

معايرة درجة حرارة البيتون القصوى في
الكتل الإنشائية أثناء تفاعلات التسخين
الإيكزوترمي

المهندس مازن خير بك
معهد نوفوسيبيرسك
للهندسة المدنية

د. زوبكوف إيفانوفيتش
معهد نوفوسيبيرسك
للهندسة المدنية

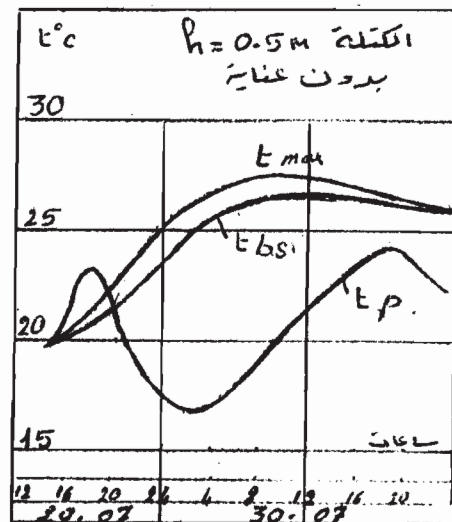
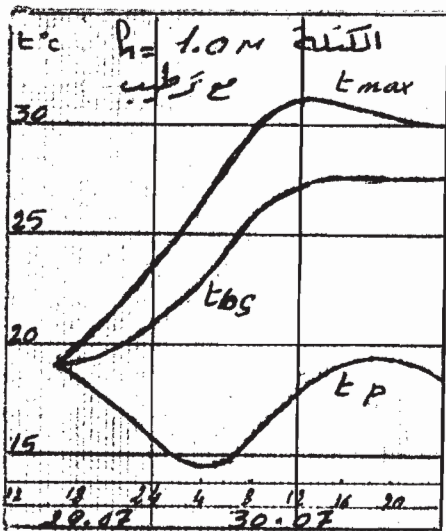
يتطلب بناء المنشآت المائية في المناطق الحارة تكنولوجيا خاصة لتلافي ما قد
ينجم من أضرار بسبب التفاوت في درجات الحرارة في الكتل البيتونية .
يتناول هذا البحث عملية تفاعلات الطرد الإيكزوترمي أثناء تصلب البيتون
وعلاقتها بارتفاع الكتل البيتونية مع اقتراح علاقة نصف تجريبية لتحديد
درجة حرارة الطرد الإيكزوترمي كما يتناول هذا البحث اقتراح حل رياضي للمعادلة
الحرارية لمجموعة مؤلفة من شريحة غير محددة موضوعة على أساس (تربة ، بيتون
... الخ) نصف محدد .

ولقد طبقت طريقة الصب الطبقي هذه
في بناء دعامة سد أنديجان كما قمنا
بأبحاث عملية على أرض الواقع لوضع أسس
حساب الشروط التقنية .
وهكذا فقد تم على حقلين تجريبيين
أحدهما مغطى بشادر والآخر معرض لأشعة
الشمس المباشرة ، صب 12 كتلة بيتونية
ارتفاعاتها على التوالي 0,5M, 0,75, 1,0M
في قالب مدفاً وذلك لتأمين
حقل حراري متجانس . في كل مجموعة
مؤلفة من ثلاثة مكعبات ذات ارتفاع
موحد أجريت تجارب لاختبار تأثير طريقة
العناية بالسطح البيتوني على النظام
الحراري للكتلة البيتونية : سقاية ، ترطيب
وبدون عناية .
إن ارتفاع درجة الحرارة في الكتلة
البيتونية خلال تفاعلات الطرد الحراري

يتطلب بناء المنشآت المائية الحديثة
والسدود خاصة في المناطق الحارة وذات المناخ
القاري الشديد شروطاً صارمة وذلك فيما
يتعلق بجودة البيتون . لذلك ولأجل
تلافي ظاهرة تشكل الشقوق والشروخ الخطرة
وتأمين سلامة صب البيتون تحدد درجة
حرارة البيتون القصوى في مرحلة التسخين
الإيكزوترمي وهي تحدد اعتماداً على
حسابات تتعلق بالوضع الحرارية
للمنشآت البيتونية والتي تختلف من كتلة
لأخرى .
لقد توجهت العناية في السنوات العشر
للأخيرة إلى طريقة المقاطع في صب الكتل
البيتونية للمنشآت المائية (السدود خاصة)
وذلك على مراحل مع المراقبة الشديدة
لسطح البيتون في كل مرحلة (سـ
توكتوغول ، أنديجان وسدود أخرى) .

والمغطاة بشواذر .
 تبين على هذه المخططات درجة الحرارة في أساس الكتلة وعلى السطح وفي نواة التسخين ، منذ لحظة الصب حتى بلوغ ذروة التسخين الحراري .

الإيكزوترمي يتعلق بنوع وكمية الاسمنت ، درجة حرارة الأساسات التي يصب عليها البيتون ، درجة حرارة الهواء المحيط ، طريقة المراقبة والعناية بسطح البيتون (سقاية ، ترطيب ، تغطية زه ، تقييم) ، وقد أوردنا على سبيل المثال في الشكل 1 مخططات بيانية لدرجات الحرارة في الكتل ذات الارتفاع 0.5 ، 1.0 M



الشكل ١ : التسخين الإيكزوترمي في العينات البيتونية المغطاة ، ذات الارتفاع

العظمى t_{max} بفعل التسخين الإيكزوترمي في العينة البيتونية وهي من الشكل :

ولقد تم الحصول بعد تحليل وتعميم المعطيات التجريبية على علاقة نصف تجريبية لتحديد درجة الحرارة

$$t_{max} = \left(t_0 + \frac{q \cdot m_c}{C} \right) 1-A \left[1 - \frac{t_A - t_{bs}}{2 \left(t_0 + \frac{q \cdot m_c}{C \cdot p} \right)} \right] I$$

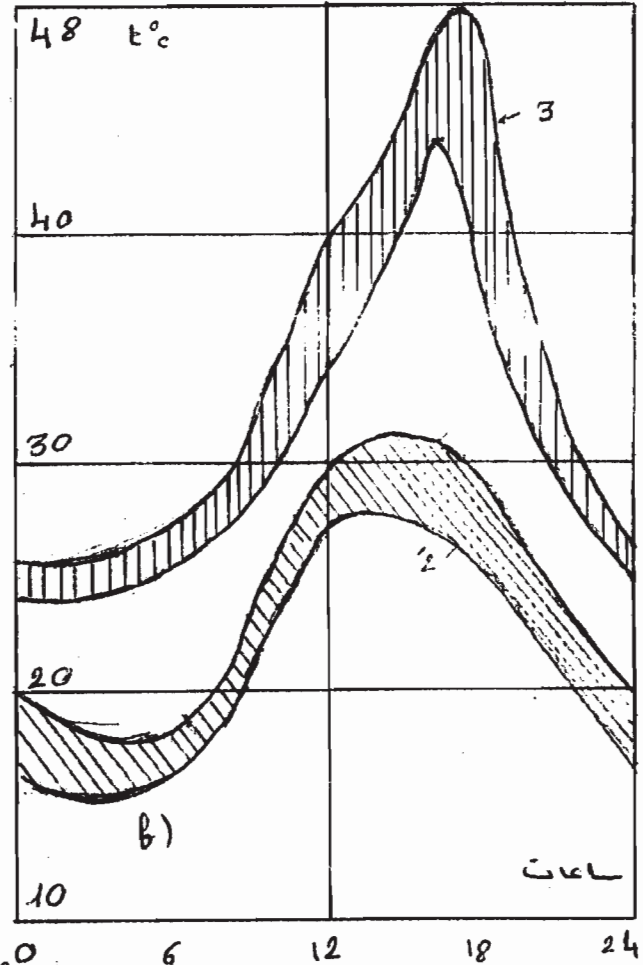
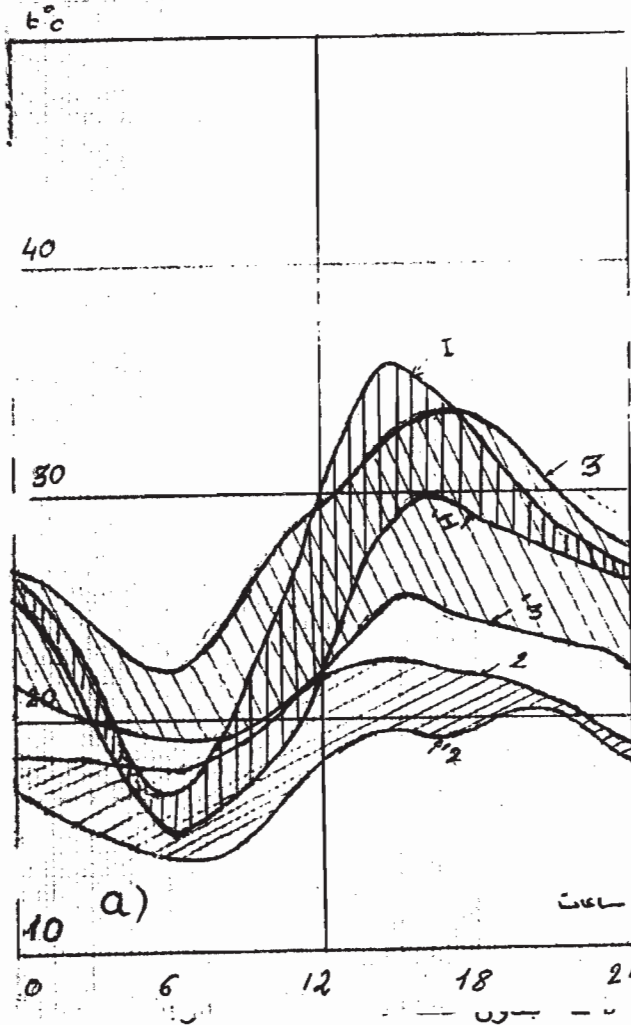
حيث :

تعكس هذه العلاقة بشكل عام أثر العوامل الرئيسية على التسخين الإيكزوترمي ويلاحظ أن درجة حرارة السطح في الكتل البيتونية ذات الارتفاع القليل تلعب دوراً أساسياً وفعالاً في شدة التسخين الإيكزوترمي وما يليه من تبرد في الكتلة ، مع الأخذ بعين الاعتبار شكل وطريقة العناية بهذا السطح البيتوني .
وتبين في الشكل 2 جميع النتائج المتعلقة بمراقبة درجة حرارة سطح الكتل البيتونية تحت الشادر وغيرالمغطاة وذلك لكل أشكال العناية .

t_0 - درجة حرارة الخليط البيتوني .
 t_{bs}, t_p - درجة حرارة سطح أو أساس الكتلة .

q, mc - كمية الاسمنت المستعملة والنشر الحراري النوعي هذا الاسمنت .
 p, C - السعة الحرارية وكثافة البيتون .
 A - عامل تجريبي يتعلق بارتفاع الكتلة .

($h = 0,5M - A = 2,25$; $h = 0,75 - A = 1,8$;
 $h = 1,0 M - A = 13$)



a - تحت الغطاء ،
- - - - - برن ،
— — — — — درجة حرارة السطح 2,2 ،
درجة حرارة السطح دون عناية 3,3 ،
حرارة الهواء ،

لقد تمت المراقبة خلال مدة ١٠ أيام بعد صب هذه الكتل ، ارتفعت خلالها درجة الحرارة نهائياً حتى $36^{\circ}\text{C} - 30$ وانخفضت ليلاً حتى $17^{\circ}\text{C} - 15$ كما بلغت شدة الاشعاع الشمسي :

$$700-800\text{K.Cal/M/h}$$

إن نتائج مراقبة درجة الحرارة هذه والتي تمت بانتظام وبخطوة قدرها يوم واحد ، تسمح لنا بتقدير فعالية الغطاء ونوعية العناية بالسطح البيتوني .

لقد ارتفعت درجة حرارة الكتل البيتونية المصبوبة على حقل مكشوف والتي لم تتم العناية بها حتى $48^{\circ}\text{C} - 44$ كما بلغت فوق سطح مرطب $31^{\circ}\text{C} - 29$

أي أقل من درجة حرارة الهواء المحيط . أما في الكتل المحمية بغطاء فقد بلغت درجة الحرارة بدون عناية نهائياً $34^{\circ}\text{C} - 27$ أي أقل بـ $17^{\circ}\text{C} - 14$

مما لو كان الحقل مكشوفاً ، بينما لم تتعد في حالة الترطيب $24^{\circ}\text{C} - 19$.

خلال فترة الليل كانت درجة حرارة السطح بدون عناية أعلى من درجة حرارة الهواء بـ $5^{\circ}\text{C} - 4$ في حالة التغطية وبـ $9^{\circ}\text{C} - 8$ بدون غطاء ، أما على السطوح المرطبة فهي إما مساوية أو حتى أقل من درجة حرارة الهواء .

نستخلص مما سبق أن حماية السطوح البيتونية بالتغطية تسمح بتخفيض درجة حرارتها حتى $17^{\circ}\text{C} - 14$ وذلك في الكتل غير الخاضعة للعناية وحتى $25^{\circ}\text{C} - 24$ في حالة الترطيب

وبالمقارنة مع الكتل غير المغطاة وغير الخاضعة للعناية .

وتعد أكثر الطرق فاعلية فسي معايرة النظام الحراري للسطوح البيتونية هي السقاية بالمياه ، في هذه الحالة تحدد درجة حرارة السطح البيتوني بالعلاقة مع درجة حرارة المياه المستعملة وشدة السقاية .

إن التقييد الذي تفرضه المعطيات التجريبية (نسبياً) لم يسمح بالحصول على نتائج عن فاعلية العناية بالسطح البيتوني بالعلاقة مع مختلف العوامل المؤثرة وتغيراتها الواسعة . لذلك ولأجل هذا الهدف استعملت طرق تحليلية ووضع ما يسمى بالتجربة العددية .

لنتصور كتلة بيتونية على شكل شريحة غير محددة موضوعة على أساس نصف محدد (شكل ٣) . إن حل المعادلة الحرارية لهذه المجموعة مع الأخذ بعين الاعتبار النشر الحراري للبيتون وتأثير الأساس ضمن الشروط الحدية من الدرجة الثالثة على السطح يتم بطريقة التراكم (الانطباق) إضافة إلى استعمال الحلول الشهيرة في نظرية النقل الحراري . وبناءً عليه فإن حل المعادلة المنوه بها أعلاه يأخذ الشكل التالي :

$$T_x = (t_o - t_o) \left[1 - \operatorname{erfc} \frac{x}{2} + \exp(Hx + H^2) \right] * \quad (2)$$

$$* \operatorname{erfc} \left[\left(\frac{1}{\cos P} + H \right) \right] + (t_o - t_{bs}) \frac{P_o}{P} *$$

$$* \left[1 - \frac{\cos P \frac{B-x}{B}}{\cos P - \frac{1}{Bi} P \sin P} \right] * \exp(-P Fo) +$$

$$+ \sum_{n=1} \left(1 - \frac{P_o}{P - \mu_n^2} \right) A_n \cos \mu_n \frac{B-x}{B} \exp(-\mu_n^2 Fo) +$$

$$+ (t_o - t_{oc}) \left[1 - 0,5 \left(\operatorname{erf} \frac{x+B}{2B Fo} - \operatorname{erf} \frac{x-B}{2B Fo} \right) \right] +$$

$$+ \frac{qmc}{2C.P} \left[\theta_t(Fo_2) - \theta_t(Fo_1) \right];$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{B} + Ry} \quad H = \frac{1}{B} + Ry$$

$$B_t = \frac{\cos P \frac{B-x}{B}}{\cos P - \frac{1}{Bi} P \sin P} \exp(-P Fo) *$$

$$* \sum_{n=1} \frac{A_n}{1 - \frac{\mu_n^2}{P}} \cos \mu_n \frac{x}{B} \exp(-\mu_n^2 Fo);$$

$$Fo_1 = \frac{1}{(x+B)^2}; \quad Fo_2 = \frac{1}{(x-B)^2}$$

$$\operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-u^2} du$$

$$\operatorname{erfe}(u) = 1 - \operatorname{erf}(u)$$

حيث :

Bi , FO , P - على التوالي أعداد

بيو - فورية ، بريتسفاديتليف

A_n, μ_n - جذور المساواة والعوامل المحددة

في (2)

B, x - على التوالي الإحداثيات

ارتفاع الكتلة والزمن

- عامل النقل الحراري

B - عامل الإعطاء الحراري

R_y - المقاومة الحرارية للمسخن

K - عامل يتعلق بخواص الاسمنت

البيتون والمواد المضافة - يحدد

تجريبياً .

إذاً ومن خلال تحديد التسخين الأعظمي

عبر درجة الحرارة المسموحة t_q نحصل

من المعادلة (2) على المساواة الحسابية

الأولى . بتحديد زمن ومكان x_m

توضع (بالارتفاع) الحرارة الأعظمية

ونحصل على مساواتين إضافيتين ، وبهذا

نكون قد حصلنا على مجموعة المعادلات

الثلاث التالية :

$$t_x = t_q \quad \text{و} \quad \frac{t}{x} = 0 \quad \text{و} \quad \frac{t}{x} = 0 \quad (3)$$

والتي يمكن حلها من خلال وجود

مجاهيل . مجهولان منها هما x_m, m

أما الثالث فيتم اختياره من أحد

سنة قيم رئيسية مؤثرة على التسخين

الإيكزوترمي (t_0, t_b, t_c, B, w_0)

وهنا يبدو الحل الأبسط باختيار القيمة

t_0 أو $(t_c - t_0)$

إن تأثير درجة الحرارة على النشر

الحراري يمكن تحديده بمساعدة مساواة

راستروي الشهيرة والتي تكتب بالشكل

التالي :

$$K(t) = K_{20.2} \frac{tm - 20}{20} \quad (4)$$

حيث :

K_{20} - قيمة العامل K عند درجة

حرارة 20°C

- الفرق الحراري الذي يحدد بالعلاقة :

$$= 8 + 0,15 tep$$

t_m - الحرارة الوسطى على ارتفاع

الكتلة البيتونية خلال الفترة

الزمنية p للبيتون .

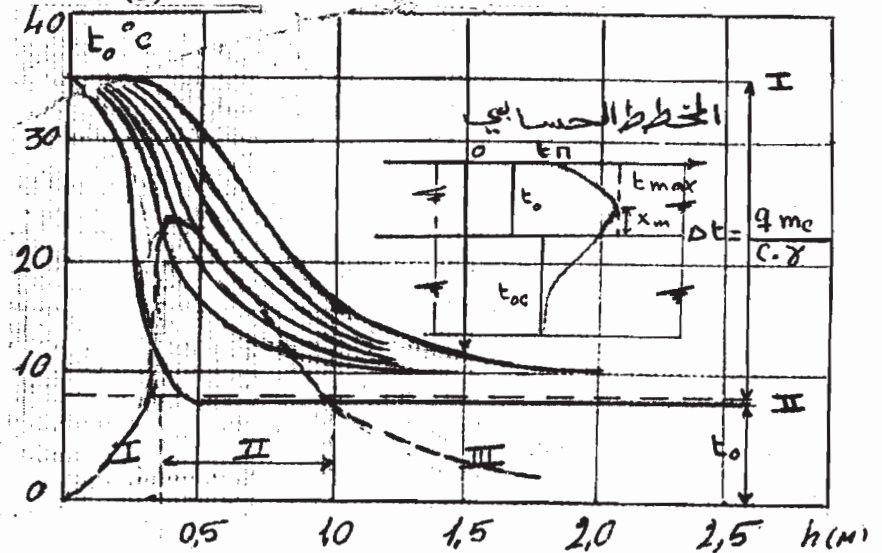
$$t_m = \frac{1}{\int_0^p t(x, t) dx} \quad (5)$$

o o

الشكل 3 : لتحديد العلاقة بين

حرارة t_0 ، t_p عند درجة

حرارة : $t_q = 35^\circ\text{C}$



مناطق محددة في مجال تغير الارتفاع الذي قمنا بدراسته :

- حالة ارتفاع العينة $B < 0,4$ (ارتفاع قليل) : درجة حرارة الذروة العظمى للتسخين الإيكزوترمي تتعلق بشكل أساسي بدرجة حرارة السطح في حين يكون أثر درجة حرارة الخليط البيتوني ضعيفاً جداً ويمكن تفسير ذلك أنه في حالة السماكات القليلة غالباً ما تفقد الظروف البدائية وبسرعة تأثيرها حيث لا يكفي التسخين الإيكزوترمي لتعويض ضياع الحرارة عن طريق السطح البيتوني .

II - حالة ارتفاع العينة $0,4 - 1,0M$ يتعلق هنا التسخين الإيكزوترمي بدرجة حرارة السطح كما يتعلق بدرجة حرارة الخليط البيتوني أثناء الصب . كما أن تأثير درجة حرارة السطح البيتوني يتناقص مع ازدياد ارتفاع العينة . هنا تلعب دوراً هاماً طريقة صيانة السطح في معايرة النظام الحراري للبيتون ، مثلاً سقاية السطح بالمقارنة مع التبريد العميق للخليط البيتوني قبل الصب .

III - حالة ارتفاع العينة الكبير $B > 1,5M$: درجة حرارة السطح البيتوني لا تؤثر على القيمة العظمى للتسخين الإيكزوترمي الذي يتم هنا ضمن شروط قريبة من النظام الأديباتي :

$$t_{\max} = \frac{.m_c}{C.}$$

$$t_o = (E_q - \frac{q.m_c}{C.})$$

إن حل مجموعة المعادلات (3) مع اعتبار تأثير درجة الحرارة على الانتشار الحراري في البيتون يتم بطريقة تنظيم حلقة تكرارية والتي يتم تدقيق قيمة $K(t)$ بالحساب الأسبق باستعمال العلاقة (4) و (5) عندها ولأجل التقريب الأول يمكن اعتبار $K = K_{20}$ لسقط تم باستعمال المعادلات المبينة أعلاه وضع الفوريتم ومن ثم برنامج حسابي على الحاسب الإلكتروني . يمكن شرح الحالة المبينة أعلاه باختصار وذلك بالشكل التالي :

تفترض درجة حرارة الذروة المسموحة بالتسخين الإيكزوترمي t_p و يطلب تحديد قيم المتحولات الأخرى المؤثرة على التسخين الإيكزوترمي بحيث تكون درجة الحرارة العظمى في نواة التسخين مساوية للمسموح بها . هذا وقد أوردنا على سبيل المثال مجموعة من الحسابات أجريت بمساعدة هذا البرنامج وذلك بإهمال تأثير الأساس مع افتراض القيم التالية :

- النشر الحراري النوعي $q=60K.cal/Kg$
 - كمية الاسمنت $me=250 Kg/M^3$
 - ارتفاع العينات المدروسة $f = 0 \dots 3,0M$

- درجة حرارة السطح (الشروط الحدية من الدرجة الأولى) $t_p = 0 \dots 30^\circ C$
 إن نتائج هذه الحسابات (شكل) تعطي تصوراً واضحاً عن تأثير العوامل المفترضة أعلاه على التسخين الإيكزوترمي . يعتبر المخطط المبين (شكل 3) حلاً لمجموعة المعادلات التي تعطي القيمة المثالية للتسخين الأعظمي وذلك بالعلاقة مع t_o, B, t_p مع العلم أن العلاقة بين t_p و t_o تتغير بالعلاقة مع ارتفاع العينة البيتونية ، ويمكن ملاحظة ثلاث

في هذه الحالة يتم الوصول إلى تخفيض التسخين الإيكزوثرمي عن طريق:

I - تبريد الخليط البيتوني في المعمل أثناء الجبل ومن خلال تبريد الرمل والحصى وكذلك المياه اللازمة وبالإستعاضة عن قسم من المياه بقطع من الجليد :

II - استعمال أنواع خاصة من الإسمنت (منخفضة الحرارة) أو تخفيض كمية الإسمنت الداخلة .

III - استعمال التبريد الأنثوبي بعد الصب مباشرة .

إن المناطق الثلاث المبينة وتأشير صيانة السطح يعكسها منحنى التغيير

$t_o = t_p^{30}$ (شكل 3) حيث t_p^{30} , t_o^{30} درجات حرارة الخليط البيتوني التي تعطي $t_{max} = 30^\circ C$ عند درجة حرارة سطح على التوالي $0^\circ C$, $+30^\circ C$ ويفسر تأثير الارتفاع على فاعلية العناية بالسطح من وجهة النظر الحرارية بأن الاحتياط في كمية الحرارة في Bqm_c والمحسوب على من عينة البيتون يزداد مع ازدياد الارتفاع .

إن المخطط المبين في الشكل (3) موضوع للحالة التي فيها تؤخذ درجة الحرارة المسموحة مع عدم الأخذ بعين الاعتبار ارتفاع العينة ، إلا أنه يمكن وضع نموذجيات محسوبة لمشتق العلاقة t_q بالنسبة لارتفاع العينة المحدد بعلاقات مرتبطة بالنظام الحراري للعينة المدروسة .

وهكذا استناداً إلى المخطط 3 يحدد أحد القيم الثلاث t_p , t_o , t_6 في حال كون القيمتين الباقيتين معلومتين ، كما يتم اختيار القيم المثالية لهذه المتحولات اعتماداً على المعطيات الاقتصادية ومع الأخذ بعين الاعتبار الخواص المناخية لمنطقة البناء والعوامل الانتاجية .

إن ارتفاع الكتلة البيتونية يحدد اعتماداً على نوع السد وشكل القطع فيه . أما درجة حرارة الخليط البيتوني فهي تعكس النفقات الإضافية اللازمة للتبريد في المجبل ، في حين تعكس درجة حرارة السطح البيتوني t_p النفقات اللازمة للعناية بهذا السطح ، نوعية الغطاء اللازم وغيرها .