورودی 0.1 ، 0.5 و 1 متر بر ثانیه برای شار حرارت سطحی 360 W/m^2 با ۶۷ بسته از زباله هسته‌ای.



شکل ۱۳- تغییرات دمای ماکزیموم سطح دیواره بسته‌ها برحسب زمان برای سرعت‌های مختلف هوای خنک‌کاری ورودی برای تعداد ۶۷ بسته از زباله سوخت مصرف شده هسته‌ای، در حالت شار حرارت سطحی اولیه ۰.۳۶۰ W/m^2 .



شکل ۱۴- تغییرات سرعت هوای موردنیاز برای خنک‌کاری برحسب زمان برای حفظ حداکثر دمای مجاز بر روی سطح دیواره بسته‌های زباله سوخت مصرف شده هسته‌ای برای تعداد ۶۷ بسته از آنها، در حالت شار حرارت سطحی اولیه ۰.۳۶۰ W/m^2 .



شکل ۱۵- خطوط هم‌دما در حالت سه بعدی روی بسته زباله سوخت مصرف شده هسته‌ای شماره ۶۷ و ناحیه بروز حداکثر دما در روی سطح آن.

جدول ۱- بروز حداکثر دما به ازای تعداد بسته‌های زباله هسته‌ای سوخت مصرف شده در

استفاده از حرارت تولید شده در بسته‌ها بر اساس نتایج بدست آمده در شکل ۵ حساب شده است. شکل ۱۴ سرعت هوای موردنیاز ورودی را برای حفظ دمای ماکزیموم برحسب مدت نگهداری که برای ۶۷ عدد از بسته‌ها با شار حرارت سطحی اولیه ۳۶۰ وات بر مترمربع حساب شده است نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده از این شکل ممکن است در طراحی تجهیزات موردنیاز و تنظیم بار هواکش‌ها نسبت به زمان، مورد استفاده قرار گیرد.

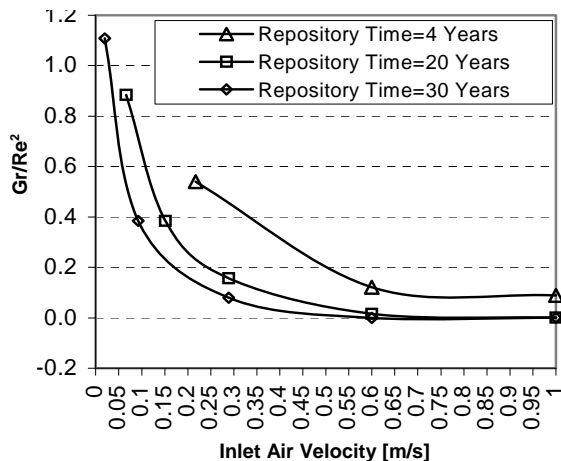
یکی از مسائلی که در این مطالعه مورد توجه قرار گرفته، تعیین ناحیه بروز حداکثر دما است که از نقطه نظر طراحی ساختار مکانیکی و فیزیکی بسته‌های زباله سوخت مصرف شده هسته‌ای حائز اهمیت خواهد بود. شکل ۱۵ خطوط هم‌دما بر روی بسته زباله هسته‌ای شماره ۶۷، با شار حرارت سطحی ثابت ۳۶۰ وات بر مترمربع و برای سرعت هوای ورودی $۰/۶$ متر بر ثانیه به همراه ناحیه بروز دمای حداکثر در آن نشان می‌دهد. محاسبه نشان می‌دهد که حداکثر افزایش دما نسبت به دمای محیط در شرایط پیش‌گفته در این ناحیه حدود ۹۰ درجه است که بیشتر از مقدار مجاز نیست. این دما در شرایط ذخیره‌کردن ۱۷، ۳۳ و ۶۷ بسته از زباله سوخت مصرف شده در حالت همرفت اجباری و طبیعی با شار حرارت سطحی ۳۶۰ وات بر مترمربع و سرعت هوای ورودی $۰/۶$ متر بر ثانیه محاسبه و در جدول ۱ مندرج است. نتایج جدول نشان می‌دهد که در حالت همرفت طبیعی برای ۶۷ بسته در شرایط ذکر شده، پیشینه دمای ماکزیموم سطح دیواره آنها حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بیشتر از حد مجاز است. و در این شرایط لازمست مدتی خنک‌کاری بصورت همرفت اجباری انجام گیرد. شکل ۱۶ نیز نشان‌دهنده دمای متوسط دیواره بسته‌های زباله هسته‌ای اول و آخر در حالت شار حرارت سطحی ۳۶۰ وات بر مترمربع و سرعت هوای ورودی $۰/۶$ متر بر ثانیه با ۶۷ بسته از زباله سوخت مصرف شده هسته‌ای می‌باشد. لازم به ذکر است که پیشینه دمای حاصل بستگی به انتخاب سرعت هوای خنک‌کننده ورودی دارد و این موضوع مستقیماً با انتخاب تجهیزات موردنیاز مرتبط است.



زمان، مقدار گرمای تولید شده توسط بسته‌ها کاهش می‌یابد [۴]، طبیعتاً برای کاهش هزینه‌ها، سرعت هوای ورودی نیز مطابق شکل ۱۴ کاسته می‌شود. شکل ۱۷ تغییرات مقدار $\frac{Gr}{Re^2}$ حساب شده در این بررسی

را برحسب سرعت هوای ورودی در زمانهای مختلف نشان می‌دهد. نتایج این بررسی نشان می‌دهند که با گذشت حدود ۲۵ سال و با کاهش متناسب

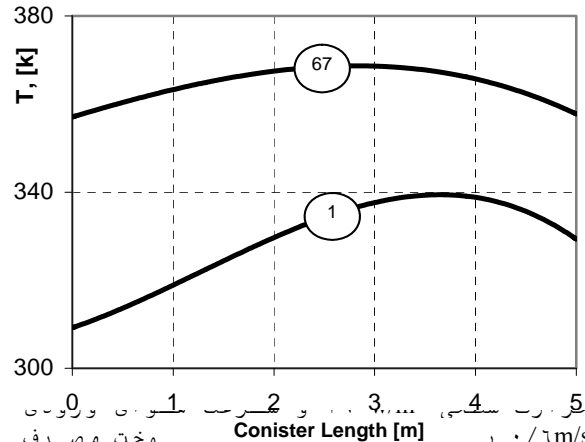
سرعت هوای ورودی، مقدار $\frac{Gr}{Re^2}$ بزرگتر از یک می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که از این زمان به بعد انتقال حرارت ممکن است فقط به صورت همرفت طبیعی



شکل ۱۷- تغییرات $\frac{Gr}{Re^2}$ برحسب سرعت هوای ورودی به ازای زمانهای مختلف سپری شده از دفع زباله‌ها. صورت گیرد. نتایج آینده مربوط به حالت همرفت طبیعی برای شرایطی است که زمان لازم برای خنک‌کاری به صورت همرفت اجباری طی شود و تولید حرارت در بسته‌ها به اندازه‌ای کاهش یابد که بتوان آنرا بصورت همرفت طبیعی از تونل خارج کرد به طوری‌که حداکثر دمای ایجاد شده کمتر از حد مجاز باشد برای همرفت طبیعی، در حالت پایدار، گرما از طریق صخره‌ها به روش رسانایی به سطح زمین منتقل و به وسیله همرفت اجباری به هوای محیط اطراف منتقل می‌شود. در این شرایط، مسأله با در نظر گرفتن خواص صخره بصورت:

حالت همرفت طبیعی و اجباری (شار سطحی 360 w/m^2 و سرعت هوای ورودی 10 m/s).

تعداد بسته‌ها	حداکثر دما [K]	
	همرفت طبیعی	همرفت اجباری
۶۷	۴۶۸	۳۶۵
۳۳	۳۹۶	۳۲۸
۱۷	۳۷۲	۳۱۲

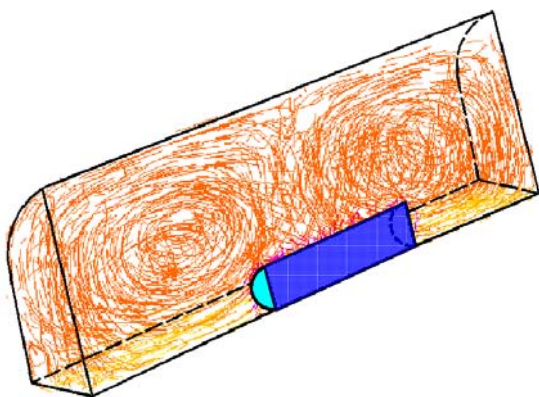


شکل ۱۸- تغییرات دمای T_1 در طول کانستریتهای مختلف در حالت همرفت طبیعی و اجباری (شار سطحی 360 w/m^2 و سرعت هوای ورودی 10 m/s)

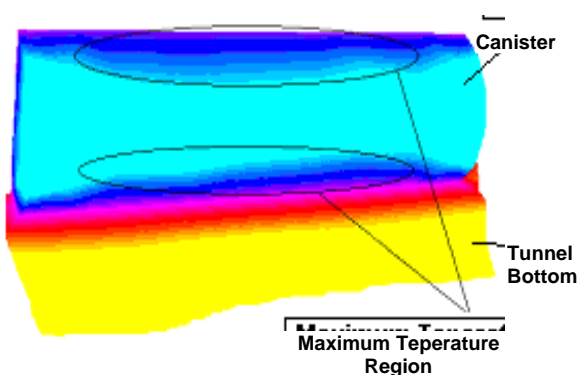
۲-۷ تحلیل نتایج در حالت همرفت طبیعی به همراه تابش

بنا به دلایل بیان شده در بخش (۲-۳) مدل‌سازی حرارتی مسأله در حالت همرفت طبیعی با شرایط مرزی و فرض‌های متفاوتی همراه بوده و بنا به نبود، یا کمبود جریان هوای خنک‌کننده، دیواره‌های تونل تنها مسیر انتقال حرارت به وسیله صخره بالای آن، به روش رسانایی تا سطح زمین می‌باشد که مرز مشترک ناحیه محاسباتی داخل تونل و ناحیه بالای آن است. محاسبه نشان می‌دهد که در حالت همرفت طبیعی بدون استفاده از همرفت اجباری، تنها در حدود ۱۴ بسته زباله سوخت مصرف شده هسته‌ای را با شار حرارت سطحی 360 w/m^2 برابر ۳۶۰ وات بر متر مربع از ابتدا در تونل موردنظر می‌توان نگهداری کرد، بدون آن که دمای آن از حداکثر مجاز 93 درجه سانتی‌گراد تجاوز کند.

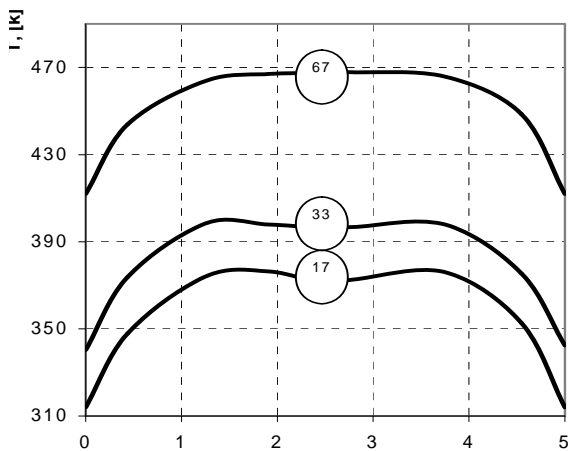
با توجه به رابطه (۱۰) اهمیت همرفت طبیعی با افزایش $\frac{Gr}{Re^2}$ افزایش می‌یابد. چون با گذشت



شکل ۱۸- خطوط همدمای جریان هوا در حالت همرفت طبیعی در اطراف هر یک از بسته‌های زباله هسته‌ای برای حالت ۶۷ عدد از آنها پس از ۲۵ سال خنک‌کاری اجباری با شار حرارتی سطحی اولیه ۰.۳۶۰ w/m^2 .



شکل ۱۶- نواحی بروز حداکثر دما بر روی سطح هر یک از بسته‌های زباله هسته‌ای در حالت همرفت طبیعی پس از ۲۵ سال خنک‌کاری اجباری با شار حرارتی سطحی اولیه ۰.۳۶۰ w/m^2 .



شکل ۲۰- تا ۰.۳۶۰ w/m^2 برای ۱۷، ۳۳ و ۶۷ بسته از آنها. یک از بسته‌های زباله هسته‌ای در حالت همرفت طبیعی پس از ۲۵ سال خنک‌کاری اجباری با شار حرارتی سطحی اولیه ۰.۳۶۰ w/m^2 .

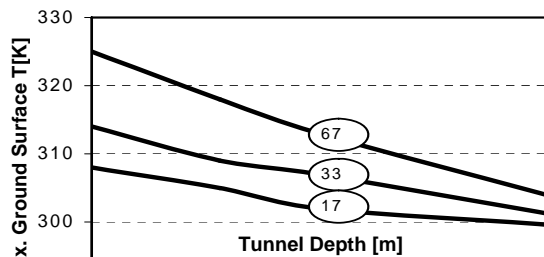
$$\rho = ۲۶۴۰ \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$k = ۳ \text{ (w/m.k)}, \quad C_p = ۸۰۰ \text{ (j/kg}^\circ\text{k)}$$

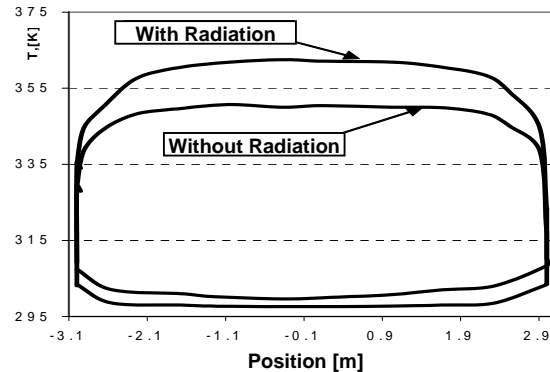
و ضریب همرفت متوسط اجباری گردیده است [۵]. این مقدار ضریب همرفت برای منطقه‌ای که معمولاً در شرایط استاندارد بوده و هوا با سرعت حداقل ۰/۱ متر بر ثانیه جریان داشته باشد صادق خواهد بود. لازم به ذکر است که اثر رطوبت موجود در صخره به علت ناچیز بودن سهم آن در انتقال حرارت صرف‌نظر شده است. شکل ۱۸ خطوط همدمای جریان طبیعی هوای داخل تونل در محدوده یک بسته ۶۷ تایی از زباله سوخت مصرف شده هسته‌ای پس از ۲۵ سال خنک‌کاری اجباری را نشان می‌دهد. شکل ۱۹ نواحی بروز حداکثر دما را در تونل ۶۷ بسته‌ای، در سطح هر بسته در حالت همرفت طبیعی نشان می‌دهد که این موضوع باید در طراحی ساختار پوششی زباله‌ها مدنظر قرار گیرد. همچنین شکل ۲۰ دمای متوسط محیطی سطح هر یک از بسته‌ها را در حالت همرفت طبیعی در شرایط ذکر شده به ازای تعداد مختلفی از این بسته‌ها نشان می‌دهد. هر چند دمای حداکثر موضعی در سطح بالا و پایین بسته‌ها و در محدوده وسط ایجاد می‌شود، ولی بدلیل سهولت انتقال حرارت از طریق همرفت طبیعی در راستای نواحی افقی همان محدوده، دمای متوسط محیطی در روی آنها، مقداری کاهش می‌یابد. بطوریکه در شکل ۲۱ دیده می‌شود تغییرات دمای دیواره داخل تونل در حالتی که انتقال حرارت به صورت تشعشع در آن مدنظر خواهد بود. این اختلاف دما در بیشترین مقدار، تقریباً به ۱۳ درجه سانتی‌گراد می‌رسد که نشان دهنده سهم عمده انتقال حرارت از طریق تشعشع است. بطوریکه قبلاً بیان شد، آثار سوء زیست محیطی ناشی از



مهندسی هسته‌ای در این زمینه خواهد بود. با مدل‌سازی و بررسی پارامترهای مهم طراحی در حالات مختلف، نشان داده شد که بیشینه دما در روی بسته‌ها و دیواره تونل بستگی به تعداد بسته‌ها و نحوه خنک‌کردن آنها دارد که با افزایش تعداد بسته‌ها هزینه‌های جاری خنک‌کردن افزایش می‌یابد، از طرفی هزینه‌های اولیه ساخت نیز بالا بوده و نگهداری هر چه بیشتر بسته‌ها از این دیدگاه ارزشمند خواهد بود. در چنین طرحی هر دو موضوع بطور همزمان باید در نظر گرفته شود. همچنین نشان داده شد که بیشینه دما در روی بسته‌ها در حالت‌های مختلف در نواحی مشخصی رخ می‌دهد و برای جلوگیری از تخریب بسته‌ها باید در مرحله طراحی حفاظ آنها به این نکته توجه شود. همچنین نشان داده شد که انتقال حرارت از طریق تشعشع سهم قابل توجهی را در حالت همرفت طبیعی دارد. از مهمترین نتایج دیگر این بررسی می‌توان به تعیین مدت لازم سپری شدن نگهداری در حالت همرفت اجباری و شروع خنک‌کاری به صورت همرفت طبیعی اشاره کرد که این موضوع بدلیل طولانی بودن مدت نگهداری و بالا بودن هزینه‌های آن حائز اهمیت است و در این راستا نرخ کاهش هوای خنک‌کاری موردنیاز با گذشت زمان نیز تعیین گردیده است. برای جلوگیری از افزایش بیش از حد دمای سطح زمین اطراف تونل نگهداری، تعیین حداقل عمق احداث تونل نیز از نتایج مهم این تحقیق می‌باشد.



شکل ۲۲- حداقل دمای سطح زمین به ازای عمق احداث تونل در حالت همرفت طبیعی پس از ۲۵ سال. اجباری با شار حرارتی سطحی اولیه 360 W/m^2 به همراه تشعشع برای ۱۷، ۳۳ و ۶۷ بسته از آنها.



شکل ۲۱- تغییرات دمای دیواره بالا و پایین تونل در مقطع عرضی در حالت همرفت طبیعی به همراه تشعشع و بدون در نظر گرفتن آن برای حالت ۶۷ عدد بسته زباله هسته‌ای پس از ۲۵ سال خنک‌کاری اجباری با شار حرارتی سطحی اولیه 360 W/m^2 .

افزایش دمای سطح زمین اطراف تونل از مشکلات دیگر این نوع طرحها می‌باشد. بنابراین لازم است که تونل در عمق مناسبی احداث شود تا افزایش دمای سطح زمین اطراف آن بیش از حد مجاز نباشد. شکل ۲۲ حداکثر دمای سطح زمین نزدیک اطراف تونل را به ازای عمق‌های مختلف احداث آن و تعداد بسته‌های زباله سوخت مصرف شده هسته‌ای، پس از ۲۵ سال نگهداری و در ابتدای شروع خنک‌کاری به صورت همرفت طبیعی، نشان می‌دهد. با توجه به نتایج این شکل برای جلوگیری از افزایش بیش از ۶ درجه سانتی‌گراد دمای سطح زمین اطراف در حالت همرفت طبیعی نگهداری ۶۷ بسته از زباله سوخت مصرف شده هسته‌ای، لازم است که تونل حداقل در عمق حدود ۵۰ متری سطح زمین احداث شود. شکل ۲۳ خطوط همدمای داخل صخره در حالت همرفت طبیعی به همراه تشعشع، به ازای ۶۷ عدد بسته زباله سوخت مصرف شده هسته‌ای در شرایط ذکر شده را در حالتی که عمق احداث تونل ۵۰ متر در نظر گرفته شده است، نشان می‌دهد.

۸- نتیجه‌گیری

نگهداری زباله‌های سوخت مصرف شده هسته‌ای در تونل‌های زیرزمینی یکی از روش‌های متداول در این زمینه است. بدلیل داشتن خطرهای احتمالی ناشی از آن بر موجودات زنده، بویژه انسان، همچنین احتمال آلودگی محیط زیست و آبهای زیرزمینی، انتخاب محل تونل و طراحی مناسب آن از مسائل مهم



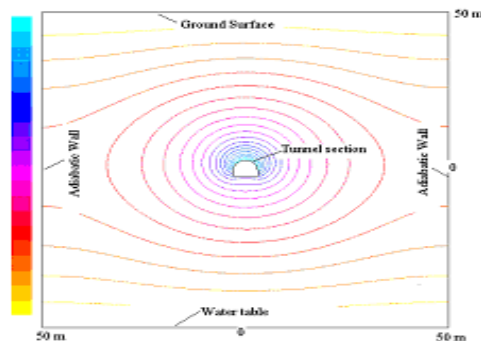
گرافش

رینولدز

چگالی
 ρ
تنش
 τ
عدد
Gr
عدد
Re

پی‌نوشت‌ها:

- ۱- SNF: Spent Nuclear Fuel
- ۲- Finite Volume
- ۳- Under Relaxation
- ۴- Solver



شکل ۲۳- خطوط همدمای داخل صخره در حالت همرفت طبیعی به همراه تشعشع برای حالت ۶۷ عدد بسته زباله هسته‌ای پس از ۲۵ سال خنک‌کاری اجباری با شار حرارتی سطحی اولیه 360 W/m^2 .

۹- نمادها

ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت

C_p

نیروهای بدنی

F

شتاب جاذبه

g

آنتالپی

h

انرژی سینماتیکی اغتشاشی

K

گرمایی رسانش

k

اغتشاشی رسانش

k_T

شار پخشندگی ذره

J_j'

فشار

p

عبارت چشمه در واکنش حرارتی و یا شیمیایی

Sh

زمان

t

دما

T

مؤلفه سرعت در جهت x

u

مؤلفه سرعت در جهت y

v

مؤلفه سرعت در جهت z

w

مؤلفه سرعت اغتشاشی

u'

کرانکر دلتای

δ_{ij}

نرخ تلفات انرژی سینماتیکی

ε

لزوجت دینامیکی

μ

References:

1. S. Moujaes and A. Bhargava, "Simulation of heat transfer around a canister placed horizontally in a drift," Proc. Int. Conf. High Level Radioactive Waste Management, Las Vegas, Nevada, May 22-26 (1994).
2. G. Danko, T.A. Buscheck, J.J. Nitao, S. Saterlie, "Analysis of near-field and psychometric waste package environment using ventilation," Proc. Int. Conf. High Level Radioactive Waste Management, Las Vegas, Nevada (1995).
3. A. Roald, W.P. Darrell, C. Yitung "Modeling convective heat transfer around a waste cask stored in the Yucca mountain repository," The 6th ASME-JSME thermal engineering joint conference, U.S.A (2003).
4. C. David, Wilcox, "Turbulence modeling for CFD," DCW industries, Inc. California (1993).
5. S.R. Kukatla, "Thermal transport evaluations related to waste package design," Nevada Center for Advanced Computational Methods, University of Nevada, Las Vegas (2003).
6. A. Bejan, "Convection heat transfer," John Wiley & Sons (1984).
7. W. Ahmeda, M. Arshada, Kh. Ghulam Qasimb, "Dry storage of spent KANUPP fuel and



10. J. William, Quapp, "An advanced solution for the storage, transportation and disposal of spent fuel and vitrified high level waste," Teton Technologies Inc. paper presented at global99, September 2 (1999).
11. American Concrete Institute Standard 349, App A4, Last version (1985).
8. U.S. Nuclear Regulatory Commission "Regulatory guid 3.54- spent fuel heat generation in an Ind spent fuel storage installation," January (1999).
9. Charles W. Forsberg, "Depleted uranium dioxide as a spent-nuclear-fule waste-package particulate fill:fill behavior," Oak Ridge National Laborator, managed by UT-Bttelle, LLC, for the U.S. Department of energy (2001).