

مقاله پژوهشی

## همگرایی سریع تر روابط ترمودینامیکی هوای مرطوب با استفاده از روابط $\Delta$ و $K$

ابراهیم الهی<sup>۱\*</sup>، فرهنگ سرشکی<sup>۲</sup>، رضا کاکایی<sup>۳</sup>

۱. استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه سیستان و بلوچستان، elahir@eng.usb.ac.ir  
۲. استاد، دانشکده مهندسی معدن نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، farhang@gmail.com  
۳. استاد، دانشکده مهندسی معدن نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، r\_kakaie@yahoo.com

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۷ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۳۱

### چکیده

به طور معمول تهویه معادن بر پایه تحلیل سیالات استوار است. هوا به عنوان سیال مورد نظر در علم تهویه معدن مطرح است. از نظر علم سیالات، سیال هوا در شرایط مختلف رفتارهای متفاوتی را از خود نشان می‌دهد. بر این اساس در روش تحلیل سیالات مربوط به علم تهویه معدن می‌توان سیال هوا را از چند دیدگاه مختلف همچون مدل خشک، مدل مرطوب، مدل تراکم‌ناپذیر و مدل تراکم‌پذیر تحلیل کرد. محققان مدل‌های مختلف تحلیل سیالات را در تهویه معدن مورد استفاده قرار داده‌اند و شرایط واقعی در این زمینه برای طراحی تهویه معدن در نظر گرفتن دو شرط هوای مرطوب و تحلیل سیال تراکم‌پذیر است. بر این اساس در این مقاله شرایط مختلف تحلیل سیالاتی از نظر علم ترمودینامیکی برای طراحی تهویه معدن در نظر گرفته شد و نتایج نشان می‌دهند که تحلیل سیال تراکم‌پذیر برای هوای مرطوب نیاز به حل دو رابطه غیرخطی است که نیازمند روش‌های محاسبات عددی است. یکی از روش‌های رایج در محاسبات عددی استفاده از روش نیوتن-رافسون است که بر پایه مشتق استوار است. استفاده از این روش برای حل این روابط غیرخطی سبب حجیم شدن حجم محاسبات ریاضی می‌شود. بنابراین در این مقاله برای سهولت حل این دو رابطه غیرخطی و کاهش خطای انجام محاسبات ریاضی دو روش دلتا ( $\Delta$ ) و کا ( $K$ ) براساس قوانین ترمودینامیکی برای تحلیل هوای مرطوب تراکم‌پذیر در طراحی تهویه معدن بر اساس مشخص بودن مقدار آهنگ تبخیر در طول حفاری ارائه می‌شود. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که این دو روش عملکرد بهتر و ساده‌تری دارند.

### کلمات کلیدی

تهویه، سیال هوا، تراکم‌پذیر، تراکم‌ناپذیر.

## ۱- مقدمه

۷۲٪ وزن مخصوص سیال در نقطه مقصد (نیوتن بر متر مکعب)

$\sum H$ : افت فشار کلی سیال در بین دو ایستگاه (متر)

$$\Delta P_f = \rho \frac{f}{2} \frac{LP}{S} V^2 = RQ^2 \quad (۲)$$

که در آن:

$\Delta P_f$ : افت فشار اصطکاکی بین دو ایستگاه (پاسکال)

$\rho$ : جرم حجمی متوسط هوا بین دو ایستگاه (کیلوگرم بر متر مکعب)

$f$ : ضریب اصطکاک بدون بعد

$L$ : طول مسیر حفاری (متر)

$P$ : محیط مقطع حفاری (متر)

$S$ : سطح مقطع حفاری (متر مربع)

$V$ : سرعت متوسط هوا بین دو ایستگاه (متر بر ثانیه)

$R$ : مقاومت اصطکاکی کار معدنی ( $NS^2/m^8$ )

$Q$ : شدت جریان متوسط هوا بین دو ایستگاه (متر مکعب بر ثانیه)

## ۱-۲- تئوری هوای خشک تراکم‌پذیر

اگر عمق استخراج نسبت به بالاترین خط تراز توپوگرافی آن بیشتر از ۵۰۰ متر باشد در این صورت محققان معتقدند سیال هوا برای تهویه این معادن بهتر است از نوع سیال تراکم‌پذیر فرض شود. اگر در این مدل از تهویه، مساله رطوبت در نظر گرفته نشود در این صورت هوای داخل معدن خشک فرض می‌شود. بنابراین برای طراحی تهویه معادن با فرض هوای خشک تراکم‌پذیر غالباً از روش تحلیل ترمودینامیکی انجام می‌شود. در این روابط، مسایل گرما بدون مسایل رطوبت در حفاریات معدنی منظور می‌شود. روابط ترمودینامیکی این تئوری در روابط ۳ تا ۱۱ ارائه شده است [۴-۱]، [۶].

$$P = \rho R_d T \quad (۳)$$

$$-\Delta_{ep} - \Delta_{ek} + W_{12} = \int VdP + F_{12} = h_{12} - q_{12} \quad (۴)$$

$$\Delta_{ep} = g(Z_2 - Z_1) \quad (۵)$$

$$\Delta_{ek} = \frac{1}{2}(V_2^2 - V_1^2) \quad (۶)$$

$$\int VdP = R_d(t_{d2} - t_{d1}) \frac{k}{k-1} \quad (۷)$$

$$k = \frac{F_{12} + \Delta_{ep} + \Delta_{ek} - W_{12}}{F_{12} + \Delta_{ep} + \Delta_{ek} - W_{12} + R_d(t_{d2} - t_{d1})} \quad (۸)$$

$$F_{12} = \frac{f}{2} \frac{LP}{S} V^2 \quad (۹)$$

$$h_{12} = c_p(t_{d2} - t_{d1}) \quad (۱۰)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{273.15 + t_{d2}}{273.15 + t_{d1}} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (۱۱)$$

سیال حاکم در علم تهویه معادن مخلوط هواست. این سیال در طبیعت به صورت خشک یا مرطوب مطرح است. همچنین از نظر تئوری هر سیالی می‌تواند رفتار تراکم‌ناپذیری و تراکم‌پذیری داشته باشد. بر این اساس، روابط علم تهویه در معادن بر پایه چندین تئوری استوار است. این تئوری‌ها شامل هوای خشک تراکم‌ناپذیر، هوای خشک تراکم‌پذیر و هوای مرطوب تراکم‌پذیر است [۳-۴]، [۶]. پارامترهای مختلفی همچون عمق استخراج، دما و رطوبت هوا به عنوان پارامترهای مهم در طراحی تهویه معادن محسوب می‌شوند که توسط محققان مختلف به طور مکرر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند [۵]، [۷-۹]. هر یک از این محققان اهداف خاصی را دنبال کرده‌اند در این مقاله هم بر اساس قوانین علم ترمودینامیک در مورد طراحی تهویه معادن، تئوری‌های مختلفی بررسی و در نهایت دو روش  $\Delta$  و  $K$  برای سهولت محاسبات در حل رابطه‌های ترمودینامیکی برای تهویه معادن ارائه می‌شود.

## ۱-۱- تئوری هوای خشک تراکم‌ناپذیر

اگر عمق استخراج در تهویه استخراج زیرزمینی نسبت به بالاترین خط تراز توپوگرافی آن کمتر از ۵۰۰ متر باشد می‌توان سیال هوا را در تهویه این معادن از نوع سیال تراکم‌ناپذیر فرض کرد. بر این اساس در طراحی تهویه معادن با فرض سیال تراکم‌ناپذیر اغلب از روش‌های برنولی<sup>۱</sup> و اتکینسون<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. به طور معمول در این روابط مسایل رطوبت و گرما در حفاریات معدنی منظور نمی‌شوند و هوای جاری در حفاریات معدن از نوع هوای خشک منظور می‌شود. روابط برنولی و اتکینسون به ترتیب عبارتند از [۴-۱]، [۶]:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + \sum H \quad (۱)$$

که در آن:

$Z_1$ : ارتفاع نقطه مبدا (متر)

$P_1$ : فشار استاتیکی سیال در نقطه مبدا (پاسکال)

$V_1$ : سرعت سیال در نقطه مبدا (متر بر ثانیه)

$\gamma$ : وزن مخصوص سیال در نقطه مبدا (نیوتن بر متر مکعب)

$Z_2$ : ارتفاع نقطه مقصد (متر)

$P_2$ : فشار استاتیکی سیال در نقطه مقصد (پاسکال)

$V_2$ : سرعت سیال در نقطه مقصد (متر بر ثانیه)

<sup>۱</sup> Bernoulli

<sup>۲</sup> Atkinson

$$R_h = \frac{P_v}{P_{vsd}} \quad (23)$$

$$-\Delta_{ep}^* - \Delta_{ek}^* + W_{12} = \int VdP + F_{12} = h_{12}^* - q_{12} \quad (24)$$

$$\Delta_{ep}^* = g(Z_2 - Z_1) \left(1 + \frac{w_2 + w_1}{2}\right) \quad (25)$$

$$\Delta_{ek}^* = \frac{1}{2}(V_2^2 - V_1^2) \left(1 + \frac{w_2 + w_1}{2}\right) \quad (26)$$

$$\int VdP = \left(\frac{P_2}{\rho_{d2}} - \frac{P_1}{\rho_{d1}}\right) \frac{k}{k-1} \quad (27)$$

$$k = \frac{\ln\left(\frac{P_2/P_1}{\rho_{d2}/\rho_{d1}}\right)}{\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)} \quad (28)$$

$$h_{12} = c_p(t_{d2} - t_{d1}) + w_2 h_{v2} - w_1 h_{v1} - (w_2 - w_1) \bar{h}_w \quad (29)$$

$$h_{v1} = (1.81t_{d1} - 2501) \times 1000 \quad (30)$$

$$h_{v2} = (1.81t_{d2} - 2501) \times 1000 \quad (31)$$

$$\bar{h}_w = 2100 \times (t_{d2} + t_{d1}) \quad (32)$$

که در این روابط:

$P_d$ : فشار هوای خشک (پاسکال)

$P_v$ : فشار بخار آب (پاسکال)

$\rho_d$ : جرم حجمی هوای خشک (کیلوگرم بر متر مکعب)

$\rho_m$ : جرم حجمی هوای مرطوب (کیلوگرم بر متر مکعب)

$L$ : گرمای نهان تبخیر آب (ژول بر کیلوگرم)

$P_{vs}$ : فشار بخار آب اشباع (پاسکال)

$w_s$ : رطوبت اشباع هوا (کیلوگرم بر کیلوگرم)

$w$ : رطوبت هوا (کیلوگرم بر کیلوگرم)

$P_{vsd}$ : فشار بخار آب برای دمای خشک هوا (پاسکال)

$R_h$ : رطوبت نسبی هوا (درصد)

$c_p$ : ظرفیت گرمایی ویژه بخار آب در فشار ثابت معادل ۱۸۸۴

(ژول بر کیلوگرم درجه کلون)

## ۲- مقایسه بین انواع روش‌های تهویه در معادن از نظر

### تحلیل سیالاتی

برای مقایسه بین انواع روش‌های طراحی تهویه در معادن از

نظر تحلیل سیالاتی در حالت‌های تراکم‌ناپذیری و تراکم‌پذیری

در چند مدل مختلف در این مقاله ارائه می‌شود. همچنین

محاسبات تهویه در معادن بر پایه فرضیاتی انجام می‌شود این

فرضیات در این مقاله شامل دما و فشار هوا در سطح آب‌های

آزاد به ترتیب معادل ۱۵ درجه سانتی‌گراد و ۷۶۰ میلی‌متر

جیوه یا ۱۰۱۳۲۵ پاسکال یا ۱۰۳۳۲/۳ میلی‌متر آب و

همچنین شتاب ثقل زمین معادل ۹/۸۰۶۶۵ متر بر مجذور ثانیه

در نظر گرفته شده است. همچنین برای برآورد فشار استاتیکی

هوا از رابطه ۳۳ استفاده می‌شود.

که در این روابط:

$P$ : فشار هوا (پاسکال)

$T$ : دمای هوای خشک (کلون)

$\Delta_{ep}$ : تغییرات انرژی پتانسیل (ژول بر کیلوگرم)

$\Delta_{ek}$ : تغییرات انرژی جنبشی (ژول بر کیلوگرم)

$W_{12}$ : قدرت بادبزن (ژول بر کیلوگرم)

$F_{12}$ : اصطکاک کار معدنی (ژول بر کیلوگرم)

$q_{12}$ : مقدار گرما بین دو ایستگاه (ژول بر کیلوگرم)

$R_d$ : ضریب ثابت هوای خشک معادل ۲۸۷/۰۴ (ژول بر

کیلوگرم درجه کلون)

$t_{d1}$ : دمای هوای خشک در ایستگاه ۱ (سانتی‌گراد)

$t_{d2}$ : دمای هوای خشک در ایستگاه ۲ (سانتی‌گراد)

$c_p$ : ظرفیت گرمایی ویژه هوا در فشار ثابت معادل ۱۰۰۵ (ژول

بر کیلوگرم درجه کلون)

### ۱-۳- تئوری هوای مرطوب تراکم‌پذیر

همچنین با افزایش عمق استخراج بیش از ۵۰۰ متر فرض

می‌شود که سیال هوا برای تهویه این معادن از نوع سیال

تراکم‌پذیر است. اگر در این مدل از تهویه، مساله رطوبت در

نظر گرفته شود در این صورت هوای داخل معدن مرطوب فرض

می‌شود. بنابراین طراحی تهویه معادن با فرض هوای مرطوب

تراکم‌پذیر غالباً از روش تحلیل ترمودینامیکی انجام می‌شود. در

این روابط، مسایل گرما با مسایل رطوبت در حفاریات معدنی

منظور می‌شوند. رابطه‌های ترمودینامیکی این تئوری در روابط

۱۲ تا ۳۲ ارائه شده است [۳-۵].

$$P = P_d + P_v \quad (12)$$

$$P_d = \rho_d R_d T \quad (13)$$

$$P_v = \rho_v R_v T = w \rho_d R_v T \quad (14)$$

$$\rho_d = \frac{P - P_v}{287.04 T} \quad (15)$$

$$\rho_m = \frac{P - 0.378 P_v}{287.04 T} \quad (16)$$

$$L = (2502.5 - 2.386 t_w) \times 10^3 \quad (17)$$

$$P_{vs} = 610.6 \exp\left(\frac{17.27 t_w}{237.3 + t_w}\right) \quad (18)$$

$$w_s = 0.622 \frac{P_{vs}}{P - P_{vs}} \quad (19)$$

$$w = \frac{L w_s - c_p (t_d - t_w)}{L + c_p (t_d - t_w)} \quad (20)$$

$$P_v = \frac{P w}{0.622 + w} \quad (21)$$

$$P_{vsd} = 610.6 \exp\left(\frac{17.27 t_d}{237.3 + t_d}\right) \quad (22)$$

$$\rightarrow P_1 = 97805.639 \text{ Pa}$$

ب- برآورد جرم حجمی هوای ورودی

$$\rho_1 = \frac{P_1}{RT_1} = \frac{97805.639}{287.04 \times 303.15} = 1.123994 \text{ kg/m}^3$$

پ- برآورد جرم حجمی و سرعت هوای خروجی

چون سیال از نوع هوای خشک تراکم‌ناپذیر است، بنابراین مقدار جرم حجمی هوای درون حفاری ثابت است. جرم حجمی هوای خروجی برابر جرم حجمی هوای ورودی و همچنین سرعت هوای ورودی و خروجی با هم برابرند.

ت- برآورد رابطه اتکینسون

$$\Delta P_f = \rho \frac{f}{2} \frac{LP}{S} V^2 = 1.123994 \times \frac{0.02}{2} \times \frac{1000 \times 9.4248}{7.0686} \times 7^2$$

$$\Delta P_f = 734.343 \text{ Pa}$$

ث- فشار هوا در انتهای حفاری بدون سایر افت‌های دیگر

$$P_2 = P_1 - \Delta P_f = 97805.639 - 734.343 = 97071.296 \text{ Pa}$$

در این مدل فرضی، انتهای حفاری پایین‌تر از سطح آب‌های آزاد است بنابراین فشار اتمسفر باید بیش از ۱ اتمسفر یا بیش از ۱۰۱۳۲۵ پاسکال باشد ولی متاسفانه در تحلیل مدل تراکم‌ناپذیری به دلیل عدم توجه به شیب حفاریات معدنی، مقدار فشار انتهای حفاری را کمتر از ۱۰۱۳۲۵ پاسکال برآورد می‌کند که با مقادیر واقعی مطابقت ندارد.

۲-۱-۲- طراحی تهویه از دیدگاه هوای خشک تراکم‌پذیر

با توجه به مثال چاه قائم فرضی و تاکید خشک بودن هوا در این مدل، مساله رطوبت در نظر گرفته نمی‌شود بر این اساس مشخصات هوای خروجی در انتهای حفاری از نظر سیال تراکم‌پذیر برای هوای خشک در تکرار اول محاسبات به شرح زیر و نتایج سایر مراحل دیگر آن در جدول ۱ ارایه شده است.

الف- تکرار اول محاسبات

$$V_2 = 1.1V_1 = 1.1 \times 7 = 7.7 \text{ m/s}$$

$$\Delta_{ek} = \frac{1}{2} \times (7.7^2 - 7^2) = 5.145 \text{ J/kg}$$

$$\Delta_{ep} = g(Z_2 - Z_1) = 9.80665 \times -1000 = -9806.65 \text{ J/kg}$$

$$V = 0.5 \times (V_2 + V_1) = 0.5 \times (7.7 + 7) = 7.35 \text{ m/s}$$

$$F_{12} = \frac{f}{2} \frac{LP}{S} V^2 = \frac{0.02}{2} \times \frac{1000 \times 9.4248}{7.0686} \times 7.35^2$$

$$F_{12} = 720.29996 \text{ J/kg}$$

$$q_{12} = \frac{N}{\rho_1 V_1 S_1} = \frac{50 \times 1000}{1.123994 \times 7 \times 7.0686} = 899.031 \text{ J/kg}$$

$$h_{12} = c_p (t_{d2} - t_{d1}) = 1005 \times (t_{d2} - 30) \text{ J/kg}$$

$$\ln P = \ln P_0 \pm \frac{h}{RT} \quad (33)$$

که در آن:

$P$ : فشار استاتیکی هوا در نقطه مقصد (پاسکال)

$P_0$ : فشار استاتیکی هوا در نقطه مبدا (پاسکال)

$h$ : اختلاف ارتفاع بین دو نقطه مبدا و مقصد (متر)

$R$ : ضریب ثابت هوا معادل ۲۸۷٫۰۴ (ژول بر کیلوگرم درجه کلونین)

$T$ : دمای متوسط هوا بین دو نقطه مبدا و مقصد (درجه کلونین)

به طور کلی حفاریات معدنی از دیدگاه شیب حفاری به سه گروه افقی، شیبدار و قائم تقسیم می‌شود. از دیدگاه علم ترمودینامیکی بیشترین تغییرات انرژی در طول حفاری مربوط به حفاری قائم است بر این اساس در این مقاله از مثال چاه قائم استفاده می‌شود تا نتیجه بهتری از عملکرد انواع روابط ترمودینامیکی حاصل شود.

۲-۱- چاه قائم فرضی

در این مدل فرضی یک چاه قائم با مقطع دایره به شعاع ۱٫۵ در ارتفاع ۳۰۵٫۹۱۵۶ یا تقریباً ۳۰۶ متری از سطح آب‌های آزاد به طول ۱۰۰۰ متر حفر شده است. یک فن در دهانه چاه نصب و هوای تمیز را به صورت دهشی به درون چاه قائم می‌دمد. سرعت هوا در ابتدای حفاری برابر ۷ متر بر ثانیه، ضریب اصطکاک مسیر حفاری ۰٫۰۲، دمای هوا ورودی و رطوبت نسبی آن در این نقطه به ترتیب ۳۰ درجه سانتی‌گراد و ۲۵ درصد است. مقدار گرمای تولید شده در این حفاری برابر ۵۰ کیلو وات و آهنگ تبخیر در طول حفاری برابر ۰٫۰۰۰۶۵ برای یک کیلوگرم هوای خشک فرض می‌شود. بر این اساس مشخصات هوای خروجی در انتهای حفاری در مدل‌های مختلف تحلیل سیالاتی به شرح زیر بیان می‌شود:

۲-۱-۱- طراحی تهویه از دیدگاه هوای خشک تراکم‌ناپذیر

در این مدل مسایل گرما و رطوبت در نظر گرفته نمی‌شود بر این اساس مشخصات هوای خروجی در انتهای حفاری به شرح زیر محاسبه می‌شود.

الف- برآورد فشار اتمسفر هوای ورودی نسبت به سطح آب‌های آزاد

$$h = 305.9156 \text{ m}$$

$$T = 273.15 + \frac{30+15}{2} = 295.65 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\ln P_1 = \ln P_0 - \frac{h}{RT} = \ln(101325) - \frac{305.9156}{29.27 \times 295.65}$$

$$P_1 = 97805.639 \text{ Pa} \rightarrow w_1 = \frac{0.622P_{v1}}{P_1 - P_{v1}} = 0.00681771$$

$$w_2 = w_1 + 0.00065 = 0.00746771$$

$$\rho_{d1} = \frac{P_1 - P_{v1}}{287.04T_{d1}} = 1.111807 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\Delta_{ep}^* = g(Z_2 - Z_1)\left(1 + \frac{w_2 + w_1}{2}\right) = -9876.696027$$

$$V_2 = \frac{\rho_{d1}V_1}{\rho_{d2}} = \frac{7.782651}{\rho_{d2}} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\Delta_{ek}^* = \frac{1}{2}(V_2^2 - V_1^2)\left(1 + \frac{w_2 + w_1}{2}\right)$$

$$\Delta_{ek}^* = \left(\left(\frac{7.782651}{\rho_{d2}}\right)^2 - 7^2\right) \times 0.503571$$

$$V = 0.5 \times (V_2 + V_1) = \frac{3.8913}{\rho_{d2}} + 3.5$$

$$F_{12} = \frac{f}{2} \frac{LP}{S} V^2 = 13.333 \times \left(\frac{3.8913}{\rho_{d2}} + 3.5\right)^2$$

$$-\Delta_{ep}^* - \Delta_{ek}^* + W_{12} = h_{12}^* - q_{12} \quad (34)$$

$$h_{12}^* = c_p(t_{d2} - t_{d1}) + w_2 h_{v2} - w_1 h_{v1} - (w_2 - w_1) \overline{h_w}$$

$$h_{v2} = (1.81t_{d2} - 2501) \times 1000$$

$$h_{v1} = (1.81t_{d1} - 2501) \times 1000 = -2446700 \text{ J/kg}$$

$$\overline{h_w} = 2100 \times (t_{d2} + t_{d1}) = 2100 \times (t_{d2} + 30)$$

$$q_{12} = \frac{N}{\rho_{d1}V_1S_1} = 908.885 \text{ J/kg}$$

$$h_{12}^* = c_p(t_{d2} - t_{d1}) + w_2 h_{v2} - w_1 h_{v1} - (w_2 - w_1) \overline{h_w}$$

$$h_{v2} = (1.81t_{d2} - 2501) \times 1000$$

$$h_{v1} = (1.81t_{d1} - 2501) \times 1000 = -2446700 \text{ J/kg}$$

$$\overline{h_w} = 2100 \times (t_{d2} + t_{d1}) = 2100 \times (t_{d2} + 30)$$

$$q_{12} = \frac{N}{\rho_{d1}V_1S_1} = 908.885 \text{ J/kg}$$

$$9876.696027 - \left(\left(\frac{7.782651}{\rho_{d2}}\right)^2 - 7^2\right) \times 0.503571 = h_{12}^* - q_{12}$$

$$W_{12} = 0 \rightarrow -\Delta_{ep} - \Delta_{ek} + W_{12} = h_{12} - q_{12} \rightarrow t_{d2} = 40.6473 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$k = \frac{F_{12} + \Delta_{ep} + \Delta_{ek} - W_{12}}{F_{12} + \Delta_{ep} + \Delta_{ek} - W_{12} + R_d(t_{d2} - t_{d1})} = 1.507253$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{273.15 + t_{d2}}{273.15 + t_{d1}}\right)^{\frac{k}{k-1}} \rightarrow P_2 = 108370.2505 \text{ Pa}$$

$$\rho_2 = \frac{P_2}{RT_2} = \frac{108370.2505}{287.04 \times 313.797} = 1.203146 \text{ kg/m}^3$$

$$V_2 = \frac{V_1 P_1}{\rho_2} = 6.539484 \text{ m/s}$$

در پایان این مرحله لازم است بعضی از متغیرها مجدداً محاسبه شوند تا مقدار فشار نهایی هوا به پایداری لازم خود برسد. اگر دقت انجام محاسبات برابر ۰٫۰۰۱ فرض شود در این صورت طبق جدول ۱ نیاز به ۵ بار تکرار محاسبات است.

ب- طبق جدول ۱ فشار نهایی هوا در انتهای حفاری برابر تکرار پنجم ردیف فشار یعنی معادل ۱۰۸۵۱۵٫۰۳۹۳ پاسکال است. چون در این مدل فرضی، انتهای حفاری پایین تر از سطح آب‌های آزاد است، بنابراین فشار اتمسفر باید بیش از ۱۰۱۳۲۵ پاسکال باشد که نتایج نهایی حاصل از این بخش آن را تایید می‌کند.

### ۲-۱-۳- طراحی تهویه از دیدگاه هوای مرطوب تراکم‌پذیر

با توجه به مثال چاه قائم فرضی در این مدل مسایل گرما و رطوبت در نظر گرفته می‌شود بر این اساس مشخصات هوای خروجی در انتهای حفاری از نظر سیال تراکم‌پذیر برای هوای مرطوب به شرح زیر تفسیر می‌شود:

### الف- محاسبه اولین معادله طبق رابطه ۳۴

$$t_{d1} = 30^\circ\text{C} \rightarrow P_{vsd1} = 610.6 \text{ Exp}\left(\frac{17.27t_{d1}}{237.3 + t_{d1}}\right) = 4241.676 \text{ Pa}$$

$$R_{h1} = \%25 \rightarrow P_{v1} = R_{h1} \times P_{vsd1} = 1060.419 \text{ Pa}$$

جدول ۱- نتایج مراحل طراحی تهویه برای هوای خشک تراکم‌پذیر

| شرح           | تکرار ۱     | تکرار ۲     | تکرار ۳     | تکرار ۴     | تکرار ۵     | واحد              |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|
| $\Delta_{ek}$ | ۵/۱۴۵       | -۳/۱۱۷۵۷۳   | -۳/۱۷۳۰۷۹   | -۳/۱۷۳۴۶۷   | -۳/۱۷۳۴۷۰   | J/kg              |
| $\Delta_{ep}$ | -۹۸۰۶/۶۵    | -۹۸۰۶/۶۵    | -۹۸۰۶/۶۵    | -۹۸۰۶/۶۵    | -۹۸۰۶/۶۵    | J/kg              |
| $F_{12}$      | ۷۲۰/۲۹۹۹۶۰  | ۶۱۱/۰۵۸۷۳۹  | ۶۱۰/۲۹۲۳۴۱  | ۶۱۰/۲۸۶۹۸۱  | ۶۱۰/۲۸۶۹۴۴  | J/kg              |
| $t_{d2}$      | ۴۰/۶۴۷۳     | ۴۰/۶۵۵۵۲۱   | ۴۰/۶۵۵۵۷۶   | ۴۰/۶۵۵۵۷۷   | ۴۰/۶۵۵۵۷۷   | oC                |
| $k$           | ۱/۵۰۷۲۵۳    | ۱/۴۹۸۱۲۵    | ۱/۴۹۸۰۶۲    | ۱/۴۹۸۰۶۲    | ۱/۴۹۸۰۶۲    | -                 |
| $P_2$         | ۱۰۸۳۷۰/۲۵۰۵ | ۱۰۸۵۱۴/۰۲۵۸ | ۱۰۸۵۱۵/۰۳۲۲ | ۱۰۸۵۱۵/۰۳۹۲ | ۱۰۸۵۱۵/۰۳۹۳ | Pa                |
| $\rho_2$      | ۱/۲۰۳۱۴۶    | ۱/۲۰۴۷۱۱    | ۱/۲۰۴۷۲۲    | ۱/۲۰۴۷۲۲    | ۱/۲۰۴۷۲۲    | Kg/m <sup>3</sup> |
| $V_2$         | ۶/۵۳۹۴۸۴    | ۶/۵۳۰۹۹۱    | ۶/۵۳۰۹۳۱    | ۶/۵۳۰۹۳۱    | ۶/۵۳۰۹۳۱    | m/s               |

ب- محاسبه دومین معادله طبق رابطه ۳۵

$$F_{12} = \frac{A_9}{\rho_{d2}^2} + \frac{A_{10}}{\rho_{d2}} + A_{11}$$

$$\int Vdp = \left( \frac{A_{12}}{\rho_{d2}^2} + A_{13} \right) \times \left( \frac{\text{Ln} \left( \frac{A_{14}}{\rho_{d2}} + A_{15} \rho_{d2} \right)}{\text{Ln} \left( \frac{A_{14}}{\rho_{d2}} + A_{15} \rho_{d2} \right) - \text{Ln} (A_{16} \rho_{d2})} \right)$$

$$-\Delta_{ep}^* - \Delta_{ek}^* + W_{12} - (\int Vdp + F_{12}) = 0 \rightarrow \quad (36)$$

$$F(\rho_{d2}) = \frac{A_1}{\rho_{d2}^2} + A_2 - \left( \frac{A_9}{\rho_{d2}^2} + \frac{A_{10}}{\rho_{d2}} + A_{11} \right) - \left( \frac{A_{12}}{\rho_{d2}^2} + A_{13} \right) \times \left( \frac{\text{Ln} \left( \frac{A_{14}}{\rho_{d2}} + A_{15} \rho_{d2} \right)}{\text{Ln} \left( \frac{A_{14}}{\rho_{d2}} + A_{15} \rho_{d2} \right) - \text{Ln} (A_{16} \rho_{d2})} \right)$$

در مرحله دوم از روش محاسبات عددی نیازمند مشتق از رابطه ۳۶ است که در رابطه ۳۷ نمایش یافته است. با توجه به رابطه ۳۷ مشتق آن از یک رابطه حجمی برخوردار می‌شود.

$$F'(\rho_{d2}) = \left[ \frac{A_1}{\rho_{d2}^2} + A_2 - \left( \frac{A_9}{\rho_{d2}^2} + \frac{A_{10}}{\rho_{d2}} + A_{11} \right) - \left( \frac{A_{12}}{\rho_{d2}^2} + A_{13} \right) \times \left( \frac{\text{Ln} \left( \frac{A_{14}}{\rho_{d2}} + A_{15} \rho_{d2} \right)}{\text{Ln} \left( \frac{A_{14}}{\rho_{d2}} + A_{15} \rho_{d2} \right) - \text{Ln} (A_{16} \rho_{d2})} \right) \right] \quad (37)$$

در مرحله سوم از محاسبات عددی حل رابطه نیوتن-رافسون است که در رابطه ۳۸ نمایش داده می‌شود:

$$\rho'_{d2} = \rho_{d2} - \frac{F(\rho_{d2})}{F'(\rho_{d2})} \quad (38)$$

با توجه به روابط ۳۶ و ۳۷، رابطه ۳۸ پرحجم خواهد شد به دلیل حجم بودن رابطه ۳۸ حل این گونه مسایل در طراحی تهویه معادن به صورت دستی بسیار وقت‌گیر و پر خطاست. در این صورت دو راه حل وجود دارد یا از نرم‌افزارهای محاسبات عددی استفاده شود که نتیجه آن به شرح زیر خواهد شد یا روش‌های ابتکاری با عملکرد ساده‌تر ابداع شود.

$$t_{d2} = 39.054602 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_{d2} = 1.196411 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$V_2 = 6.504998 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$F_{12} = 607.949890$$

$$P_2 = 108503.8627 \text{ Pa}$$

$$-\Delta_{ep}^* - \Delta_{ek}^* + W_{12} = \int Vdp + F_{12} \quad (35)$$

$$\int Vdp = \left( \frac{P_2}{\rho_{d2}} - \frac{P_1}{\rho_{d1}} \right) \frac{k}{k-1}$$

$$-\Delta_{ep}^* - \Delta_{ek}^* + W_{12} = 9876.696027 - \left( \frac{7.782651}{\rho_{d2}} \right)^2 - 72$$

$$\times 0.503571$$

$$k = \frac{\text{Ln} \left( \frac{P_2}{P_1} \right)}{\text{Ln} \left( \frac{\rho_{d2}}{\rho_{d1}} \right)} = \frac{\text{Ln} \left( \frac{P_2}{97805.639} \right)}{\text{Ln} \left( \frac{\rho_{d2}}{1.111807} \right)}$$

$$\int Vdp + F_{12} = 13.333 \times \left( \frac{3.8913}{\rho_{d2}} + 3.5 \right)^2 + \left( \frac{P_2}{\rho_{d2}} - \frac{97805.639}{1.111807} \right) \times$$

$$\frac{\text{Ln} \left( \frac{P_2}{97805.639} \right)}{\text{Ln} \left( \frac{P_2}{97805.639} \right) - \text{Ln} \left( \frac{\rho_{d2}}{1.111807} \right)}$$

$$P_2 = P_{d2} + P_{v2}$$

پ- حل دو معادله و دو مجهول

در هر دو رابطه مربوط به قسمت‌های الف و ب، دو متغیر  $pd_2$  و  $td_2$  وجود دارد که روابط غیرخطی را تشکیل می‌دهند. به طور معمول برای حل چنین روابطی از روش‌های محاسبات عددی همچون نیوتن-رافسون، نصف کردن، مکان اشتباه، تکرار ساده، سکانت و مولر می‌توان استفاده کرد.

یکی از روش‌های رایج در محاسبات عددی استفاده از روش نیوتن-رافسون است که برپایه مشتق استوار است. حل این دو رابطه غیرخطی بر اساس روش مطرح شده نیازمند سه مرحله است.

در مرحله اول از روش‌های محاسبات عددی لازم است روابط ساده شده و در نهایت تبدیل به یک رابطه شود. بر این اساس لازم است، رابطه ۳۴ ساده شده تا رابطه  $td_2$  بر اساس  $pd_2$  حاصل شود. سپس آن را در رابطه  $P_2$  قرار داده و سرانجام رابطه ۳۵ هم بر اساس  $pd_2$  ساده می‌شود. بنابراین تنها متغیر مجهول در رابطه ساده شده نهایی متغیر  $pd_2$  است که تشکیل یک رابطه غیرخطی حجمی می‌شود که مطابق رابطه ۳۶ خواهد شد. مراحل یافتن این رابطه به شرح زیر بیان می‌شود:

$$-\Delta_{ep}^* - \Delta_{ek}^* + W_{12} = \frac{A_1}{\rho_{d2}^2} + A_2$$

$$h_{12}^* - q_{12} = A_3 t_{d2} + A_4$$

$$-\Delta_{ep}^* - \Delta_{ek}^* + W_{12} - (h_{12}^* - q_{12}) = 0 \rightarrow t_{d2} = \frac{A_5}{\rho_{d2}^2} + A_6$$

$$P_2 = P_{d2} + P_{v2} = \frac{A_7}{\rho_{d2}} + A_8 \rho_{d2}$$

### ۳- بهبود روش تحلیل هوای مرطوب تراکم‌پذیر

به طور معمول برای طراحی تهویه در معادن از دیدگاه تحلیل سیال تراکم‌پذیر برای هوای مرطوب نیاز به حل دو رابطه غیرخطی است. برای حل این دو رابطه نیاز است از روش‌های محاسبات عددی همچون روش رایج نیوتن-رافسون استفاده شود. با توجه به روابط ۳۶، ۳۷ و حجمیم بودن محاسبات، لازم است برای کاهش زمان محاسبات به همراه افزایش دقت در حین انجام محاسبات، روش‌های ساده‌تری ابداع شود. بر این اساس در این مقاله برای بهبود روش تحلیل سیال تراکم‌پذیر برای هوای مرطوب دو روش  $\Delta$  و  $K$  ارایه می‌شود. این دو روش بر پایه مشخص بودن مقادیر رطوبت‌های ورودی و خروجی از حفاری استوار است.

#### ۳-۱- روش دلتا ( $\Delta$ )

روش دلتا از سه مرحله تشکیل شده که مراحل حل این روش به شرح زیر بیان می‌شود:

##### الف- فرضیات اولیه

برای حل روابط مطرح شده نیاز به یکسری فرضیاتی است که در روابط ۳۹ تا ۴۱ ارایه شده است.

$$V_2 = 1.1V_1 \quad (39)$$

$$t_{d2} = 1.1t_{d1} \quad (40)$$

$$\rho_{d2} = 1.1\rho_{d1} \quad (41)$$

##### ب- محاسبات اصلی

در این مرحله از ۱۰ رابطه استفاده شده که به شرح زیر بیان می‌شوند:

$$\Delta_{ep}^* = g(Z_2 - Z_1)\left(1 + \frac{w_2 + w_1}{2}\right) \quad (42)$$

$$\Delta_{ek}^* = \frac{1}{2}(V_2^2 - V_1^2)\left(1 + \frac{w_2 + w_1}{2}\right) \quad (43)$$

$$c = w_2 h_{v2} - w_1 h_{v1} - (w_2 - w_1) \overline{h_w} \quad (44)$$

$$t_{d2} = t_{d1} + \frac{q_{12} - c - \Delta_{ep}^* - \Delta_{ek}^* + W_{12}}{c_p} \quad (45)$$

$$F_{12} = \frac{f}{8} \frac{LP}{S} (V_2 + V_1)^2 \quad (46)$$

$$P_2 = (R_d + R_v w_2) T_{d2} \rho_{d2} \quad (47)$$

$$k = \frac{\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)}{\ln\left(\frac{\rho_{d2}}{\rho_{d1}}\right)} \quad (48)$$

$$\Delta = \left(\frac{P_2}{\rho_{d2}} - \frac{P_1}{\rho_{d1}}\right) \frac{k}{k-1} + F_{12} + \Delta_{ep}^* + \Delta_{ek}^* - W_{12} \quad (49)$$

$$\rho'_{d2} = \rho_{d2} - \Delta \times 10^{-5} \quad (50)$$

$$V'_2 = \frac{V_1 S_1 \rho_{d1}}{S_2 \rho'_{d2}} \quad (48)$$

پ- تعداد تکرار محاسبات

اگر مقدار دلتا در رابطه ۴۶، کوچک‌تر یا مساوی مقدار دقت محاسبات باشد در این صورت حل مجدد ۱۰ رابطه فوق متوقف شده و پایان عملیات انجام محاسبات اعلام می‌شود.

#### ۳-۲- روش کا ( $K$ )

روش کا برای همگرایی سریع‌تر به جواب نهایی نسبت به روش دلتا ارایه شد. این روش از سه مرحله تشکیل شده که مراحل حل این روش به شرح زیر بیان می‌شود:

##### الف- فرضیات اولیه

برای حل روابط مطرح شده نیاز به یکسری فرضیاتی است که به شرح زیر بیان می‌شود:

$$V_2 = 1.1V_1$$

$$t_{d2} = 1.1t_{d1}$$

$$\rho_{d2} = 1.1\rho_{d1}$$

$$P_2 = 1.1P_1 \quad (49)$$

##### ب- محاسبات اصلی

در این مرحله از ۱۰ رابطه استفاده شده که به شرح زیر بیان می‌شوند:

$$\Delta_{ep}^* = g(Z_2 - Z_1)\left(1 + \frac{w_2 + w_1}{2}\right)$$

$$\Delta_{ek}^* = \frac{1}{2}(V_2^2 - V_1^2)\left(1 + \frac{w_2 + w_1}{2}\right)$$

$$c = w_2 h_{v2} - w_1 h_{v1} - (w_2 - w_1) \overline{h_w}$$

$$t_{d2} = t_{d1} + \frac{q_{12} - c - \Delta_{ep}^* - \Delta_{ek}^* + W_{12}}{c_p}$$

$$V_2 = \frac{V_1 S_1 \rho_{d1}}{S_2 \rho_{d2}}$$

$$F_{12} = \frac{f}{8} \frac{LP}{S} (V_2 + V_1)^2 \quad (50)$$

$$K = \frac{F_{12} + \Delta_{ep}^* + \Delta_{ek}^* - W_{12}}{F_{12} + \Delta_{ep}^* + \Delta_{ek}^* - W_{12} + R_d(t_{d2} - t_{d1}) + R_v(w_2 T_{d2} - w_1 T_{d1})} \quad (51)$$

$$\rho'_{d2} = \rho_{d1} \left[ \frac{(R_d + R_v w_2) T_{d2}}{(R_d + R_v w_1) T_{d1}} \right]^{\frac{1}{K-1}} \quad (52)$$

$$P'_2 = P_1 \left( \frac{\rho'_{d2}}{\rho_{d1}} \right)^K \quad (53)$$

$$V'_2 = \frac{V_1 S_1 \rho_{d1}}{S_2 \rho'_{d2}}$$

$$\Delta = \left| P'_2 - P_2 \right| \quad (54)$$

پ- تعداد تکرار محاسبات

$$F_{12} = \frac{f}{8} \frac{LP}{S} (V_2 + V_1)^2 = 720.299960 \frac{J}{kg}$$

$$P_2 = (R_v w_2 + R_d) T_{d2} \rho_{d2} = 110937.208 \text{ 670 Pa}$$

$$k = \frac{\ln\left(\frac{P_2/P_1}{\rho_{d2}/\rho_{d1}}\right)}{\ln\left(\frac{\rho_{d2}}{\rho_{d1}}\right)} = 1.321812$$

$$\Delta = \left(\frac{P_2}{\rho_{d2}} - \frac{P_1}{\rho_{d1}}\right) \frac{k}{k-1} + F_{12} + \Delta_{ep}^* + \Delta_{ek}^* - W_{12} = 2103.139720$$

$$\rho'_{d2} = \rho_{d2} - \Delta \times 10^{-5} = 1.201957 \frac{kg}{m^3}$$

$$V'_2 = \frac{V_1 S_1 \rho_{d1}}{S_2 \rho'_{d2}} = 6.474985 \frac{m}{s}$$

۴-۲- بررسی روش  $K$  کا

مرحله اول نتایج روش  $K$  در تحلیل سیال تراکم‌پذیر برای هوای مرطوب به شرح زیر و نتایج سایر مراحل آن در جدول ۳ گزارش شده است. طبق جدول ۳ تعداد تکرار محاسبات با فرض ۰/۰۰۱ دقت انجام محاسبات برابر ۵ تکرار می‌شود. بنابراین در روش  $K$  بدون استفاده از مشتق و ترکیب روابط با هم توانسته است با حل روابط ساده‌تر و تکرار آن به جواب نهایی صحیح برسد زیرا طبق جدول ۳ فشار نهایی هوا در انتهای حفاری برابر تکرار پنجم ردیف فشار یعنی معادل ۱۰۸۵۰۳/۸۶۳ پاسکال است. چون در این مدل فرضی، انتهای حفاری پایین‌تر از سطح آب‌های آزاد است، بنابراین فشار اتمسفر باید بیش از ۱۰۱۳۲۵ پاسکال باشد که نتایج نهایی حاصل از این بخش آن را تایید می‌کند. همچنین این روش در این مدل قادر است تعداد تکرار محاسبات را ۵۸ درصد کاهش دهد.

الف- اولین تکرار محاسبات

$$V_2 = 7.7 \frac{m}{s}$$

$$t_{d2} = 33 \text{ } ^{\circ}c$$

$$\rho_{d2} = 1.222988 \frac{kg}{m^3}$$

$$\Delta_{ep}^* = -9876.696027 \frac{J}{kg}$$

$$\Delta_{ek}^* = 5.181749 \frac{J}{kg}$$

$$w_1 = 0.00681771 \frac{kg}{kg}$$

$$w_2 = 0.00746771 \frac{kg}{kg}$$

$$c = 1615.499649 \frac{J}{kg}$$

$$q_{12} = 908.885 \frac{J}{kg}$$

$$W_{12} = 0$$

$$t_{d2} = 39.119303 \text{ } ^{\circ}c$$

$$F_{12} = 720.299960 \frac{J}{kg}$$

$$K = \frac{F_{12} + \Delta_{ep}^* + \Delta_{ek}^* - W_{12}}{F_{12} + \Delta_{ep}^* + \Delta_{ek}^* - W_{12} + R_d(t_{d2} - t_{d1}) + R_v(w_2 T_{d2} - w_1 T_{d1})}$$

$$K = 1.427370$$

$$\rho'_{d2} = \rho_{d1} \left[ \frac{(R_d + R_v w_2) T_{d2}}{(R_d + R_v w_1) T_{d1}} \right]^{\frac{1}{k-1}} = 1.194532 \frac{kg}{m^3}$$

$$P'_2 = P_1 \left(\frac{\rho'_{d2}}{\rho_{d1}}\right)^K = 108355.94 \text{ 831 Pa}$$

اگر مقدار دلتا در رابطه ۵۳، کوچک‌تر یا مساوی مقدار دقت محاسبات باشد در این صورت حل مجدد ۱۰ معادله فوق متوقف شده و پایان عملیات انجام محاسبات اعلام می‌شود.

۴-۲- بررسی روش دلتا  $(\Delta)$  و  $K$

بررسی روش‌های جدید برای تسهیل حل روابط ترمودینامیکی در طراحی تهویه معادن از دیدگاه تحلیل سیال تراکم‌پذیر برای هوای مرطوب از مثال مطرح شده در بخش ۲ استفاده می‌شود. بر این اساس نتایج به شرح زیر بیان می‌شوند:

۴-۱- بررسی روش دلتا  $(\Delta)$

مرحله اول نتایج روش دلتا  $(\Delta)$  در تحلیل سیال تراکم‌پذیر برای هوای مرطوب به شرح زیر و نتایج سایر مراحل آن در جدول ۲ گزارش شده است. طبق جدول ۲ تعداد تکرار محاسبات با فرض ۰/۰۰۱ دقت انجام محاسبات برابر ۱۲ تکرار می‌شود. بنابراین در روش دلتا بدون استفاده از مشتق و ترکیب روابط با هم توانسته است با حل روابط ساده‌تر و تکرار آن به جواب نهایی صحیح برسد زیرا طبق جدول ۲ فشار نهایی هوا در انتهای حفاری برابر تکرار دوازدهم ردیف فشار یعنی معادل ۱۰۸۵۰۳/۸۶۶ پاسکال است. چون در این مدل فرضی، انتهای حفاری پایین‌تر از سطح آب‌های آزاد است، بنابراین فشار اتمسفر باید بیش از ۱۰۱۳۲۵ پاسکال باشد که نتایج نهایی حاصل از این بخش آن را تایید می‌کند.

الف- اولین تکرار محاسبات

$$V_2 = 1.1 V_1 = 7.7 \frac{m}{s}$$

$$t_{d2} = 1.1 t_{d1} = 33 \text{ } ^{\circ}c$$

$$\rho_{d2} = 1.1 \rho_{d1} = 1.222988 \frac{kg}{m^3}$$

$$\Delta_{ep}^* = g(Z_2 - Z_1) \left(1 + \frac{w_2 + w_1}{2}\right) = 9.80665 \times -1000 \times 0.503571$$

$$\Delta_{ep}^* = -9876.696027 \frac{J}{kg}$$

$$\Delta_{ek}^* = \frac{1}{2} (V_2^2 - V_1^2) \left(1 + \frac{w_2 + w_1}{2}\right) = \frac{1}{2} \times 10.29 \times 0.503571$$

$$\Delta_{ek}^* = 5.181749 \frac{J}{kg}$$

$$w_1 = 0.00681771 \frac{kg}{kg}$$

$$w_2 = 0.00746771 \frac{kg}{kg}$$

$$c = w_2 h_{v2} - w_1 h_{v1} - (w_2 - w_1) \overline{h_w} = 1615.499649 \frac{J}{kg}$$

$$q_{12} = 908.885 \frac{J}{kg} \quad W_{12} = 0$$

$$t_{d2} = t_{d1} + \frac{q_{12} - c - \Delta_{ep}^* - \Delta_{ek}^* + W_{12}}{c_p} = 39.119303 \text{ } ^{\circ}c$$





$$1.92^* = c_{pa}(t_e - t_i) + \omega_e h_{ge} - \omega_i h_{gi} - (\omega_e - \omega_i)(h_{fe} + h_{fi})/2$$

$$+ \left(1 + \frac{\omega_e + \omega_i}{2}\right) g (Z_e - Z_i)$$

$$5.000 = 1.0045(t_e - 10) + 0.008 h_{ge} - 0.004 \times 2519.8 - 0.004$$

$$(h_{fe} + 42.01)/2 + 1.006 \times 9.80665 \times -3000 \times 10^{-3}$$

با حل معادله فوق با روش تقریب‌های متوالی خواهیم داشت:  $t_e = 34.51^\circ\text{C}$

$$P_{ai} = \frac{\omega_i P_i}{0.62186 + \omega_i} = \frac{0.004 \times 101.325}{0.62186 + 0.004} = 0.648 \text{ kPa}$$

$$v_{ai} = R_a T_i / (P_i - P_{ai}) = 0.287 \times 28315 / (101.325 - 0.648) = 0.80718 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$P_{te} = \omega_e R_v T_e / v_{ae} = 0.008 \times 0.46152 \times 307.66 / v_{ae}$$

$$P_{ae} = R_a T_e / v_{ae} = 0.287 \times 307.66 / v_{ae}$$

$$P_e = P_{ae} + P_{te}$$

$$n = \ln(P_e / P_i) / \ln(v_{ai} / v_{ae}) = \ln(P_e / 101.325) / \ln(0.80718 / v_{ae})$$

$$\frac{n(P_e v_{ae} - P_i v_{ai})}{1-n} = \Delta ke^* + \Delta pe^* + v_1 w_2^* + v_1 w_2^*$$

$$\Delta pe^* = -29.596 \text{ kJ/kg}^*$$

مقادیر متوالی  $v_{ae}$  بررسی می‌شوند که مقدار تأمین‌کننده شرایط برابر است با

$$v_{ae} = 0.62452 \text{ m}^3/\text{kg} \quad P_{ae} = 141.386 \text{ kPa}$$

$$P_{te} = 1.819 \text{ kPa} \quad P_e = P_2 = 143.205 \text{ kPa}$$

جدول ۴- نتایج اعتبارسنجی مراحل روش دلنا ( $\Delta$ ) در تحلیل هوای مرطوب تراکم‌پذیر

| شرح             | تکرار ۱     | تکرار ۲     | تکرار ۳     | تکرار ۷     | تکرار ۱۲    | تکرار ۱۷    | تکرار ۲۰    | تکرار ۲۳    |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $\Delta_{ek}^*$ | ۱۰،۵۶۳      | -۱۵،۹۹۸۴۸۲  | -۱۸،۴۱۶۱۵۱  | -۲۰،۱۱۸۷۵۶  | -۲۰،۱۹۵۲۱۶  | -۲۰،۱۹۶۸۸۹  | -۲۰،۱۹۶۹۲۲  | -۲۰،۱۹۶۹۲۶  |
| $\Delta_{ep}^*$ | -۲۹۵۹۶،۴۶۹۷ | -۲۹۵۹۶،۴۶۹۷ | -۲۹۵۹۶،۴۶۹۷ | -۲۹۵۹۶،۴۶۹۷ | -۲۹۵۹۶،۴۶۹۷ | -۲۹۵۹۶،۴۶۹۷ | -۲۹۵۹۶،۴۶۹۷ | -۲۹۵۹۶،۴۶۹۷ |
| $t_{d2}$        | ۳۴،۶۳۵۲     | ۳۴،۵۱۸۶۹۲   | ۳۴،۵۲۱۸۰۳   | ۳۴،۵۲۳۴۶۹   | ۳۴،۵۲۳۷۲۲   | ۳۴،۵۲۳۵۴۵   | ۳۴،۵۲۳۵۴۵   | ۳۴،۵۲۳۵۴۵   |
| $F_{12}$        | ۰،۰۰        | ۰،۰۰        | ۰،۰۰        | ۰،۰۰        | ۰،۰۰        | ۰،۰۰        | ۰،۰۰        | ۰،۰۰        |
| $P_2$           | ۱۲۱۹۲۸،۹۹۷  | ۱۳۴۱۷۶،۷۱۰  | ۱۳۹۱۷۲،۳۰۸  | ۱۴۳۰۴۴،۷۷۱  | ۱۴۳۲۲۶،۳۴۳  | ۱۴۳۲۳۰،۳۲۲  | ۱۴۳۲۳۰،۴۰۳  | ۱۴۳۲۳۰،۴۱۱  |
| $k$             | ۱،۹۴۲۱۴۰    | ۱،۴۶۷۱۵۳    | ۱،۳۹۲۳۰۴    | ۱،۳۵۰۱۷۶    | ۱،۳۴۸۴۴۷    | ۱،۳۴۸۴۰۹    | ۱،۳۴۸۴۰۸    | ۱،۳۴۸۴۰۸    |
| $\Delta$        | -۱۳۷۴۳،۹۹۸  | -۵۵۸۳،۲۷۵   | -۲۴۵۷،۶۵۶   | -۱۱۰،۹۰۱    | -۲،۴۲۹      | -۰،۰۵۳۳     | -۰،۰۰۵۴     | -۰،۰۰۰۵     |
| $\rho_{d2}$     | ۱،۵۰۰۰۳۴    | ۱،۵۵۵۸۶۶    | ۱،۵۸۰۴۴۳    | ۱،۶۰۰۲۵۹    | ۱،۶۰۱۲۰۳    | ۱،۶۰۱۲۲۴    | ۱،۶۰۱۲۲۵    | ۱،۶۰۱۲۲۵    |
| $V_2$           | ۸،۲۵۷۹۵۸    | ۷،۹۶۱۶۱۹    | ۷،۸۳۷۸۱۲    | ۷،۷۴۰۷۵۸    | ۷،۷۳۶۱۹۱    | ۷،۷۳۶۰۹۱    | ۷،۷۳۶۰۸۹    | ۷،۷۳۶۰۸۹    |

جدول ۵- نتایج اعتبارسنجی مراحل روش کا ( $K$ ) در تحلیل هوای مرطوب تراکم‌پذیر

| شرح             | تکرار ۱     | تکرار ۲     | تکرار ۳     | تکرار ۴     | واحد              |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|
| $\Delta_{ek}^*$ | ۱۰،۵۶۳      | -۲۰،۱۴۹۵۷۲  | -۲۰،۱۹۷۰۷۴  | -۲۰،۱۹۶۹۴۰  | J/kg              |
| $\Delta_{ep}^*$ | -۲۹۵۹۶،۴۶۹۷ | -۲۹۵۹۶،۴۶۹۷ | -۲۹۵۹۶،۴۶۹۷ | -۲۹۵۹۶،۴۶۹۷ | J/kg              |
| $t_{d2}$        | ۳۴،۶۳۵۲۵۰   | ۳۴،۵۲۲۸۲۲   | ۳۴،۵۲۳۵۵۰   | ۳۴،۵۲۳۵۴۵   | °C                |
| $F_{12}$        | ۰،۰۰        | ۰،۰۰        | ۰،۰۰        | ۰،۰۰        | J/kg              |
| $k$             | ۱،۳۵۰۸۹۶    | ۱،۳۴۸۳۹۵    | ۱،۳۴۸۴۰۷    | ۱،۳۴۸۴۰۷    | -                 |
| $\rho_{d2}$     | ۱،۵۹۹۹۶۷    | ۱،۶۰۱۲۲۹    | ۱،۶۰۱۲۲۵    | ۱،۶۰۱۲۲۵    | Kg/m <sup>3</sup> |
| $P_2$           | ۱۴۳۱۶۹،۸۰۷  | ۱۴۳۲۳۰،۳۸۴  | ۱۴۳۲۳۰،۴۰۴  | ۱۴۳۲۳۰،۴۰۴  | Pa                |
| $V_2$           | ۷،۷۴۲۱۷۱    | ۷،۷۳۶۰۷۰    | ۷،۷۳۶۰۸۷    | ۷،۷۳۶۰۸۷    | m/s               |
| $\Delta$        | ۳۱۷۱۲،۳۰۷   | ۶۰،۵۷۷      | ۰،۰۲        | ۰،۰۰۰۱۵     | -                 |

## ۶- نتیجه گیری

## منابع

۱. صمدزادگان، رحمان؛ ۱۳۸۹؛ "مهندسی تهویه معادن"، انتشارات نوپردازان، تهران.
۲. الهی، ابراهیم؛ ۱۳۹۳؛ "اصول طراحی تهویه در معادن"، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیر کبیر.
۳. مدنی، حسن؛ ۱۳۸۲؛ "تهویه در معادن"، جلد دوم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
4. Hall, C.J.; 1998; "*Mine Ventilation Engineering*". S.M.F., INC.
5. Li, J.; Yang, L.; Song, T.; and Qi, R; 2019; "*Research on the Effects of the High Temperature and Humidity Environment on Human Comfort in Coal Mine Emergency Refuge System*". Safety, 5(28), 1-10. DOI: 10.3390/safety5020028.
6. McPherson., Malcolm.J; 1993; "*Subsurface Ventilation and Environmental Engineering*", Champan & Hall.
7. Roghanchi, P.; 2017; "*Managing and Controlling the Thermal Environment in Underground Metal Mines*", Ph.D thesis, University of Nevada, Reno.
8. Tong, X.; Guo, W.; Kang, K.; and Qin, Y.; 2017; "*Experimental evaluation of heat and moisture transmission characteristics of the working ensemble of hot coal mines using the thermal manikin*", International Journal of Heat and Technology, 35(4), 836-842. DOI: 10.18280/jiht.350420.
9. Wu, J.; Fu, M.; Tong, X.; and Qin, Y.; 2017; "*Heat stress evaluation at the working face in hot coal mines using an improved thermo physiological model*", International Journal of Heat and Technology, 35(1), 67-74. DOI: 10.18280/jiht.350109.

یکی از روش‌های طراحی تهویه در معادن استفاده از روش تحلیل سیالاتی است. در این روش، سیال هوا در علم تهویه در دو مدل تراکم‌ناپذیری و تراکم‌پذیری مورد تحلیل قرار می‌گیرد. همچنین طراحی تهویه براساس تحلیل سیال تراکم‌پذیری در دو مدل تحلیل ترمودینامیکی هوای خشک و مرطوب مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج حاصل شده از روش‌های تحلیل ترمودینامیکی در بخش ۲ بیانگر این مطلب است که تحلیل هوای خشک در دو مدل تراکم‌ناپذیری و تراکم‌پذیری با توجه به روش‌های رایج به سادگی انجام می‌شود.

تحلیل هوای مرطوب در طراحی تهویه معادن بر اساس علم ترمودینامیکی نیازمند استفاده از روش‌های محاسبات عددی است برای حل دو رابطه غیرخطی است. یکی از روش‌های رایج در محاسبات عددی استفاده از روش نیوتن-رافسون است. با توجه به روش نیوتن-رافسون و حجیم بودن روابط ۳۶ و ۳۷ سبب می‌شود حل روش یاد شده وقت‌گیر و پرخطا شود. بر این اساس در این مقاله دو روش  $\Delta$  و  $K$  برای سهولت تحلیل سیال تراکم‌پذیر هوای مرطوب در بخش ۳ ارائه شد. شرط استفاده از این دو روش مشخص بودن مقدار آهنگ تبخیر در طول حفاری است. نام‌گذاری روش دلتا بر اساس تعریف روابط ۴۶ و ۴۷ و روش  $K$  بر اساس تعریف روابط ۵۰ و ۵۱ است. نتایج حاصل از بخش ۴ بیانگر این مطلب است که هر دو روش دلتا ( $\Delta$ ) و  $K$  بدون استفاده از مشتق و ترکیب روابط با هم توانسته‌اند با حل روابط ساده‌تر و تکرار آن به جواب نهایی صحیح برسند. بنابراین این دو روش مطرح شده توانسته‌اند تحلیل ترمودینامیکی هوای مرطوب تراکم‌پذیر را در طراحی تهویه معادن به صورت ساده‌تری نسبت به روش نیوتن-رافسون مطرح شده در محاسبات عددی انجام دهند. همچنین نتایج حاصل در بخش ۴ نشان می‌دهد که روش  $K$  قادر به یافتن جواب نهایی با تعداد تکرار محاسبات کمتر نسبت به روش دلتا ( $\Delta$ ) است به عبارت دیگر این روش توانسته است در این مدل، تعداد تکرار محاسبات ریاضی را تا ۵۸ درصد کاهش دهد.

نتیجه اعتبارسنجی در بخش ۵ بیانگر این مطلب است که روش‌های دلتا و  $K$  نتایج یکسانی را نسبت به روش حل قدیمی تحلیل رطوبت ارائه می‌دهد و همچنین ابهامات روش حل قدیمی در استفاده از روش‌های محاسبات عددی را برطرف می‌کند. همچنین نتایج حاصل از بخش ۵ بیانگر این مطلب است که روش  $K$  نسبت به روش دلتا توانسته است تعداد تکرار محاسبات ریاضی را تا ۷۹ درصد کاهش دهد.