



ارزیابی قابلیت روش‌های رایج طراحی در تخمین صحیح طول مورد نیاز مبدل‌های حرارتی هوا- زمین جهت تأمین بار سرمایشی

امیر امیدوار^{1*}، امیر ودیعی¹، ایمان شایق²

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

* شیراز، صندوق پستی 71555-313، omidvar@sutech.ac.ir

اطلاعات مقاله

یادداشت پژوهشی

دریافت: 25 آبان 1394

پذیرش: 11 دی 1394

ارائه در سایت: 03 بهمن 1394

کلید واژگان:

اشباع حرارتی

مبدل حرارتی هوا-زمین

طراحی

سرمایش

چکیده

در این پژوهش دقت روش‌های پایا و ناپایا در تخمین طول مورد نیاز کانال‌های زیر زمینی هوا جهت کاربرد سرمایشی مقایسه شد. همچنین تأثیر شرایط مختلف برای دمای هوای ورودی (دمای ثابت، پریودیک و واقعی) بر دقت مدل‌های ناپایا مطالعه گردید. نتایج نشان داد طراحی بر اساس مدل پایا نمی‌تواند تخمین درستی از طول مورد نیاز کانال ارائه نماید. بعلاوه، استفاده از مدل ناپایا با دمای ورودی ثابت باعث تخمین بالا دست طول مورد نیاز کانال می‌شود که این امر می‌تواند طرح را از نظر اجرایی و اقتصادی با چالش مواجه کند. این درحالی است که با استفاده از مدل ناپایا با دمای ورودی پریودیک می‌توان طول مورد نیاز کانال را با دقت مناسبی نسبت به حالت واقعی تخمین زد.

Capability assessment of usual designing methods in approximating the required length of air-earth heat exchangers for cooling application

Amir Omidvar^{*}, Amir Vadiiee, Iman Shayegh

Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran.

* P.O.B. 71555-313, Shiraz, Iran, omidvar@sutech.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Research Note

Received 16 November 2015

Accepted 01 January 2016

Available Online 22 January 2016

Keywords:

Thermal soil saturation

Earth-air heat exchanger

Design

Cooling

ABSTRACT

In this study, the accuracy of steady and unsteady methods in predicting the required length of air-earth heat exchangers has been compared for cooling application. Also, the impact of different conditions for inlet air temperature (constant, periodic and actual temperature) on unsteady methods has been studied. Results indicated that, steady model cannot provide correct estimation for the required length of channel. In addition, using unsteady method with constant inlet air temperature overestimates the required length of the channel, which can lead to economic and implementation challenges for project. However, using unsteady method with periodic inlet air temperature, allows the required length of the channel can be estimated with acceptable accuracy compared with real situation (unsteady model with actual inlet air temperature).

1- مقدمه

بررسی‌ها نشان می‌دهد جهت طراحی کانال‌های زیرزمینی می‌توان از دو رهیافت مختلف استفاده نمود. در رهیافت اول عملکرد حرارتی سیستم در حالت پایا¹ مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این حالت از اثرات نفوذ و اشباع حرارتی خاک اطراف کانال صرف‌نظر می‌شود. در این راستا می‌توان به تحقیقات پایه و جانسنز [1] اشاره کرد. در این روش جهت محاسبه طول مورد نیاز کانال از رابطه (1) استفاده می‌شود.

$$L = -\ln(1 - \varepsilon) \left[\frac{c_p^2 \rho_a D^5}{8k^2 \xi \text{Nu}^2} \right]^{\frac{1}{3}} J^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

در این رابطه Nu، عدد ناسلت می‌باشد و در صورتی که رینولدز کوچکتر

یکی از اهداف اصلی در طراحی مبدل‌های حرارتی هوا - زمین محاسبه طول مورد نیاز کانال زیر زمینی است به نحوی که دمای خروجی از سامانه بتواند شرایط آسایش حرارتی را در حد قابل قبولی تأمین کند. استفاده از روش‌هایی که طول مورد نیاز مبدل را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کنند در عمل می‌تواند باعث اختلال در کارکرد سامانه شود. از سوی دیگر، بکارگیری روش‌هایی که حاشیه اطمینان بیشتری دارند و طول مورد نیاز مبدل را بیشتر از مقدار واقعی تخمین می‌زنند می‌تواند اجرای طراح را از منظر اقتصادی تحت‌الشعاع قرار دهد و یا در محیط‌های شهری که اغلب با کمبود فضا مواجه هستیم چالش آفرین باشد.

1- Steady State

از 2300 باشد، برابر 3.66 بوده و در غیر این صورت از رابطه (2) بدست می‌آید.

$$Nu = \frac{\xi/8(Re - 1000)pr}{1 + 12.7\sqrt{\left(\frac{\xi}{8}\right)}\left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \quad (2)$$

$$\xi = (1.82 \log Re - 1.64)^{-2} \quad (3)$$

در رابطه (1)، J افت فشار ویژه نامیده شده و از طریق رابطه (4) محاسبه می‌شود:

$$J = 0.258 \frac{c_p \rho^2 \xi}{k Nu D^5} \dot{v}^3 \quad (4)$$

منظور از $\dot{v}$ دبی حجمی هوای ورودی به کانال بر حسب $\frac{m^3}{s}$ می‌باشد (جدول 1).

در این روش دمای خروجی از کانال زیر زمینی بر اساس فرض حالت پایا از رابطه (5) به دست می‌آید.

$$T_{a,out} = T_{wall} + (T_{a,in} - T_{wall})e^{\left(\frac{-2\pi r_i L h}{\dot{m} c_p}\right)} \quad (5)$$

در رابطه (5)، T_{wall} دمای جداره کانال بوده که با متوسط دمای سالانه خاک در عمق دفن کانال برابر می‌باشد. h ضریب انتقال حرارت جابجایی بین جداره لوله و هوای داخل کانال می‌باشد.

رهیافت دیگری که برای طراحی سامانه کانال‌های زیر زمینی هوا وجود دارد، استفاده از مدل انتقال حرارت ناپایا است. در این روش اثرات اشباع حرارتی خاک اطراف کانال و به تبع آن افت عملکرد حرارتی سیستم با گذر زمان مورد توجه قرار می‌گیرد. پارامتر فاکتور کاهش¹ که به صورت (6) تعریف می‌شود، به خوبی بیانگر این واقعیت است.

$$DF = 1 - \frac{(T_{in} - T_{out})_{transient}}{(T_{in} - T_{out})_{steady state}} \quad (6)$$

در این مورد نیز می‌توان به تحقیقات میسرا و همکاران [4-2] و بن‌هامو و دراویی [5] اشاره نمود. در همه این پژوهش‌ها افت عملکرد حرارتی سیستم در یک بازه زمانی کوتاه (24 ساعته) مطالعه شده و بررسی‌ها برای بازه کارکرد طولانی مدت انجام نشده است. به نظر می‌رسد که اگر طراحی بر اساس مدل‌های ناپایا در بازه زمانی طولانی مدت انجام گیرد، طول مورد نیاز مبدل با آنچه روش‌های پایا برآورد می‌کنند تفاوت چشمگیری داشته باشد.

در بررسی تحقیقات انجام شده بر روی عملکرد حرارتی کانال‌های زیر زمینی هوا بر اساس مدل‌های ناپایا، نکته دیگری که به چشم می‌خورد نحوه اعمال شرط دمای ورودی به کانال است. در برخی از موارد دمای هوای ورودی به کانال ثابت و برابر با بیشینه دما در تاریخچه اقلیمی منطقه در نظر گرفته شده است [6-8]. در مواردی نیز دیده می‌شود که جهت اعمال دمای ورودی از دمای پریدیک استفاده شده است [9، 10]. در موارد متعددی نیز از دمای ساعت به ساعت محیط (دمای واقعی) به عنوان دمای ورودی به کانال زیرزمینی استفاده شده است. به عنوان نمونه می‌توان به تحقیقات لی و همکاران [11] در سال 2014 اشاره نمود که جهت بررسی سامانه ترکیبی مبدل حرارتی هوا - زمین و هواکش خورشیدی، دمای ساعت به ساعت محیط را به عنوان دمای ورودی به سامانه در نظر گرفتند.

بر اساس آنچه تاکنون بیان شد، مشخص می‌شود که به منظور طراحی سامانه کانال زیرزمینی هوا می‌توان روش‌های مختلفی را برگزید که به طبع هر یک از این روش‌ها نقاط قوت و ضعف مخصوص به خود دارند. در این پژوهش با هدف ارزیابی قابلیت‌ها و محدودیت‌های رهیافت‌های مختلف طراحی نتایج به دست آمده از چهار روش زیر:

- استفاده از مدل پایا و با فرض دمای هوای ورودی ثابت
 - استفاده از مدل ناپایا و با فرض دمای هوای ورودی ثابت
 - استفاده از مدل ناپایا و با فرض دمای هوای ورودی پریدیک
 - استفاده از مدل ناپایا و با اعمال دمای هوای ورودی واقعی
- در پیش بینی طول مورد نیاز مبدل حرارتی برای کارکرد مداوم سامانه برای تأمین بار سرمایشی مورد نیاز یک فضای نمونه در شرایط اقلیمی شهر تهران بررسی و مقایسه شده است. بر اساس جستارهای نویسندگان تاکنون چنین مقایسه‌ای برای ارزیابی روش‌های مختلف طراحی کانال‌های زیر زمینی هوا انجام نشده است.

2- مدل سازی عددی عملکرد حرارتی سامانه در شرایط ناپایا

در این مقاله سعی شده است کلیه بخش‌های مبدل حرارتی هوا - زمین شامل جریان هوای داخل کانال زیرزمینی و نفوذ حرارت در خاک اطراف کانال و اثرات متقابل این دو پدیده بطور همزمان به صورت عددی مدل‌سازی و حل گردد. جهت کاهش دانسیته شبکه محاسباتی، مسئله با فرض تقارن محوری حل شده است. این فرض قبلاً در مرجع [6] نیز استفاده شده و صحت آن به اثبات رسیده است. معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی برای فضای داخل کانال زیرزمینی به طور همزمان با معادله انتقال حرارت هدایت حرارتی در خاک اطراف کانال توسط نرم‌افزار فلوئنت² حل شده است. برای هوای ورودی لوله شرط سرعت ورودی اعمال شده و در خروجی لوله نیز شرط فشار خروجی در نظر گرفته شده است. بر روی سطوح جانبی غلاف خاک اطراف لوله، شرایط حرارتی دما ثابت (برابر با دمای خاک در عمق مورد نظر) اعمال گردیده است. انتخاب شرایط مرزی دمایی در ورودی لوله زیر زمینی یکی از مباحث اصلی مقاله است که در ادامه به تفصیل در مورد آن بحث خواهد شد.

گسسته‌سازی معادلات به روش ضمنی انجام شده است. در مواردی که جریان هوای داخل کانال آشفته بوده، جهت مدل سازی جریان آشفته از مدل توربولانسی k-ε استاندارد استفاده شده است. بر روی دیواره داخلی لوله شرط

جدول 1 مشخصات هندسی و فیزیکی مبدل حرارتی هوا - زمین

Table 1 Specifications of earth-air heat exchange

پارامتر	واحد	مقدار
عمق دفن	(m)	3
ضخامت لوله	(m)	0.002
قطر کانال	(m)	0.3
دبی هوای ورودی	(m ³ /s)	0.028
حداکثر دمای ورودی	°C	41.25
حداقل دمای ورودی	°C	19.9
ضریب هدایت لوله	(W/mK)	16.27
گرمای ویژه لوله	(J/kgK)	502.48
چگالی لوله	(kg/m ³)	8030
ضریب هدایت خاک	(W/mK)	0.52
گرمای ویژه خاک	(J/kgK)	1140
چگالی خاک	(kg/m ³)	1400
ضریب هدایت هوا	(W/mK)	0.0264
گرمای ویژه هوا	(J/kgK)	1005
چگالی هوا	(kg/m ³)	1.166
پرانتل هوا	(-)	0.68

4- نتایج

به منظور ارزیابی دقت و عملکرد روش‌های مختلف طراحی کانال‌های زیر زمینی هوا، نتایج به دست آمده از این پژوهش در دو بخش ارائه شده است. در ابتدا دو رهیافت استفاده از مدل‌های پایا و ناپایا در طراحی و تخمین طول مورد نیاز یک مبدل هوا-زمین تحت شرایط کاری معین و مشخص مورد مقایسه قرار گرفته است. پس از آن به بررسی تأثیر شرایط فرضی در نظر گرفته شده برای دمای ورودی بر دقت طراحی پرداخته شده است.

در این بررسی قطر لوله و دبی هوای ورودی به کانال زیرزمینی به ترتیب برابر با 0.3 m و $0.028 \text{ m}^3/\text{s}$ در نظر گرفته شده است. از آنجا که دبی هوای حامل بار سرمایشی برای یک فضای مسکونی با مساحت زیربنای 40 m^2 متر مربع و با عایقکاری حرارتی مطلوب، چیزی حدود $100.8 \text{ m}^3/\text{h}$ است [13]، دبی در نظر گرفته شده در محاسبات تقریباً یک دهم دبی هوای مورد نیاز برای تأمین بار سرمایشی فضای مذکور خواهد بود. البته لازم به ذکر است که اثرات قطر کانال و دبی هوای ورودی در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت و معلوم شد که این پارامترها بر کلیات بحث این پژوهش یعنی بر مقایسه دقت روش‌های مختلف طراحی تأثیر چندانی ندارد.

4-1- مقایسه دو رهیافت پایا و ناپایا در طراحی کانال‌های زیرزمینی هوا

بررسی‌های انجام شده با استفاده از مدلسازی حرارتی کانال‌های زیر زمینی هوا به صورت ناپایا نشان داد که برای شرایط اقلیمی شهر تهران، عملکرد حرارتی سامانه با تقریب قابل قبولی پس از 30 روز کارکرد مداوم به حالت پایا می‌رسد. بنابراین می‌توان نتایج مدل ناپایا را پس از گذشت این بازه زمانی با نتایج مدل پایا مقایسه نمود. در شکل 2 دمای هوای خروجی برای کانال‌هایی با طول‌های مختلف با استفاده از دو رهیافت پایا و ناپایا (پس از یک ماه کارکرد مداوم سیستم) و با فرض دمای هوای ورودی ثابت (برابر با بیشینه دمای هوا در جولای 2010) ارائه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود در صورتی که مسئله به صورت پایا مورد حل قرار گیرد به دلیل نادیده انگاشتن اشباع حرارتی خاک اطراف کانال که با گذشت زمان روی می‌دهد، در محاسبه طول مورد نیاز مبدل خطای زیادی وارد می‌شود. به عنوان نمونه در صورتی که دمای 26°C به عنوان دمای مطلوب خروجی انتخاب شود، در حالت استفاده از مدل پایا طول مورد نیاز کانال حدود 79 m کمتر از مقدار

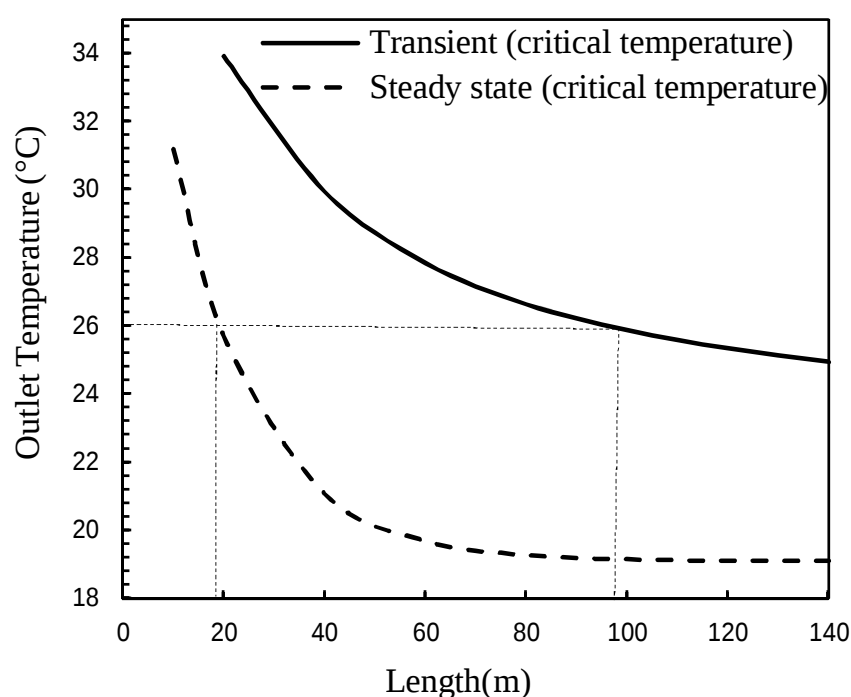


Fig. 2 Comparison of transient model with steady state model

شکل 2 مقایسه نتایج مدل ناپایا (گذرا) و مدل پایا

مرزی دیواره بدون لغزش با انتقال حرارت کوپل شده و شرایط مرزی در ورودی کانال به صورت شرط سرعت ورودی و در خروجی کانال، شرط فشار تخلیه در نظر گرفته شده است.

از آنجا که شهر تهران به عنوان اقلیمی معتدل و متوسطی از کل ایران محسوب می‌شود، تهران به عنوان نمونه مطالعاتی انتخاب شد و جهت اعمال کلیه داده‌های ورودی شامل دمای هوای محیط، دمای خاک و مشخصات حرارتی هوای ورودی و خاک اطراف کانال، از مشخصات این اقلیم استفاده گردید. بر اساس داده‌های هواشناسی موجود، در 60 سال گذشته (بازه زمانی 1951 الی 2010) گرمترین دمای سالانه برای تهران در جولای سال 2010 اتفاق افتاده است. بنابراین داده‌های این ماه به عنوان مبنای طراحی در نظر گرفته شد. در شرایط دمای ورودی واقعی، دمای ساعت به ساعت در ماه جولای 2010 به صورت یک فایل ورودی توسط کاربر در نرم افزار اعمال گردید. در شرایط فرض دمای پریودیک، دمای ساعت به ساعت در هر شبانه روز به صورت یک تابع کسینوسی و بر مبنای بیشینه و کمینه مطلق دمای ثبت شده در ماه جولای سال 2010 در نظر گرفته شد. در شرایط دما ثابت نیز، بیشینه دمای ثبت شده در این ماه به عنوان مبنای طراحی قرار گرفت. استقلال از شبکه و گام زمانی مورد مطالعه قرار گرفت و تعداد گره 78600 و گام زمانی 10 ثانیه برای محاسبات انتخاب شد.

3- تأیید و اعتبار سنجی حل عددی

جهت حصول اطمینان از روش حل عددی به کار گرفته شده در این تحقیق، نتایج به دست آمده از نرم افزار با داده‌های تجربی گزارش شده در مرجع [12] در شرایط مشابه مقایسه شد. همان‌طور که در شکل 1 نیز دیده می‌شود مدل حاضر از دقت قابل قبولی برخوردار است.

بدون پوشش بودن ترموکوپل‌ها و تأثیر تبادلات تابشی بین جداره کانال و ترموکوپل و عدم امکان تعیین دقیق خواص ترموفیزیکی خاک از جمله عوامل خطایی است که در مرجع [12] صراحتاً به آن اشاره شده است. همچنین به علت اینکه در داده‌های تجربی فاصله دقیق ترموکوپل نسبت به سطح داخلی لوله گزارش نشده در روش حل عددی، دمای متوسط گیری شده در هر مقطع طولی کانال به عنوان مبنای مقایسه در نظر گرفته شده است که این موضوع نیز می‌تواند تا حدودی منشأ خطا باشد.

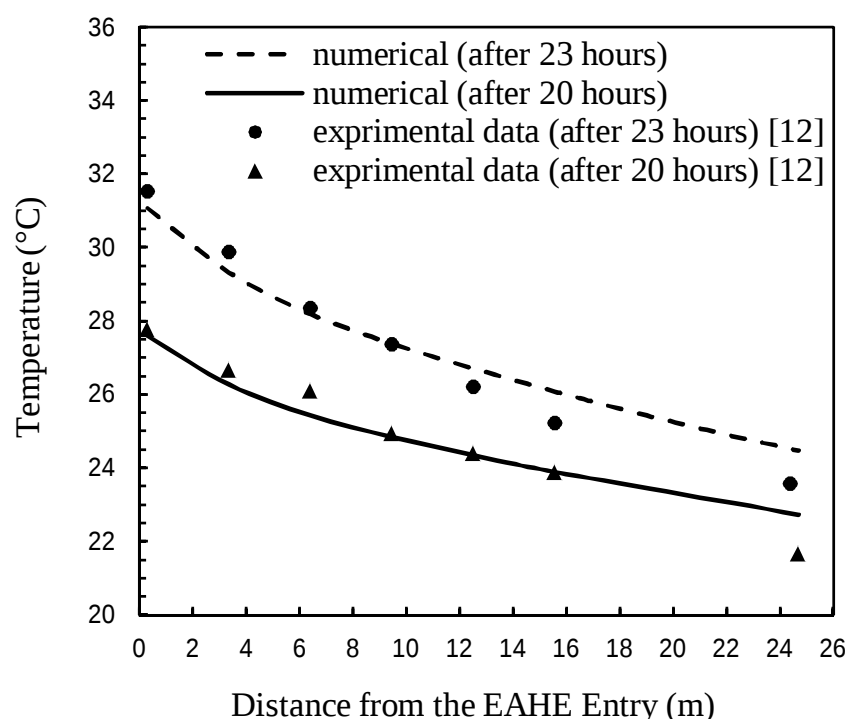


Fig. 1 Comparison present results with experimental data, 20 and 23 hours after launch

شکل 1 اعتبار سنجی داده‌ها، 20 و 23 ساعت پس از شروع به کار سامانه

با دمای ورودی بحرانی استفاده شود طول مورد نیاز کانال بیش از اندازه برآورد می‌شود که این امر می‌تواند هزینه‌های اجرایی طرح را به مراتب بالا برده و یا حتی اجرای آن را در مناطق پرتراکم شهری با چالش مواجه نماید. این درحالی است که در صورت استفاده از مدل ناپایا با دمای ورودی پریودیک می‌توان طول مورد نیاز کانال را با دقت مناسبی تخمین زد. خلاصه‌ای از نتایج در جدول 2 ذکر شده است.

6- فهرست علائم

h	ضریب انتقال حرارت جابجایی هوا ($\text{Wm}^{-2} \text{K}^{-1}$)
k	ضریب هدایت ($\text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$)
L	طول کانال (m)
Nu	عدد ناسلت
Pr	عدد پرانتل
Re	عدد رینولدز
T_a	دمای هوا ($^{\circ}\text{C}$)
T_{wall}	دمای جداره کانال ($^{\circ}\text{C}$)
U	ضریب کلی انتقال حرارت ($\text{Wm}^{-2} \text{K}^{-1}$)
علائم یونانی	
α	ضریب نفوذ حرارتی خاک (m^2s^{-1})
$\dot{v}$	دبی حجمی هوا (m^3h^{-1})
ρ	چگالی (kgm^{-3})

7- مراجع

- [1] M. D. Paepe, M. Janssens, Thermo-hydraulic design of earth air heat exchangers, *Energy and Buildings*, Vol. 35, No. 4, pp. 389-397, 2003.
- [2] R. Misra, V. Bansal, G. D. Agrawal, J. Mathur, T. Aseri, Transient analysis based determination of derating factor for earth air tunnel heat exchanger in summer, *Energy and Buildings*, Vol. 58, No. 1, pp. 103-110, 2013.
- [3] V. Bansal, R. Misra, G. D. Agarwal, J. Mathur, 'Derating Factor' new concept for evaluating thermal performance of earth air tunnel heat exchanger: A transient CFD analysis, *Applied Energy*, Vol. 102, No. 1, pp. 418-426, 2013.
- [4] R. Misra, V. Bansal, G. D. Agrawal, J. Mathur, T. K. Aseri, CFD analysis based parametric study of derating factor for Earth Air Tunnel Heat Exchanger, *Applied Energy*, Vol. 103, No. 1, pp. 266-277, 2013.
- [5] M. Benhammou, B. Draoui, Parametric study on thermal performance of earth-to-air heat exchanger used for cooling of buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 44, No. 1, pp. 348-355, 2015.
- [6] F. Niu, Y. Yu, D. Yu, H. Li, Investigation on soil thermal saturation and recovery of an earth to air heat exchanger under different operation strategies, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 77, No. 1, pp. 90-100, 2015.
- [7] T. S. Bisoniya, A. Kumar, P. Baredar, Energy metrics of earth-air heat exchanger system for hot and dry climatic conditions of India, *Energy and Buildings*, Vol. 86, No. 1, pp. 214-221, 2015.
- [8] M. Maerefat, S. Ahmadi, A. Haghighi Poshtiri, Investigation and performance analysis of hybrid cooling system of air underground channel and direct evaporative cooler, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 5, pp. 137-144, 2015. (in Persian)
- [9] P. Hollmuller, Analytical characterisation of amplitude-dampening and phase-shifting in air/soil heat-exchangers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, No. 1, pp. 4303-4317, 2003.
- [10] J. Vaza, M. A. Sattler, R. S. Brum, E. D. Santosa, L. A. Isoldi, An experimental study on the use of Earth-Air Heat Exchangers (EAHE), *Energy and Buildings*, Vol. 72, No. 1, pp. 122-131, 2014.
- [11] H. Li, Y. Yu, F. Niu, M. Shafik, B. Chen, Performance of a coupled cooling system with earth-to-air heat exchanger and solar chimney, *Renewable Energy*, Vol. 62, No. , pp. 468-477, 2014.
- [12] D.Y. Goswami, A.S. Dhaliwal, Heat transfer analysis in Environmental control using an underground air tunnel, *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 5, No. 2, pp. 107-141, 1985.
- [13] A. Artur, J. R. Bell, W. L. Angel, *HVAC Equations, Data, and Rules of Thumb*, 3rd Edition, Mc Graw-Hill, pp.39-57, 2015.

واقعی برآورد می‌شود که خطایی معادل 68.8 درصد را به همراه خواهد داشت.

4-2- تأثیر شرایط فرض شده برای دمای ورودی بر دقت مدل‌های ناپایا

در این قسمت طول مورد نیاز کانال با استفاده از مدل گذرا و بر اساس سه نوع دمای ورودی مختلف یعنی دمای ورودی ثابت یا بحرانی (بیشینه دما در جولای 2010)، دمای ورودی پریودیک (بر اساس بیشینه و کمینه مطلق دما در جولای 2010) و دمای ساعت به ساعت واقعی در جولای 2010، پس از یک ماه کارکرد مداوم سامانه بررسی و مقایسه شده است. نتایج این مقایسه در شکل 3 نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در صورتی که دمای 26°C به عنوان دمای مطلوب خروجی انتخاب شود، بر اساس شرط ورودی دمای هوای واقعی، طول مورد نیاز مبدل حدود 56m خواهد بود، در حالی که مدل مبتنی بر فرض دمای ورودی پریودیک این طول را 1.7m کمتر و مدل مبتنی بر دمای ورودی ثابت، آن را حدود 43m بیشتر برآورد می‌کند.

5- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد در صورتی که طراحی سامانه بر اساس مدل پایا انجام شود طول مورد نیاز کانال بسیار کمتر از مقدار واقعی تخمین زده می‌شود. این امر باعث می‌شود که سامانه طراحی شده در عمل نتواند نیاز سرمایشی فضای مورد نظر را به خوبی تأمین کند، همچنین اگر از مدل ناپایا

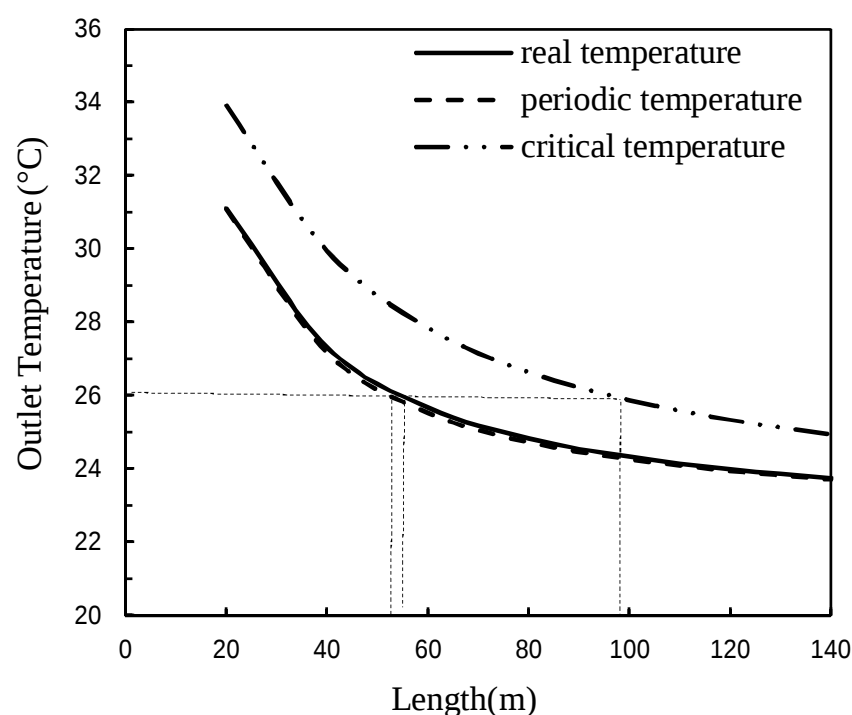


Fig. 3 Effect of inlet thermal boundary condition

شکل 3 تأثیر شرایط مرزی دمای ورودی به کانال بر طراحی

جدول 2 مقایسه عملکرد روش‌های مختلف طراحی نسبت به شرایط واقعی

Table 2 Assessment of various designing approaches

روش طراحی	تخمین طول مورد نیاز (m)	خطای برآورد (%)
مدل ناپایا با فرض دمای ورودی پریودیک	54.26	-3.1
مدل ناپایا با فرض دمای ورودی ثابت بحرانی	98.84	+72.9
مدل پایا با فرض دمای ورودی ثابت بحرانی	17.5	-68.8