الجمهورية العربية السورية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة حمص

الكلية التطبيقية

مقرر العزل الحراري

قسم التدفئة والتكييف والتبريد – سنة ثانية

اعداد

الأستاذ الدكتور رضوان عبدالغني المصري

2026

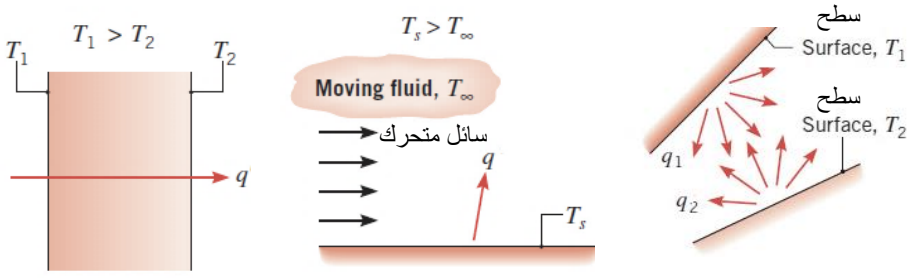
انتقال الحرارة والعزل الحراري في البناء
Heat transfer and thermal insulation in the building

أهداف الفصل

- ❖ شرح مبدأ ثلاث طرق لنقل الحرارة.
- ❖ حساب وتحديد مُعامل انتقال الحرارة الكلي لعناصر المباني.
- ❖ تصنيف مواد العزل وعرض فوائد تطبيقها في عناصر البناء.
- ❖ تحديد سماكة مادة العزل.
- ❖ شرح كيفية عزل الجدران والسقوف.
- ❖ تحديد الجسور الحراري وكيفية تجنبها.

2-1 طرق انتقال الحرارة Methods of heat transfer

يحدث انتقال الحرارة بسبب اختلاف درجات الحرارة. وحدة قياس درجة الحرارة في النظام الدولي هي سلسيوس (°C) أو كلفن(K) . يُمكن التعبير عن فرق في درجة الحرارة بوحدة كلفن أو بالدرجة المئوية، علماً أن فرق درجة الحرارة 1 كلفن و 1 درجة مئوية متساوي [1]. يحدث نقل الحرارة بالتوصيل عبر الوسط في حال وجود فرق في درجة حرارة جسم صلب أو وسط سائل غير متحرك. كما يحدث انتقال الحرارة بالحمل بين سطح ومائع متحرك عندما يكونان في درجات حرارة مختلفة، مثل سطح الجدار والهواء المُحيط. تسمى الطريقة الثالثة لانتقال الحرارة بالإشعاع الحراري. جميع الأسطح تبعث وتمتص الحرارة على شكل موجات كهرومغناطيسية في حالة وجود فرق في درجة حرارة وفوق الصفر المطلق. يوضح الشكل 2-1 الأنماط المختلفة لعمليات انتقال الحرارة.



انتقال الحرارة بالتوصيل عبر مادة صلبة أو سائلة ثابتة

انتقال الحرارة بالحمل الحراري

انتقال الحرارة بالإشعاع بين سطحين

شكل 2-1. طرق انتقال الحرارة [2].

2-1-1 التوصيل Conduction

قد يُنظر إلى التوصيل على أنه نقل للطاقة من الذرات أو الجسيمات الأكثر نشاطاً إلى الأخرى الأقل نشاطاً في المادة. ينشأ التدفق الحراري أثناء توصيل الحرارة في الجسم بسبب الفارق في درجة الحرارة في الاتجاه x لكل وحدة مساحة متعامدة مع اتجاه انتقال الحرارة ويتناسب طردياً مع تدرج درجة الحرارة، dT / dx، في هذا الاتجاه، يتم تعريفه على النحو التالي وفقًا لـ قانون فوريير Fourier's law:

$$q = - k \times (dT / dx) \qquad 1-2$$

علامة الطرح هي نتيجة انتقال الحرارة في اتجاه معاكس لزيادر درجة الحرارة. في ظل ظروف الحالة المستقرة وللتطبيقات التقنية العملية، من المقبول أن تكون المُوصلية الحرارية k ثابتة. بشكل عام، المُوصلية الحرارية للمواد الصلبة أعلى من مُوصلية السوائل والغازات. يُبين الشكل 2-2 قيم ومجالات المُوصلية الحرارية للمواد الصلبة والسوائل والغازات، على سبيل المثال، بالنسبة للمعادن، الماس والنحاس والحديد 2300, 400, 80 W/(m K) على التوالي. تتأثر المُوصلية الحرارية للمعادن بشكل أساسي بنسب الشوائب الموجودة فيها. تكون المُوصلية الحرارية منخفضة لمواد العزل الحراري المستخدمة في المباني، والتي تتراوح بين 0.02 إلى 0.7 W/(m K). أيضاً، مواد البناء، بشكل عام، لها مُوصلية حرارية مُنخفضة، أقل من 3 W/(m K) ولكنها أعلى من المُوصلية الحرارية للمواد العازلة. غالباً ما يكون من الصعب تلبية متطلبات وقواعد توفير الطاقة باستخدام مواد البناء فقط في المباني دون العوازل.

في الأجسام ذات الأشكال الهندسية البسيطة، يمكن حساب مُعدل تدفق الحرارة لكل وحدة مساحة (السيالة الحرارية – التدفق الحراري) (W/m^2) باستخدام:

$$q = k \times (\Delta T/S) \qquad 2-2$$

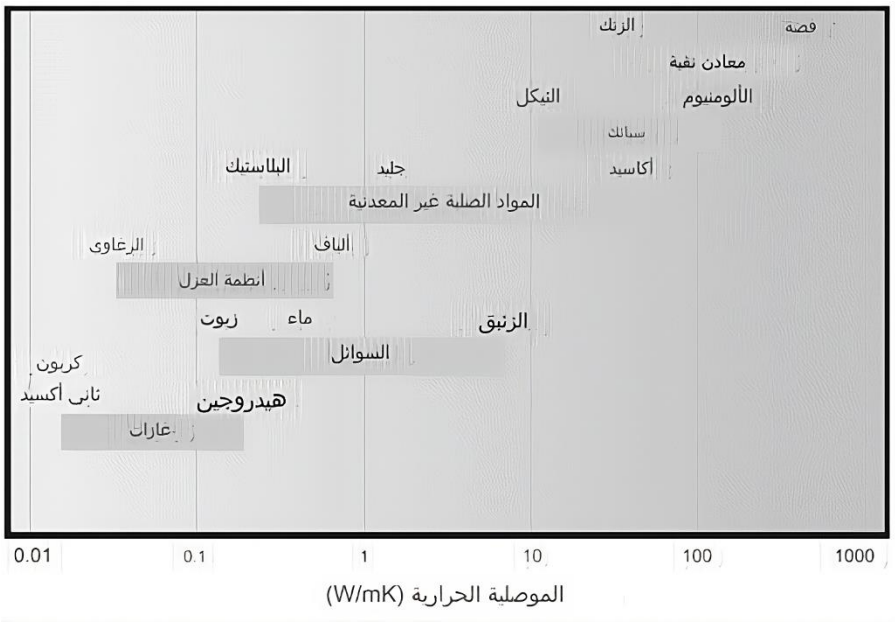
يعطى إجمالي مُعدل انتقال الحرارة (W) عبر مقطع سطحي مساحته A بالعلاقة:

$$Q = q \times A \qquad 3-2$$

حيث:

k	W/(m K)	المُوصلية الحرارية.
S	m	سمك الجدار أو الطبقة.
A	m^2	مساحة كل عنصر من غلاف المبنى.
ΔT	K	فرق درجة الحرارة.

يُسمى حاصل ضرب الكثافة والحرارة النوعية $\varrho \times cp$ $kJ/(m^3 K)$، السعة الحرارية الحجمية، والتي تقيس قدرة المادة على تخزين الطاقة الحرارية. تُعتبر نسبة المُوصلية الحرارية k إلى السعة الحرارية الحجمية خاصية مهمة في أنظمة انتقال الحرارة تسمى بمُعامل انتشار الحرارة ($\alpha = k / (\varrho \times cp)$). يقوم هذا العامل بتقييم قدرة المادة على توصيل الطاقة الحرارية نسبة إلى قدرتها على تخزين الطاقة الحرارية. سوف تستجيب المواد ذات القيمة الكبيرة α بسرعة للتغيرات في بيئتها الحرارية، وتستغرق وقتاً قصيراً للوصول إلى حالة التوازن. هذه الخاصية مهمة في عملية العزل الحراري.



شكل 2-2. المُوصلية الحرارية thermal conductivity لمواد مُختلفة عند درجة حرارة الغرفة [2].

2-1-2 الحَمل الحراري Convection

يحدث انتقال الحرارة بالحمل في عمليتين: انتقال الحرارة بسبب الحركة الجزيئية العشوائية، وبواسطة حركة السائل. يُمكن تصنيف انتقال الحرارة بالحمل وفقاً لطبيعة التدفق في نوعين من الحمل الحراري الحر والقسري. هناك أنواع مختلفة من انتقال الحرارة بالحمل الحراري في المباني، بما في ذلك الحمل الحراري القسري. مثال على عمليات انتقال الحرارة بالحمل القسري هو انتقال الحرارة حول المبخر والمكثف لمكيف الهواء وعملية تبريد المكثف للثلاجات والمجمدات (في حالة وجود مروحة). في الحمل الحراري الحر، يتم تحفيز انتقال الحرارة بواسطة قوى الطفو، والتي ترجع إلى فرق الكثافة الناتجة عن وجود فرق في درجة حرارة السائل أو الغاز. مثال على ذلك هو انتقال الحرارة بالحمل الحر الذي يحدث من جدار ساخن إلى الهواء المحيط بمجاري الهواء وأنابيب الماء الساخن. يتعرض الهواء الذي يلامس الجدار إلى زيادة في درجة الحرارة وبالتالي انخفاض في الكثافة ومنه يتحول إلى هواء أخف من الهواء المحيط، ولذلك فإن قوى الطفو تحفز حركة عمودية يتم فيها استبدال الهواء الدافئ الصاعد من حول الجدار بتدفق الهواء المحيط الأكثر برودة. يجب أخذ عملية الحمل الحراري بعين الاعتبار عند تحديد قيم درجة الحرارة داخل المباني وفي التحكم في عملية فقد / كسب الحرارة أو الأحمال الحرارية للتدفئة والتهوية وأنظمة تكييف الهواء. أيضًا، يُمكن تصنيف انتقال الحرارة بالحمل وفقاً لمعدلات نقل الحرارة إلى أو من سطح في التدفق الخارجي أو الداخلي. يؤثر شكل سطح انتقال الحرارة أيضاً على هذه العملية. هناك مجموعة من العوامل التي تؤثر بشكل عام على معدل انتقال الحرارة بالحمل الحراري، مثل أبعاد السطح وطبيعته وزاوية ميل السطح وسرعة وطبيعة المائع المتحرك ودرجة حرارته وضغطه وغيرها. بالطبع، يختلف تأثير هذه العوامل بين حالة الحمل الحراري الحر والقسري.

تكون عادةً الحرارة التي يتم نقلها بالحمل الحراري عبارة عن الطاقة المحسوسة للسائل. ومع ذلك، هناك أيضاً تبادل حراري كامن لبعض عمليات الحمل الحراري، والذي يرتبط بتغير الطور بين حالات السائل والبخار للمائع. يوجد حالتان خاصتان جديرتان بالاهتمام هما الغليان والتكثيف. متوسط قيم مُعامل انتقال الحرارة بالحمل الحراري للغليان والتكثيف – 2500

100,000 W/(m^2 K). متوسط مجالات قيم مُعامل الحمل الحراري الحر والقسري للغازات هي 2 – 25 W/(m^2 K) و 25 – 250 W/(m^2 K) على التوالي. بينما هذه القيم لمُعامل الحمل الحراري الحر والقسري للسوائل 50 – 1000 W/(m^2 K) و 100 – 20,000 W/(m^2 K)على التوالي [2]. في هذا الكتاب، سيتم اعتماد قيم مُعامل انتقال الحرارة بالحمل الحراري على أسطح الجدران أو الأسطح الداخلية والخارجية بناءً على القيم المجدولة الموجودة في المراجع. غالباً ما يتم تحديد مُعامل انتقال الحرارة بالحمل بالطرق التجريبية باستخدام رقم نوسلت Nusselt number غير البعدي.

يُعطى معدل انتقال الحرارة بالحمل بالمعادلة:

$$q = h \times |(T_s - T_f)| \qquad 4-2$$

حيث:

q	W/m2	مُعدل انتقال الحرارة بالحمل عبر وحدة المساحة (السيالة الحرارية).
h	W/(m2 K)	مُعامل انتقال الحرارة بالحمل الحراري.
T_f	°C	درجات حرارة الوسيط.
T_s	°C	درجات حرارة السطح.

يُعرف هذا القانون بقانون نيوتن Newton's law للتبريد. يُمكن تحديد معدل التدفق الحراري الكلي للحمل الحراري (W) عبر سطح ما باستخدام المعادلة (2–3).

2–1–3 الإشعاع Radiation

الإشعاع الحراري هو الطاقة المنبعثة من مادة في درجة حرارة أعلى من الصفر المطلق. يُعزى الانبعاث إلى التغيرات في تكوينات الإلكترون للذرات أو الجزيئات المكونة ويتم نقله بواسطة الموجات الكهرومغناطيسية. يحتاج انتقال الحرارة بالتوصيل أو بالحمل الحراري إلى وجود وسيط مادي، بينما لا يحتاج الإشعاع إلى أي وسيط؛ يحدث انتقال الحرارة بالإشعاع بشكل أكثر فعالية في الفراغ. يُعتبر الإشعاع عملية مهمة في تطبيقات التدفئة والتبريد والتجفيف، كما يتم استخدامه في طرق تحويل الطاقة في عمليات الاحتراق واستخدام الطاقة الشمسية وتدابير كفاءة الطاقة في المباني.

يحدث في حالات كثيرة تبادل الحرارة بالإشعاع بين سطح صغير عند Ts وسطح متساوي درجة الحرارة أكبر بكثير منه ويحيط بالسطح الأصغر. يُمكن أن تكون الوسط المحيط، على سبيل المثال، جدران غرفة بدرجة حرارة تحيط سطح داخلي بدرجة حرارة مختلفة. بفرض أن السطح سطحاً رمادياً فيمكن حساب المعدل الصافي لانتقال الحرارة بالإشعاع من السطح المعبر عنه لكل وحدة مساحة من السطح باستخدام قانون شتيفان بولتزمان Stefan Boltzmann's law:

$$q = \varepsilon \times \sigma \times (T_s^4 - T_{sur}^4) \qquad 5-2$$

حيث:

q	W/m^2	المعدل الصافي لانتقال حرارة الإشعاع عبر وحدة المساحة (السيالة الحرارية).
ε	–	انبعاثية السطح.
σ	W/(m^2 K^4)	ثابت ستيفان بولتزمان.
T_s	°C	درجة حرارة السطح الداخلي الصغير.
T_{sur}	°C	درجة الحرارة السطح المحيط.

2-2 مُعامل انتقال الحرارة الكلي Overall heat transfer coefficient

هناك حالات تتطلب أن تكون عملية انتقال الحرارة أكثر كفاءة، مثل انتقال الحرارة في المكثف أو المبخر لمكيف الهواء، وعلى النقيض من ذلك، يجب أن تكون عملية انتقال الحرارة محدودة من خلال غلاف المبنى. العزل الحراري مهم من الناحية الفنية والاقتصادية والبيئية. كما أن لها العديد من الفوائد التي سيتم مناقشتها في هذا الفصل. يجب توضيح عملية انتقال الحرارة المركبة قبل الدخول في دراسة عملية العزل الحراري. يمكن تحديد إجمالي معدل انتقال الحرارة وتدفق الحرارة (السيالة الحرارية) عبر عنصر ما من عناصر البناء على النحو التالي:

$$Q = U \times A \times (T_o - T_i) \qquad 6-2$$

$$q = U \times (T_o - T_i) \qquad 7-2$$

حيث:

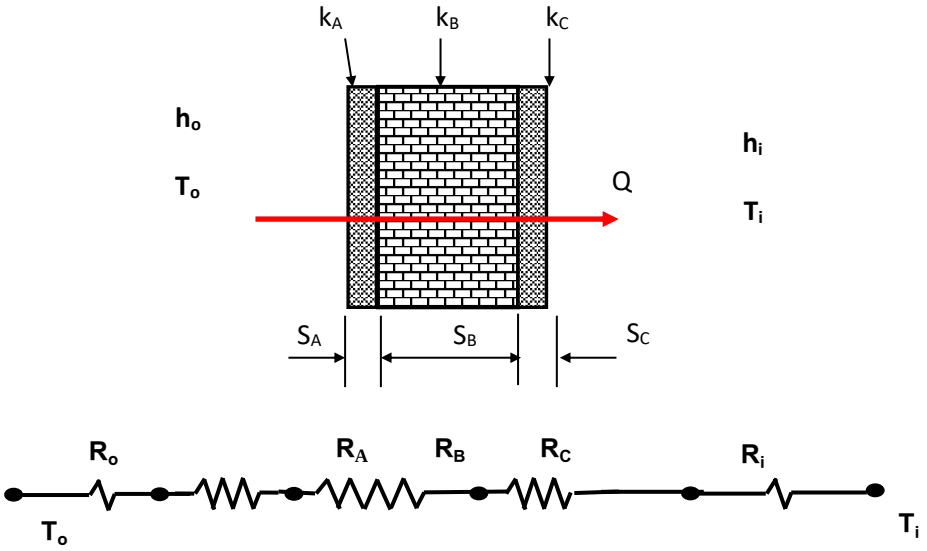
Q	W	معدل انتقال الحرارة الكلي عبر عنصر.
q	W/m^2	تدفق الحرارة – السيالة الحرارية.
U	$W/(m^2 K)$	مُعامل انتقال الحرارة الكلي.
A	m^2	مساحة كل عنصر من غلاف المبنى.
T_o	°C	درجة حرارة الوسط الخارجي المحيط.
Ti	°C	درجة الحرارة الوسط الداخلي.

يحدد الكود السعودي لحفظ الطاقة في المباني المنزلية SBC-602، الشروط المطلوبة كما يلي: درجة الحرارة الداخلية (Ti) = 21.1 °C رطوبة نسبية θ = 50% أثناء الصيف، بينما درجة الحرارة الداخلية (Ti) = 23.9 °C مع رطوبة نسبية θ = 30% خلال الشتاء [3]. ليس من الضروري اعتماد درجة الحرارة الخارجية أقل درجة حرارة مسجلة في المنطقة التي سيقام فيها المشروع عند حساب حمولة التدفئة أو التبريد. توجد جداول لتحديد درجة الحرارة المحيطة بناءً على الظروف المناخية السائدة في منطقة المشروع. يحدث فقدان شروط الراحة داخل المكان بسبب اختلاف درجة الحرارة الداخلية والخارجية للمبنى، نتيجة انتقال الحرارة من خلال النوافذ والأبواب والجدران والأسقف والأرضيات. تظهر ظاهرة التبادل الحراري خلال الصيف في الشكل 2-3. تؤثر سماكة طبقات الجدار ومُوصليتها الحرارية جنباً إلى جنب مع مُعاملا الحمل الحراري الداخلي والخارجي (h_o و h_i) على عملية التبادل الحراري الكلي. يوضح الجدول 2-1 الكثافة ϱ، والسعة الحرارية النوعية cp، والمُوصلية الحرارية k للمواد المُستخدمة في تشييد المباني. كما تم بيان مُعاملا الحمل الداخلي والخارجي (h_o و h_i) في الجدول 2-2 والجدول 2-3 على التوالي. يُوضح الشكل 2-3 نموذج لانتقال الحرارة بالتوصيل عبر طبقات وبالحمل الحراري حول جدار خلال فصل الصيف. يمكن حساب مُعامل انتقال الحرارة الكلي U للجدار مع وجود حركة الهواء على سطحه الخارجي والداخلي، كما هو موضح في الشكل 2-3، والتركيب المتجانس لكل طبقة ومتعدد الطبقات بالمعادلة:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum \frac{S_j}{k_j} + \frac{1}{h_o}} \qquad 8-2$$

حيث:

S_j	m	سمك الجدار أو الطبقة.
k_j	W/(m K)	المُوصلية الحرارية.
h_o	$W/(m^2 K)$	مُعامل انتقال الحرارة بالحمل الخارجي.
h_i	$W/(m^2 K)$	مُعامل انتقال الحرارة بالحمل الداخلي.



شكل 2-3. مخطط انتقال الحرارة بالحمل الحراري والتوصيل عبر جدار متعدد الطبقات في حالة الصيف [4].

جدول 2-1. الخواص الفيزيائية - الحرارية لمواد البناء [2, 5].

	موادل البناء	الكثافة, ϱ (kg/m^3)	الحرارة النوعية cp, (J/(kg K))	المُوصلية الحرارية, k (W/(m K))
1	الجبس أو اللوح الجصي	800	-	0.17
2	الخشب الرقائقي	545	1215	0.12
3	بلاط صوتي	290	1340	0.058
4	لوح خشب مضغوط، منخفض الكثافة	590	1300	0.078
5	لوح خشب مضغوط، عالي الكثافة	1000	1300	0.170
6	الأخشاب الصلبة (البلوط، القيقب)	720	1255	0.16
7	الأخشاب اللينة (التنوب والصنوبر)	510	1380	0.12
8	الجص الاسمنت	1860	780	0.72
9	بيتون	2400	-	2.1
10	طوب	1400-1920	835	0.65-1.2

11	طوب الواجهة		2083	–	1.3
12	طوب طيني مفرغ خلية واحدة سماكة	10 cm	–	–	0.52
13	طوب طيني، مفرغ 3 خلايا، سمك	30 cm	–	–	0.69
14	طوب رملي/حصى، سمك	20 cm	–	–	1.0
15	مجموع الجمرة،	20 cm	–	–	0.67
16	طوب خرسانية، قلب مستطيل				
17	طوب مفرغ		–	–	1.1
18	جص أسمنتي، ركام رمل		1860		0.72
19	الجبس الركام الرمل		1680	1085	0.22
20	حصاة		1650–2200	–	0.93–1.53
21	البلاط		2000	–	1.0
22	ألياف زجاجية، وجه ورقية		16–40	–	0.046–0.035
23	الألياف الزجاجية، مغلفة؛ بطانة مجرى الهواء		32	835	0.038
24	البوليسترين الموسع		55	1210	0.027
25	اللوح الليفي المعدني للسقف		265	–	0.049
26	البيتومين		1100	–	0.17

جدول 2–2. مُعامل انتقال الحرارة بالحمل الخارجي، (h_o (W / (m^2 K)) [5].

سرعة الرياح (m/s)	مُعامل انتقال الحرارة بالحمل الخارجي (W/(m^2. K))
1	12
3	20
7	34

جدول 2–3. مُعامل انتقال الحرارة بالحمل الداخلي، (h_i (W / (m^2 K)) [5].

اصدارية السطح	اتجاه انتقال الحرارة		
	للأعلى	للأسفل	أفقي
0.9	10.0	5.9	7.7
0.2	5.2	2.1	4.2

2–2–1 فجوة هوائية Air gap

أحياناً يتم الاحتفاظ بفجوات هوائية في الجدران والأسقف أثناء تشييد المبنى. الفكرة الأساسية لترك فراغ أو فجوة هوائية هي تقليل الفقد/الكسب الحراري وأحياناً لأسباب تصميمية. تُؤثر العوامل التالية على مقاومة انتقال الحرارة عبر الفجوة الهوائية:

- ❖ أبعاد فجوة الهواء.
- ❖ اتجاه انتقال الحرارة داخل فجوة الهواء.
- ❖ نوع المادة المستخدمة المُشكلة للفجوة الهوائية.
- ❖ حركة الهواء داخل الفجوة.

بشكل عام، تزداد مقاومة انتقال الحرارة مع زيادة السماكة في فجوة الهواء الرأسية. يظهر هذا الاتجاه للمقاومة المتزايدة حتى 25 mm. تشكل فجوات الهواء المغلقة مقاومة حرارية أكبر من تلك الفجوات ذات التهوية. هذا هو السبب في أن الفجوات الهوائية المنظمة المغلقة غالباً ما تستخدم في الهياكل. في الوقت نفسه، يتم استخدام فجوات الهواء ذات التهوية بشكل خاص في المباني غير المكيفة. يستخدم هذا النوع في المناطق الحارة لتقليل تدفق الحرارة إلى داخل المبنى. يوضح الجدول 2-4 مقاومة انتقال الحرارة بفجوة الهواء المغلقة كتابع للسماكة واتجاه تدفق الحرارة والموقع. لاحظ أنه عندما تكون فجوة الهواء عمودية، فإن السماكة تساوي أو تزيد عن 25 mm، مما يحقق شروط العزل الحراري المثالي.

جدول 2-4. مقاومة انتقال الحرارة لفجوات الهواء، R_a، (m^2 K / W) [5].

سماكة الفراغ الهوائي (mm)	اتجاه انتقال الحرارة		
	للأعلى	للأسفل	أفقي
5	0.11	0.11	0.11
10	0.15	0.15	0.15
15	0.16	0.17	0.17
25	0.16	0.19	0.18
50	0.16	0.21	0.18

2-2-2 مُعامل انتقال الحرارة الكلي للنوافذ والأبواب Overall heat transfer coefficient for windows and doors

يُمكن استخدام معادلات انتقال الحرارة لحساب مُعامل انتقال الحرارة للأبواب والنوافذ. تتأثر نسب الحرارة المتدفقة من المبنى عبر الأبواب والنوافذ والأجزاء الشفافة بعدة عوامل. مثل عملية الحمل الحراري حول الأجزاء الشفافة في الأسطح الداخلية والخارجية وبواسطة التوصيل الحراري من خلال مكونات الجزء الشفاف والإطار. كما يجب أن يؤخذ انتقال الحرارة من خلال الإشعاعات في الاعتبار عند حساب حمل التبريد خلال فصل الصيف. القيم التقريبية لمُعامل انتقال الحرارة الكلي للنوافذ والأبواب موضحة في الجدول 2-5.

جدول 2-5. قيم مُعامل انتقال الحرارة الكلي U للأبواب والنوافذ المختلفة [5].

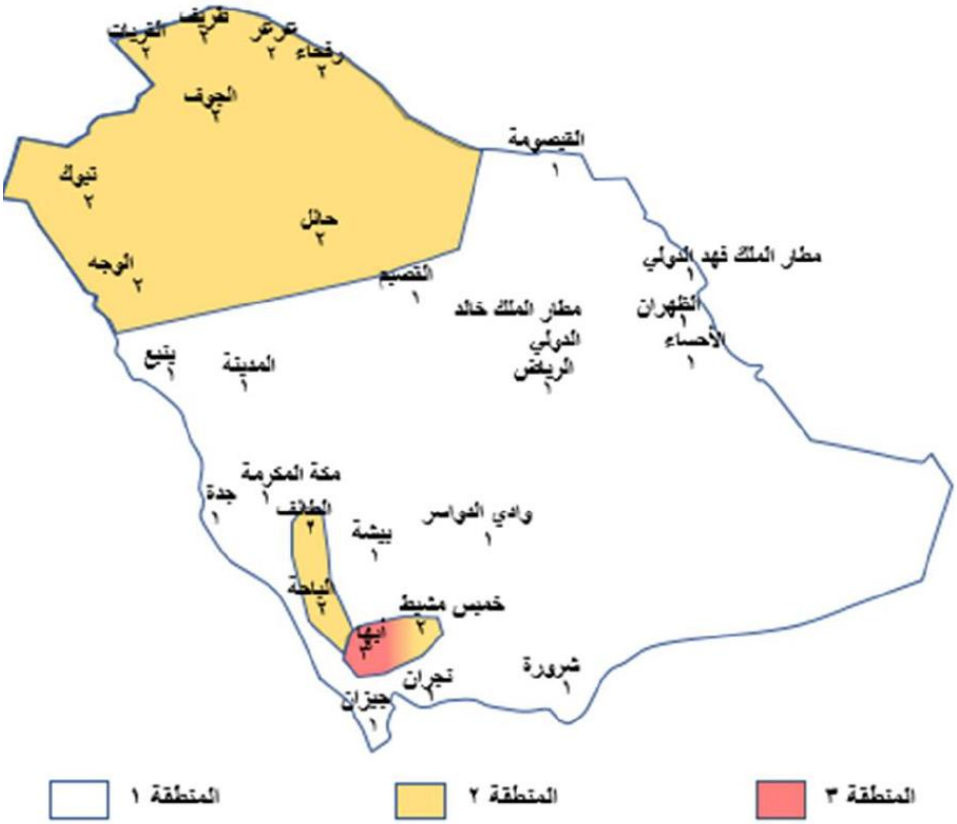
وصف الباب أو النافذة	U, (W/ (m^2 K))
باب ثنائي الطي (قطعتين) مزدوج الزجاج	1.6
باب ثنائي الطي (قطعتين) بثلاث طبقات زجاج الفراغات معبئة كريبتون	1.3
باب ثنائي الطي (قطعتين) بثلاث طبقات زجاج الفراغات معبئة أرغون	1.5
الأبواب المصنوعة من معدن غير المعزولة	5.5
الأبواب الخشبية الداخلية	2
النوافذ بزجاج مفرد عادي	5.8 – 5.9
نوافذ بزجاج مضاعف مع فراغ يوجد فيه هواء	2.8 – 3
نوافذ بزجاج مضاعف مع فراغ معبئة بغاز الارغون وقليل الاصدارية	1.2 – 2
نوافذ ثلاثية طبقات الزجاج مع فراغات معبئة بغاز الارغون وقليل الاصدارية	0.9 – 1

2-2-3 قيم مُعامل انتقال الحرارة الإجمالي المطلوبة Recommended Overall Heat Transfer Coefficient

يوجد قيم مرجعية مُوصى بها من الجهات الحكومية عادة لتحقيق قيم عظمى مسموح بها لمُعامل انتقال الحرارة الكلي لعناصر البناء، وذلك حسب:

- مساحة البلد.
- الشروط المناخية في البلد.
- نوع عناصر البناء (نوافذ أو أبواب أو جدران أو أسقف).
- ترشيد استهلاك الطاقة أو نوعية البناء، هل المطلوب أن يكون البناء مُرشد لاستهلاك الطاقة أم لا.
- وجود برامج دعم حكومي لترشيد استهلاك الطاقة في الأبنية.

على سبيل المثال، الكود السعودي لحفظ الطاقة في المباني المنزلية (SBC-602) قسم المملكة العربية السعودية إلى ثلاث مناطق مناخية، كما هو مُوضح في الشكل 2-4، المنطقة المناخية 1 هي الأكبر في المملكة العربية السعودية [3]. يُوضح الجدول 2-6 قيم مُعامل انتقال الحرارة الكلي المطلوبة في الكود لعناصر البناء السكني في المملكة العربية السعودية والقيم المطلوبة في دبي.



شكل 2–4. خارطة المملكة العربية السعودية مُوضح عليها المناطق المناخية [3].

جدول 2–6. مُعامل انتقال الحرارة الإجمالي المطلوب للجدارن والأسقف والأرضيات والأبواب والنوافذ [1,3].

المنطقة	U (W/ (m^2. K))				
	الجدران	الأسقف	الأرضيات	النوافذ	الأبواب
السعودية المنطقة 1	0.342	0.202	0.496	2.668 – 4.259	2.839
السعودية المنطقة 2	0.397	0.238			
السعودية المنطقة 3	0.453	0.273			
دبي	0.570	0.300	–	1.9 – 2.1	–
الجمهورية العربية السورية	0.800	0.500	1.000	3.5 – 5.2	3.5 – 5.2

(ملحوظة: تم تعديل القيم الخاصة في المملكة العربية السعودية في أغسطس 2021 بحيث تكون أعلى وبالتالي أقل سماكة عازل مطلوبة.)

مثال 2–1: جدار خارجي لبناء موجود في منطقة القصيم بالمملكة العربية السعودية بفرض أنه مُعرض لسرعة رياح وسطية 3 m/s وأن درجة الحرارة التصميمية الداخلية T_i = 25 °C والخارجية T_o = 48 °C وفق الحالات التالية:

- جدار مكون من بلوك كثافة 1600 kg/m^3 (k = 1 W/m. K) سماكة 250 mm مع تلييسه اسمنتية من الطرفين كثافة 1860 kg/m^3 (k = 0.72 W/m. K) وسماكة كل طبقة 15 mm.

- جدار مكون من طبقتي بلوك كثافة $1600\ kg/m^3$ وسماكة $100\ mm$ من الطرفين مع وجود فراغ هوائي سماكة $50\ mm$ بفرض أن انبعاثيه السطوح 0.9 مع تلييسه اسمنتية من الطرفين كثافة $1860\ kg/m^3$ وسماكة كل طبقة $15\ mm$.
- جدار مثل الحالة السابقة مع تبديل الفراغ الهوائي فقط بعازل المُوصلية الحرارية $k = 0.04\ W/m.K$ (مثلاً الألياف الزجاجية مع وجه ورقي) مع المحافظة على السماكات والطبقات الأخرى.

المطلوب:

1. حدد السيالة الحرارية النوعية (القدرة خلال وحدة المساحة) W/m^2 في الحالات الثلاث مع أخذ عملية الحمل الحراري على طرفي الجدار.
2. هل يحقق الجدار في الحالات الثلاث القيم الموصي بها الكود السعودي لحفظ الطاقة في المباني المنزلية؟
3. مناقشة النتائج من ناحية الاقتصاد والبيئة.

مُعامل الحمل الحراري على السطح الخارجي من جدول 2–2 عند سرعة الرياح المعطاة $h_o = 20\ W/m^2.K$.

مُعامل انتقال الحرارة بالحمل الحراري على السطح الداخلي للجدار، حيث يكون انتقال الحرارة أفقي $h_i = 7.7\ W/m^2.K$ من جدول 2–3.

1. تُعطى معدل انتقال الحرارة النوعية (السيالة الحرارية النوعية) بالعلاقة:

$$q = U \times (T_o - T_i) \qquad W/m^2$$

سيتم تحديد قيمة مُعامل انتقال الحرارة الإجمالي U للحالات الثلاث كما يلي:

$$U_1 = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{S_b}{k_b} + \frac{2\ x\ S_p}{k_p} + \frac{1}{h_o}} = \frac{1}{\frac{1}{7.7} + \frac{0.25}{1.0} + \frac{2\ x\ 0.015}{0.72} + \frac{1}{20}} = 2.12\ \frac{W}{m^2.K}$$

$$U_2 = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{2\ x\ S_b}{k_b} + \frac{2\ x\ S_p}{k_p} + R_a + \frac{1}{h_o}} = \frac{1}{\frac{1}{7.7} + \frac{2\ x\ 0.1}{1.0} + \frac{2\ x\ 0.015}{0.72} + 0.18 + \frac{1}{20}}$$

$$= 1.66\ \frac{W}{m^2.K}$$

$$U_3 = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{2\ x\ S_b}{k_b} + \frac{2\ x\ S_p}{k_p} + \frac{S_I}{k_I} + \frac{1}{h_o}} = \frac{1}{\frac{1}{7.7} + \frac{2\ x\ 0.1}{1.0} + \frac{2\ x\ 0.015}{0.72} + \frac{0.05}{0.04} + \frac{1}{20}}$$

$$= 0.598\ \frac{W}{m^2.K}$$

بالتعويض عن قيمة U في الحالات الثلاث نجد أن السيالة الحرارية النوعية عبر الجدار:

$$q_1 = 2.12 \times (48 - 25) = 2.12 \times 23 = 48.8\ W/m^2$$

$$q_2 = 1.66 \times (48 - 25) = 1.66 \times (23) = 38.2\ W/m^2$$

$$q_3 = 0.598 \times (48 - 25) = 0.598 \times (23) = 13.8\ W/m^2$$

2. لم تحقق أي من الحالات السابقة القيم المُوصى بها في الكود السعودي لحفظ الطاقة في المباني المنزلية نظراً لأن القيمة المطلوبة للجدران في المنطقة 1 هي $0.342\ W/m^2.K$, انظر الجدول 2-6. لذلك يتطلب زيادة سماكة العازل.

3. المناقشة

بفرض أن معدل انتقال الحرارة النوعية (السيالة الحرارية النوعية) في الحالة الأولى يمثل 100% وبالتالي فإن الحالات الأخرى:

الحالة الثانية: يمثل الحمل حوالي 79% من الحالة الأولى.

والحالة الثالثة يكون الحمل 28% من الحالة الأولى فقط أي تم توفير 72% من معدل انتقال الحرارة النوعية (السيالة الحرارية النوعية) عبر الجدار باضافة طبقة العازل مقارنة مع جدار بلوك دون عازل حراري.

لاحظ أن السيالة الحرارية النوعية انخفضت مع تغير تركيبة الجدار وخصوصاً عند إضافة الطبقة العازلة. انخفاض السيالة الحرارية النوعية يؤدي إلى توفير في استهلاك الوقود أو الطاقة الكهربائية لتشغيل المكيفات وبالتالي اقتصاد أفضل وحماية بيئة أفضل نظراً لانخفاض الحاجة لحرق الوقود أو تشغيل المكيفات.

2-3 العزل الحراري Thermal Insulation

يُعرف العزل الحراري للأبنية بأنه العملية التي تؤدي إلى منع التبادل الحراري بين الفراغ الداخلي مع الوسط المحيط. لذلك يُنصح بعزل الغلاف الخارجي للأبنية لمنع تبادل الطاقة الحرارية مع الوسط المحيط قدر الإمكان. كما أنه ينتج عن تحسين مواصفات العزل الحراري للبناء تحسن في شروط الراحة الحرارية وتخفيض لاستهلاك الطاقة من أجل تكييف الهواء فيها. يُفضل أن تكون المواد الأولية لتصنيع العوازل الحرارية مُتوفرة محلياً وأن تكون قابلة للتدوير وعملية إنتاجها اقتصادية وغير مُستهلكة للطاقة بشكل كبير قدر الإمكان.

2-3-1 تصنيف وخصائص المواد العازلة للحرارة Classification and properties of heat-insulating materials

تتميز مواد العزل الحراري بمُوصلية حرارية مُنخفض وبكثافة مُنخفضة أيضاً عادة نتيجة احتوائها على مسامات وفراغات هوائية (أو غازات)، حيث تتميز هذه الغازات بشكل عام برداءة التوصيل الحراري، وهي موزعة بأحجام وأشكال مختلفة في المادة حيث تشكل نسبة كبيرة من الحجم الكلي للمادة.

توجد المواد العازلة بأشكال وأنواع مختلفة، ولمعرفة وفهم خصائصها والتي تعتبر أمراً أساسياً يساعد على اختيار هذه المواد للتطبيق المناسب، لا بد من التعرف على طبيعة تركيب هذه المواد وتصنيفها. يُمكن تصنف المواد العازلة حسب تركيبها الخلوي أو حسب شكلها النهائي أو حسب تركيبها الكيميائي وغيره. فمثلاً يتم تصنيف المواد العازلة حسب الشكل:

- ألواح جاسئة أو جامدة.
- ألواح شبه جاسئة.

- ❖ عوازل الأنابيب ومجاري الهواء الجاهزة.
- ❖ بطانيات ولفائف وغيرها مثل مواد حشو للفواصل ومعاجين عازلة للحرارة وأشرطة عازلة للحرارة وطلاءات قابلة للرش.

تتميز المواد العازلة بخصائص مختلفة والتي يمكن تصنيفها كالتالي:

- ❖ فيزيائية وحرارية مثل: المُوصلية الحرارية Thermal Conductivity وامتصاص الماء ونفاذية الرطوبة ودرجة الحرارة التشغيلية (التطبيق).
- ❖ ميكانيكية مثل: ثبات المقاسات ومقاومة الضغط والهبوط واسترجاع الأبعاد والالتصاق والانكماش.
- ❖ مقاومة الاحتراق والاشتعال Combustion and Flammability.
- ❖ امتصاص الصوت Sound absorbing.
- ❖ الصحية وبيئية مثل: السمية والأضرار الصحية ومقاومة العوامل الجوية وقابلية التدوير Toxicity, Health Damage, durability, and Recyclability.

2-3-2 أهم المواد العازلة The most important insulating material

يوجد أنواع مختلفة من المواد العازلة للحرارة. سيتم عرض أهم أنواع مواد العزل وبعض مميزاتها المناسبة في الأبنية. يُبين الشكل 2-5 صور لأهم مواد العزل المُستخدمة في الأبنية كما يُوضح الجدول 2-7 الكثافة والمُوصلية الحرارية لهذه المواد دون المواد العاكسة للحرارة.

1. **الصوف الزجاجي Glass Wool:** يتوافر الصوف الزجاجي في عدة أشكال منها الألياف السائبة واللباد والألواح الجاسئة. يتميز بمُعامل امتصاص ماء ورطوبة عال وقوة تحملها للضغط منخفضة بالمقابل مقاومه للاحتراق ويتحمل درجات حرارة عالية. وقد تحتوي على أغلفة للحماية (من رقائق الالومنيوم العاكسة أو رقائق البولي ايثيلين أو الورق المقوى المقاوم للاشتعال).
2. **الصوف المعدني أو الصخري Mineral or Rock Wool:** يتميز الصوف الصخري بمقاومة عالية للحريق وقدرة عالية على عزل الصوت ولكنه قابلية عالية لامتصاص الماء والرطوبة ومقاومة ضعيفة للانضغاط.
3. **الخبث الصوفي Slag Wool:** يتم تشكيل الألواح شبه الجاسئة بإضافة مواد رابطة لألياف الصوف الخبثي وقد تحتوي على أغلفة للحماية (من رقائق الالومنيوم العاكسة أو رقائق البولي ايثيلين أو الورق المقوى المقاوم للاشتعال).
4. **البولسترين الممتد (البولسترين المشكل بالقولبة) (الستريوبور)Expanded or Molded Polystyrene (EPS):** عادة يكون على شكل ألواح بسماكات مختلفة ولكنه قابل للاحتراق ورخيص ومُقاوم لنقل الرطوبة.
5. **البولسترين المشكل بالبثق (ستريوفوم) XPS Extruded Polystyrene:** يتميز البولسترين المُشكل بالبثق بدرجة عالية من التجانس وبقدرة عالية على العزل الحراري، ويُنصح استخدامه في المناطق المعرضة للرطوبة.

6. البوليوريثين PUR Polyurethane: هناك نوعان من مادة البوليوريثين الرغوي الذي يتم رشه على السطوح المطلوب عزلها وألواح البوليوريثين الصلبة. يُوصى عند تركيبه في الأسطح (الأسقف). يُمكن عزل الأبنية الجاهزة بسهوله بالنوع الرغوي.

الخبث الصوفي

Slag Wool

الصوف المعدني أو الصخري

Mineral or Rock Wool

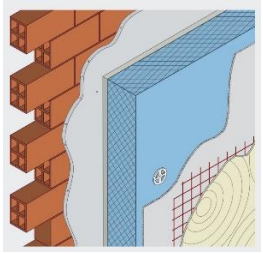
الصوف الزجاجي

Glass wool

البوليوريثين

Polyurethane

PUR



البوليسترين المشكل بالبثق

(ستريوفوم)

Extruded Polystyrene

STYROFOAM

البوليسترين المدد (البوليسترين

المشكل بالقولبة) (الستريوبور)

Expanded or Molded

Polystyrene (EPS)

الزجاج الرغوي

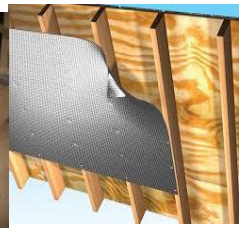
Foam Glass

البيرلايت الممتد

Expanded Perlite

البوليوريثين الرغوي

Polyurethane foam



المواد العاكسة للحرارة

Heat Reflective

Materials

السليلوز

Cellulose

سيليكات الكالسيوم

Calcium silicate

شكل 2-5. صور مختلفة لأهم أنواع مواد العزل الحراري.

7. **البيرلايت الممتد Expanded Perlite:** يُمكن خلط حبيبات البير لايت الممدد مع الإسمنت ليعطي خرسانة خفيفة عازلة وبأشكال مختلفة.
8. **الزجاج الرغوي Foam Glass:** يمتاز بمقاومة ميكانيكية عالية للكسر والشد والثني والقص وهو مقاوم لنفاذ الماء وغير قابل للاحتراق.
9. **سيليكات الكالسيوم Calcium silicate:** توجد سيليكات الكالسيوم على شكل الواح وأنابيب عزل ويتحمل درجات حرارة عالية.
10. **السليلوز Cellulose:** يتميز بأنه قابل للتعفن وهو قابل للاحتراق ويُمكن عزل الأبنية السكنية القديمة في حال وجود فراغ هوائي سابقاً في عناصر البناء.
11. **المواد العاكسة للحرارة Heat Reflective Materials:** تختلف آلية انتقال الحرارة في المواد المسامية أو الخلوية العازلة للحرارة عنها في المواد العازلة العاكسة للحرارة. ففي حالة المواد العازلة العاكسة للحرارة تتم إعاقة انتقال الحرارة بمنع الاشعاع الحراري من العبور خلال عناصر البناء عن طريق تركيبة وشكل ولون السطح حيث أن السطوح العاكسة تُساعد في عكس الجزء الأكبر من الأشعة الحرارية الساقطة عليها. إن قيمة الامتصاصية للمواد العازلة العاكسة للحرارة لها أثر كبير على انتقال الحرارة بالإشعاع من سطوح المواد. تتميز هذه المواد بسطوح لماعة بعاكسيه عالية تصل حتى 96% وامتصاصية وإصدارية منخفضة. تُركب أيضاً هذه المواد على زجاج السيارات والواجهات من أجل تخفيض الكسب الحراري.

جدول 2-7. المُوصلية الحرارية k والكثافة ρ لأهم العوازل الحرارية [5 ,2].

	المادة العازلة		الكثافة (kg/m^3)	المُوصلية الحرارية (W/ (m. K))
1	Glass wool	الصوف الزجاجي	16-40	0.035-0.046
2	Mineral or rock wool	الصوف المعدني أو الصخري	15-300	0.036-0.044
3	Slag wool	الخبث الصوفي	90	0.04
4	Expanded polystyrene (molded polystyrene – styropor)	البولسترين المدد (البولسترين المشكل بالقولبة – الستريوبور)	15-55	0.033-0.039
5	Extrusion polystyrene (styrofoam)	البولسترين المشكل بالبثق (ستريو فوم)	25	0.03-0.04
6	Polyurethane	البوليوريثين	30-35	0.02-0.04
7	Expanded perlite	البيرلايت الممتد	160-350	0.052-0.08
8	Foam glass	الزجاج الرغوي	100-165	0.038-0.055
9	Calcium silicate	سيليكات الكالسيوم	200-400	0.052-0.069
10	Cellulose	السليلوز	20-60	0.045-0.055

2-3-3 فوائد العزل الحرارى Benfit of Thermal Insulation

يُؤدي العزل الحراري المنفذ بشكل فني جيد إلى الفوائد التالية:

2-3-3-1 المُساعدة في تحقيق شروط الراحة الحرارية Helping achieve thermal comfort conditions

لكي يشعر الإنسان بالراحة في وسط ما يجب أن تكون كمية الحرارة المحسوسة والكامنة المطروحة من الجسم مساوية للطاقة المولدة داخل الجسم. يتبادل جسم الإنسان الحرارة المحسوسة مع الوسط المحيط به بثلاثة طرق: التوصيل والحمل والإشعاع، كما يتبادل الحرارة الكامنة عبر التنفس والتعرق. يتم تبادل الحرارة المحسوسة بين سطح الجسم والسطوح المكونة للفراغ بالإشعاع. يُؤثر فرق درجة الحرارة على كمية الطاقة الحرارية المُتبادلة. بما أنه يجب أن تكون درجة حرارة سطح جسم الإنسان ثابتة، يُفضل أن تكون درجة حرارة السطوح المكونة للفراغ أيضاً ثابتة ومناسبة قدر الإمكان لكي لا يكسب الجسم حرارة من السطوح الساخنة (صيفاً) أو يخسر الحرارة للسطوح الباردة (شتاءً). يتم توفير ذلك من خلال استخدام العزل الحراري لعناصر المباني الخارجية مما يؤدي لأن تكون درجة حرارة سطوح الفراغ ثابتة وقريبة من درجة حرارة الهواء المحيط بالجسم تقريباً.

2-3-3-2 تخفيض استهلاك وكلفة الطاقة والتجهيزات اللازمة لتكييف الهواء Reducing energy consumption and costs and equipment needed for air conditioning

يتم استهلاك قسم كبير من الطاقة في المباني لأغراض التبريد والتدفئة، يُمكن تقليل هذه الطاقة عن طريق استخدام أنظمة عزل حراري جيدة في المباني، يعتمد هذا التخفيض على التصميم المناسب واختيار المواد والأنظمة المناسبة. يُمكن تخفيض استهلاك الطاقة بالعزل الحراري في الأبنية بنسب تصل إلى 43% من الطاقة اللازمة لتشغيل المكيفات وبالتالي تخفيض في كلفة التشغيل [6]. كما أن استخدام العزل الحراري المناسب يؤدي إلى تقليل الأحمال ومن ثم تقليل تكاليف الإنشاء أي كلفة التجهيزات اللازمة، ويؤدي أيضاً إلى حماية الأجهزة والمعدات واطالة عمر التجهيزات والمحافظة على كفاءتها لفترة أطول، وبالتالي تقليل تكاليف التشغيل والصيانة لتلك الأجهزة.

2-3-3-3 تقليل شدة الضوضاء داخل البناء Reducing the noise inside the building

تمتاز معظم مواد العزل الحراري بقدرة على عزل الصوت، مما يقلل من مستويات شدة الضجيج في الأماكن المطلوب حمايتها من الضجيج وبالتالي تتحقق الراحة لقاطني المباني.

2-3-3-4 حماية البناء من التشققات Protect building from cracks

يحدث التمدد والتقلص لمواد عناصر الغلاف الخارجي للمباني نتيجة فرق درجة الحرارة، وغالباً ما يكون مُعامل التمدد والتقلص مختلف بين المواد (الخرسانة والبلوك وغير ذلك). تتعرض معظم المباني إلى هذه الحالة خصوصاً في البلدان الحارة مثل المملكة العربية السعودية والباردة. لتلافي هذه الظاهرة يُفضل عزل الغلاف الخارجي للمباني من الخارج لمنع حدوث فروقات كبيرة بدرجة الحرارة وبالتالي عدم حدوث التمدد والتقلص لمواد بناء الغلاف وبالتالي حماية البناء من التشققات. إن توفير ظروف مستقرة حرارياً يقلل بشكل كبير من نفقات الترميم وزيادة عُمر البناء.

2-3-3-5 تخفيف الأحمال الإنشائية Reducing structural loads

يُمكن الاستغناء عن بعض مواد البناء التقليدية والاستعاضة عنها بمواد عازلة ذات وزن خفيف مما يؤدي إلى تخفيف نسبة كبيرة من الأحمال الإنشائية. يكون ذلك أكثر أهمية في الأبنية المرتفعة.

2-3-3-6 مقاومة الحريق Firefighting

تتمتع مواد العزل الحراري بقدرات متفاوتة على مقاومة الحريق، فبعض المواد تقاوم الحريق مثل الصوف الصخري والصوف الزجاجي والبير لايت، والبعض الآخر من العوازل ينصهر أو يحترق عند درجات حرارة منخفضة مثل البولسترين والبولي يوريثان. لذلك يجب عدم استخدام المواد القابلة للاحتراق في الأماكن المُعرضة للحريق إلا بعد حمايتها من هذا الخطر أو استخدام مواد عزل غير قابلة للاحتراق.

2-3-3-7 حماية الأثاث Protect the furniture

يحدث تقلب في درجة حرارة فراغات البناء غير المعزول وذلك حسب الشروط المناخية المحيطة. قد يضطر مُستثمر البناء غير المعزول لترك أجهزة تكييف الهواء تعمل بشكل مُستمر للتغلب على هذا التقلب لحماية الأثاث. يُساعد العزل على تقليص التقلب في درجة الحرارة داخل فراغات البناء مما يؤدي إلى حماية الأثاث والتجهيزات.

2-3-3-8 تقليل أحمال الذروة Reducing peak loads

يصل حمل الشبكة الكهربائية في الصيف إلى 200% من حمل الشبكة في الشتاء في المناطق الحارة مثل المملكة العربية السعودية (حمل الشبكة بالصيف 62,121 MW وحمل الشبكة بالشتاء 34,109 MW في العام 2017) [7]. يحدث حمل الذروة في الصيف عادة وعندما تكون درجة حرارة الوسط المحيط عالية جداً. تكون كفاءة محطات توليد الطاقة الكهربائية في هذه الفترة منخفضة مقارنة بالأوقات الأخرى أيضاً. إن عملية العزل الحراري الجيدة للأبنية قد توفر 40% إلى 60% من حمل التبريد في هذه الأوقات، مما يُساعد على تخفيض حمل الذروة وبالتالي تخفيض الحاجة لتشغيل المحطات خلال هذه الفترة.

2-3-3-9 حماية البيئة Environment protection

تُشغل أجهزة تكييف الهواء بالطاقة الكهربائية الناتجة في هذه المناطق غالباً عن حرق الوقود الأحفوري. لذلك أي تخفيض في حمل التبريد نتيجة العزل سيؤدي إلى توفير في استهلاك الطاقة الكهربائية وبالتالي توفير في حرق الوقود وبالتالي المُساهمة في حماية البيئة.

2-3-4 تأثير موقع العزل الحراري على المباني Effect of position of the thermal insulation of buildings

تتميز المباني الطينية القديمة بتوفر جو داخلي مريح نسبياً في الفصول كافة. لقد تطورت في السنين الماضية مواد البناء، فقد أدخلت طرق بناء حديثة مثل الخرسانة المسلحة والطوب الأسمنتي المصمت والمفرغ والطوب الأحمر والزجاج والألومنيوم والحديد وغيرها. يتطلب من المهندس المعماري أثناء تصميم المباني العمل على توفير بيئة مريحة داخل المبني بصورة عامة، كما أنه مطلوب منه تحديد المكان المناسب لطبقة العزل الحراري في عناصر البناء والتي يُمكن أن تكون إما على السطح الخارجي أو الداخلي أو وسط العنصر.

2-3-4-1 العزل الحراري الخارجي External thermal insulation

يتم وضع طبقة العزل الحراري مع المواد اللازمة لحمايتها على السطح الخارجي لغلاف المبنى بالتالي يحمي البناء من تغير ظروف الوسط المحيط الخارجي. تلعب كتلة الغلاف الخارجي للبناء دور خزان طاقة بالإضافة إلى العناصر الداخلية وبالتالي يلزم زمن من أجل تدفئة أو تبريد المكان في بداية العملية. يناسب هذا النوع الأبنية التي يتم تدفئتها أو تبريدها بشكل مستمر مثل المنازل والمستشفيات.

2-3-4-2 العزل الحراري الداخلي Internal thermal insulation

يتم وضع طبقة العزل الحراري مع المواد اللازمة لحمايتها على السطح الداخلي لغلاف المبنى. تُستخدم هذه الطريقة في حال كان من غير الممكن استخدام العزل الخارجي. تُساعد هذه الطريقة في تسريع عملية تكييف هواء الفراغ الداخلي للمبنى شتاءً وصيفاً في بداية التشغيل، كما تُقلل هذه الطريقة من الطاقة اللازمة لتكييف هواء الفراغ الداخلي، مع وجود محذور واحد، هو وجوب التحكم بكمية الهواء المكيف، وعمل التحكم اللازم في الأبواب والنوافذ لمنع تسرب الهواء المكيف ومثل هذا النظام يُلائم المدارس والمكاتب.

2-3-4-3 العزل الحراري في وسط عنصر البناء Thermal insulation is in the center of building element

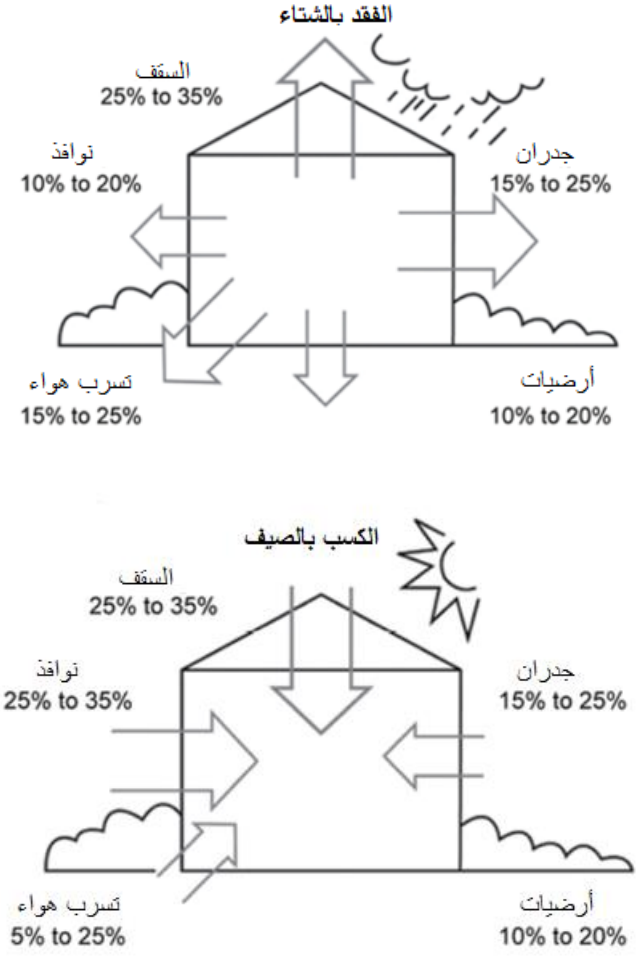
تطبق هذه الطريقة بشكل أساسي لعزل الجدران نظراً لسهولة التنفيذ وتحقيق شروط مناسبة من حيث الكلفة. ينتشر استخدام هذه الطريقة في المملكة العربية السعودية إن كان عن طريق عزل الجدران بالألواح العازلة أو استخدام بلوك مزود بطبقة عازلة في وسطه.

أوصى عبد الرحمن وأحمد [8] بتثبيت الطبقة العازلة خارج الجدار الخارجي في المملكة العربية السعودية. هناك دراسة أجريت في الظروف العادية على مبنى سكني في الرياض بواسطة Al-Sanea, S.A. and M.F. Zedan [9]. حيث قاموا بفحص ثلاث تكوينات للجدار: طبقات عزل مفردة ومزدوجة وثلاثية. تتكون هذه التكوينات من سماكة كتلة حرارية متغيرة ولكن نفس القيمة R الثابتة. أوضحت الدراسة أن الجدار المكون من ثلاث طبقات (2.6 cm لكل منها) عازل تم وضعه في الداخل والخارج والوسط من الجدار حقق الأداء الأمثل للطاقة. من ناحية أخرى، جاء الجدار المكون من طبقتين عازلة، حيث كان الجدار مكونًا من طبقتين (3.9 cm لكل منهما) من العزل في منتصف الجدار وخارجه في المرتبة الثانية. ثم

قارنوا الجدار المكون من طبقة واحدة من العزل بسمك 7.8 cm موضوعة داخل الجدار مع الجدار المكون من ثلاث طبقات عازلة والتي أظهرت انخفاضاً بنسبة 20% في ذروة حمل التبريد.

2-3-5 تثبيت وحماية المواد العازلة للحرارة Install and protect the thermal insulating materials

يُوضح الشكل 2-6 نسب الكسب أو الفقد الحراري في حالة بناء مُكيف ومُرشد لاستهلاك الطاقة عبر عناصر البناء المُختلفة في حالة الصيف والشتاء. لا بد من الاشارة إلى أن الشروط المناخية المُحيطة لها تأثير على هذه النسب. أيضاً من المهم الإشارة إلى أن هذه النسب تختلف بشكل كامل في حال كانت عناصر البناء غير معزولة. يُلاحظ من الشكل 2-6 أنه من الضروري عزل السقف والجدران نظراً للتأثير الكبير على الفقد أو الكسب الحراري. كما يُلاحظ أن نسبة حمل التبريد عبر النوافذ مُرتفعة بالصيف ولذلك لا بد من أخذ تدابير لتخفيض هذه النسبة. طبعاً استخدام نوافذ بمُعامل كسب ونفاذ حرارة مُنخفض هو الأساس في ذلك. كما يُعتبر استخدام ستائر خارجية وتخفيض مساحة النوافذ وزراعة أشجار من الجهات كافة عدا الشمالية من أهم الإجراءات الضرورية لذلك.



شكل 2-6. الفقد والكسب الحراري لمنزل مُرشد لاستهلاك الطاقة في الشتاء والصيف [10].

تلعب طرق تثبيت العازل الحراري دوراً هاماً في جودة عملية العزل الحراري. تختلف طرق تثبيت المواد العازلة طبقاً لنوعيتها وطبيعة ونوع عنصر البناء المُراد عزله (جدران – أسقف– أرضيات) وهناك طرق عديدة لتثبيت المواد العازلة يمكن إيجازها فيما يلي:

- ❖ التثبيت باستخدام المواد اللاصقة مثل الزفت والذي يُعتبر مادة لاصقة ومانع لانتقال الرطوبة.
- ❖ التثبيت الميكانيكي حيث لا يُفضل استخدام أوتاد تثبيت ناقلة للحرارة وإنما أوتاد ذات مُوصيلية حرارية مُنخفضة مثل البلاستيك والخشب.
- ❖ التثبيت بالرش حيث يتم فيها رش المادة العازلة فتتحول إلى فوم ينتفخ ليُشكل طبقة العازل.

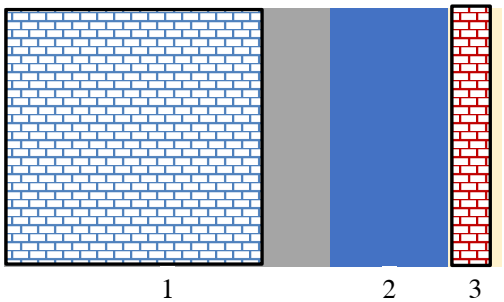
كما توجد إمكانية لعزل جدران الأبنية القائمة غير المعزولة والتي فيها فراغ هوائي بحشو العازل عبر جهاز ضخ دون الحاجة لعمل فتحات كبيرة في الجدار. يكتفي بفتحة بضع سنتيمترات في الجدار لضخ الحشوة العازلة في الفراغ الهوائي.

هناك توصيات عامة يجب إتباعها عند تخزين وتركيب المواد العازلة للحرارة:

- ❖ يجب تخزين المواد العازلة للحرارة قبل تركيبها في مكان جاف بعيداً عن المؤثرات والعوامل الجوية الخارجية المُحيطة.
- ❖ يجب عدم تركيب مواد عازلة للحرارة إلا بعد إتمام عمليات البناء فيما عدا مواد العازل الحراري التي تُعتبر جزء أساسي من عناصر المبنى فيتم تركيبها أثناء عملية التشييد.
- ❖ يجب أن تتم جميع أعمال السباكة والتركيبات الخاصة بأجهزة التكييف وكافة أعمال الكهرباء قبل البدء بعملية العزل الحراري.
- ❖ يجب التعامل مع المواد العازلة للحرارة عند تركيبها بحرص لكيلا يحدث بها أي تشققات.
- ❖ يجب حماية المادة العازلة للحرارة من تكثيف بخار الماء فيها وذلك باستخدام حواجز تمنع وصول الماء عند التركيب وأثناء الاستخدام.

6-3-2 العزل الحراري للجدران Thermal insulation of walls

لقد تم توضيح مكان تركيب العازل المُفضل على السطح الخارجي لعنصر البناء، مع ذلك أحياناً يضطر المُصمم إلى وضع العازل الحراري على السطح الداخلي للعنصر. يُمكن تركيب عازل حراري للمباني التي لم يسبق عزلها أثناء التشييد وذلك بإضافة طبقة من العازل الحراري على السطح الداخلي للجدران وتغليفها بطبقة حماية وديكور عادة من ألواح الخشب أو الجبس كما هو مُبين في الشكل 2-7.



1 طوب

2 عازل حراري

3 طبقة حماية وديكور

شكل 2-7. تركيب نظام عزل حراري لجدران البيوت من الداخل [4].

يتم حساب المقاومة الحرارية الكلية للجدار من العلاقة:

$$R_t = \sum_{j=1}^{n} R_j = \frac{1}{h_o} + \frac{S_1}{k} + \frac{S_{ins}}{k_{ins}} + \cdots + \frac{S_n}{k_n} + \frac{1}{h_i} \qquad 9-2$$

كما يتم حساب السيالة الحرارية النوعية، أي لكل $1\ m^2$ من مساحة الجدار من العلاقة 2−7 والتي يُمكن أن تُكتب كما يلي:

$$q = \frac{(T_o - T_i)}{R_t} \qquad 10-2$$

أحيانا يكون من المهم معرفة درجة الحرارة بين الطبقات للتأكد من تحمل المادة لهذه الدرجة. يتم حساب درجة الحرارة بين الطبقات (سطوح التماس بين الطبقات) بفرض أنه لا يوجد فراغات بينها من معادلة التوازن الحراري التالية لعنصر بناء مكون من ثلاث طبقات:

$$q = \frac{T_o - T_4}{R_o} = \frac{T_4 - T_3}{R_3} = \frac{T_3 - T_2}{R_2} = \frac{T_2 - T_1}{R_1} = \frac{T_1 - T_i}{R_i} \qquad 11-2$$

حيث:

R_t	$m^2.K/W$	المُقاومة الحرارية الكلية.
h_o	$W/m^2.K$	مُعامل انتقال الحرارة بالحمل لطبقة الهواء الخارجي – جدول 2−2.
h_i	$W/m^2.K$	مُعامل انتقال الحرارة بالحمل لطبقة الهواء الداخلي – جدول 2−3.
S	m	سمك الطبقة.
k	W/m.K	المُوصلية الحرارية لمواد البناء – جدول 2−1 والمواد العازلة – جدول 2−7.
T_o	°C	درجة حرارة الهواء خارج المبنى.
T_i	°C	درجة حرارة الهواء داخل المبنى.
R_o	$m^2.K/W$	مُقاومة انتقال الحرارية بالحمل على السطح الخارجي $1/h_o$
R_i	$m^2.K/W$	مُقاومة انتقال الحرارية بالحمل على السطح الداخلي $1/h_i$
T_1	°C	درجة حرارة السطح الداخلي.
T_2	°C	درجة حرارة السطح الفاصل بين الطبقة الأولى والثانية.
T_3	°C	درجة حرارة السطح الفاصل بين الطبقة الثانية والثالثة.
T_4	°C	درجة حرارة السطح الخارجي.
R_1	$m^2.K/W$	المُقاومة الحرارية للطبقة الأولى S_1/k_1
R_2	$m^2.K/W$	المُقاومة الحرارية للطبقة الثانية S_2/k_2
R_3	$m^2.K/W$	المُقاومة الحرارية للطبقة الثالثة S_3/k_3

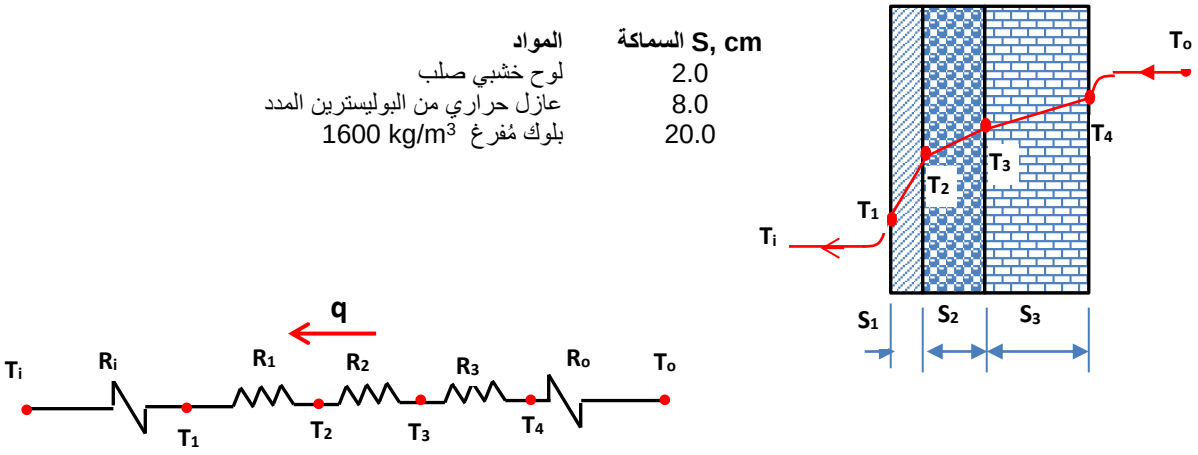
كما أنه يُمكن تعميم العلاقة لعنصر مكون من "n" طبقة بنفس الطريقة.

مثال 2−2: بفرض درجتي حرارة الهواء الداخلية لغرفة 25 °C والخارجية 45 °C وجدار الغرفة الخارجي بمساحة $12\ m^2$ يتكون من الطبقات المبينة في الشكل 2−8, علماً أن العازل الحراري من البولسترين المُمدد بكثافة $30\ kg/m^3$. البناء موجود على الساحل (سرعة الرياح عادة عالية). أحسب ما يلي:

1. المُقاومة الحرارية لكل طبقة من طبقات الجدار.

2. درجات الحرارة على الأسطح المُختلفة بين الطبقات.
3. السيالة الحرارية الكلية عبر جدار الغرفة.
4. ناقش النتائج.

المواد	السماكة S, cm
لوح خشبي صلب	2.0
عازل حراري من البوليسترين المدد	8.0
بلوك مُفرغ 1600 kg/m^3	20.0



شكل 2–8. رسم تخطيطي لجدار مكون من ثلاث طبقات مُتجانسة [4].

فيما يلي القيم اللازمة:

المواد	رقم الجدول	المُوصلية حرارية ((W/(m.K))
المُوصلية الحرارية للخشب	1–2	$k_{wood}= k_1= 0.16$ W/m.K
المُوصلية الحرارية للبلوك	1–2	$k_{Brick}= k_3= 0.80$ W/m.K
المُوصلية الحرارية للعازل الحراري	7–2	$k_{ins} = k_2= 0.036$ W/m.K
مُقاومة انتقال الحرارة بالحمل		
مُقاومة انتقال الحرارية بالحمل على السطح الداخلي	3–2	$R_i = 1/h_i = 0.13$ m^2.K /W
مُقاومة انتقال الحرارية بالحمل على السطح الخارجي	2–2	$R_o = 1/h_o = 0.03$ m^2.K /W

تم اختيار قيمتا مُعامل الحمل الحراري الخارجي (بناء على سرعة الرياح) والداخلي (حسب اتجاه انتقال الحرارة في الجدار)

حساب المقاومات الحرارية لكل طبقة:

$$R_1 = \frac{S_1}{k_1} = \frac{0.02}{0.16} = 0.125 \ \frac{m^2.K}{W}$$

$$R_2 = \frac{S_2}{k_2} = \frac{0.08}{0.036} = 2.222 \ \frac{m^2.K}{W}$$

$$R_3 = \frac{S_3}{k_3} = \frac{0.20}{0.8} = 0.25 \ \frac{m^2.K}{W}$$

1. درجات الحرارة بين الطبقات (بالاعتماد على المُوازنة الحرارية للطبقات والحمل الحراري على السطح الداخلي والخارجي):

تُعطى السيالة الحرارية النوعية (الحرارة المنتقلة لوحدة المساحة):

$$q = \frac{T_o - T_i}{\sum R} = \frac{45 - 25}{0.03 + 0.125 + 2.222 + 0.25 + 0.13} = 7.25 \ \frac{W}{m^2}$$

يتم تحديد درجة الحرارة بين الطبقات كما يلي:

$$q = \frac{T_o - T_4}{R_o} = \frac{T_4 - T_3}{R_3} = \frac{T_3 - T_2}{R_2} = \frac{T_2 - T_1}{R_1}$$

السيالة الحرارية النوعية المُنتقلة بالحمل الحراري على السطح الخارجي:

$$q = \frac{T_o - T_4}{R_o}$$

$$7.25 = \frac{45 - T_4}{0.03} \qquad T_4 = 44.78\ ^oC$$

السيالة الحرارية النوعية في الطبقة الثالثة:

$$q = \frac{T_4 - T_3}{R_3}$$

$$7.25 = \frac{44.78 - T_3}{0.25} \qquad T_3 = 42.97\ ^oC$$

السيالة الحرارية النوعية في الطبقة الثانية:

$$q = \frac{T_3 - T_2}{R_2}$$

$$7.25 = \frac{42.97 - T_2}{2.222} \qquad T_2 = 26.86\ ^oC$$

السيالة الحرارية في الطبقة الأولى:

$$q = \frac{T_2 - T_1}{R_1}$$

$$7.25 = \frac{26.86 - T_1}{0.125} \qquad T_1 = 25.95\ ^oC$$

2. تُعطى السيالة الحرارية الكلية عبر الجدار:

$$Q = q \times A = 7.25\ (3 \times 4) = 87\ W$$

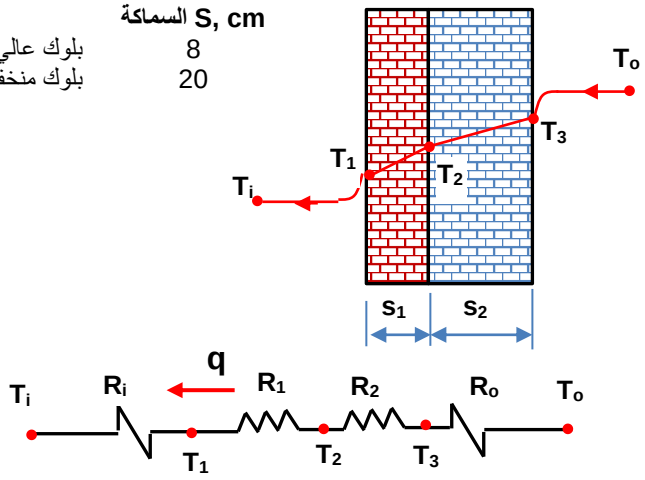
لقد تم حدوث انخفاض حاد في درجة الحرارة عبر الطبقة العازلة. لاحظ أن درجة حرارة سطح الجدار الداخلي قريبة من درجة حرارة الوسط الداخلي وقريبة من درجة حرارة سطح جسم الإنسان مما يُساعد ذلك على تأمين الراحة الحرارية. يجب أن يكون الفرق بين درجة حرارة السطح الداخلي ودرجة حرارة الهواء لتحقيق الراحة الحرارية أقل من 3 K.

يُساعد أيضاً العزل بعدم حدوث تكثّف لبخار الماء على السطح الداخلي في فصل الشتاء، مما يخفف من خطر حدوث تعفن واتلاف الطلاء على السطح الداخلي *(خصوصاً في المناطق الباردة)*.

مثال 2–3: فى فصل الصيف كانت درجتي الحرارة الداخلية والخارجية لمبنى 25 °C, 45 °C والبناء في وسط مدينة (سرعة الرياح منخفضة) وجدار المبنى يتكون من الطبقات المبينة في الشكل 2–9 بمساحة كلية 300 m^2. أحسب:

1. المقاومة الحرارية لكل طبقة والكلية للجدار.
2. السيالة الحرارية النوعية والكلية من المبنى.
3. إذا أضيفت طبقة من البوليوريثين مُتوسط الكثافة سمكها 10 cm بين طبقتي الجدار، أحسب نسبة التخفيض في السيالة الحرارية المنتقلة خلال الجدار.
4. ناقش النتائج.

المادة	السماكة S, cm
بلوك عالي الكثافة	8
بلوك منخفض الكثافة	20



شكل 2–9. رسم تخطيطى لجدار بطبقتين [4].

فيما يلي القيم اللازمة:

المواد	رقم الجدول	المُوصلية حرارية ((W/(m.K))
المُوصلية الحرارية للبلوك عالي الكثافة.	1–2	$k_{brick} = k_1 = 1.2$ W/m.K
المُوصلية الحرارية للبلوك منخفض الكثافة.	1–2	$K_{brick} = k_2 = 0.65$ W/m.K
المُوصلية الحرارية للعازل الحراري من البوليوريثين وكثافة متوسطة.	7–2	$k_{ins} = 0.033$ W/m.K
مُقاومة انتقال الحرارة بالحمل		
مُقاومة انتقال الحرارية بالحمل على السطح الداخلي, اصدارية عالية.	3–2	$R_i = 1/h_i = 0.13$ m^2.K /W
مُقاومة انتقال الحرارية بالحمل على السطح الخارجي, سرعة رياح منخفضة.	2–2	$R_o = 1/h_o = 0.08$ m^2.K /W

يتم حساب المقاومة الحرارية لكل طبقة:

$$R_1 = \frac{S_1}{k_1} = \frac{0.08}{1.2} = 0.07 \frac{m^2.K}{W}$$

$$R_2 = \frac{S_3}{k_3} = \frac{0.20}{0.65} = 0.31 \frac{m^2.K}{W}$$

1. تُعطى المُقاومة الحرارية الكلية للجدار دون عازل حراري:

$$R = R_i + R_1 + R_2 + R_o = 0.13 + 0.07 + 0.31 + 0.08$$
$$= 0.59 \ \frac{m^2.K}{W}$$

2. تُعطى السيالة الحرارية النوعي:

$$q1 = \frac{T_o - T_i}{\sum R} = \frac{45 - 25}{0.59} = 33.9 \ \frac{W}{m^2}$$

ومن فإن السيالة الحرارية الكلية عبر جدران المبنى:

$$Q1 = q1 \times A = 33.9 \times (300) = 10169.5 \ W$$

3. بعد إضافة العازل الحراري بين طبقتي الجدران: يتم حساب مقاومة انتقال الحرارة عبر الجدار والسيالة الحرارية عبر وحدة المساحة كما يلي:

$$R_{ins} = \frac{S_{ins}}{k_{ins}} = \frac{0.1}{0.033} = 3.03 \ \frac{m^2.K}{W}$$
$$q2 = \frac{T_o - T_i}{\sum R} = \frac{45 - 25}{0.13 + 0.07 + 3.03 + 0.31 + 0.08} = 4.71 \ \frac{W}{m^2}$$

نسبة التخفيض المئوية في انتقال الحرارة نتيجة إضافة 10cm من العازل الحراري:

$$\Delta q = \left(\frac{q_1 - q_2}{q_1}\right) = \left(\frac{33.9 - 4.71}{33.9}\right) = 0.86$$

4. لاحظ الانخفاض الكبير في السيالة الحرارية عبر الجدار نتيجة إضافة طبقة العازل الحراري. ستُصبح السيالة الحرارية الكلية من الجدران 1413 W. كما يُؤدي ذلك إلى فوائد صحية واقتصادية وبيئية.

مثال 2–4: جدار خارجي لغرفة حيث T_o = 47 °C وT_i = 25 °C في قلب مدينة الرياض في المملكة العربية السعودية مكون حسب الحالات التالية كما في الشكل 2–10:

1. خرسانة (بيتون) 25 cm مع تليسه (مونة اسمنتية) من الطرفين 2 cm.
2. بلوك 25 cm مع تليسه (مونة اسمنتية) من الطرفين 2 cm.
3. بلوك 10 cm من الطرفين مع وجود فراغ هوائي بينهما 5 cm وتليسه (مونة اسمنتية) من الطرفين 2 cm.
4. بلوك 10 cm من الطرفين مع طبقة عازل حراري بينهما بسماكة 5 cm من الصوف الصخري ذو الكثافة المتوسطة وتليسه (مونة اسمنتية) من الطرفين 2 cm.
5. بلوك 10 cm من الطرفين مع طبقة عازل حراري بينهما وتليسه (مونة اسمنتية) من الطرفين 2 cm والمطلوب تحديد سماكة العازل كي يحقق القيم المطلوبة في الكود السعودي لحفظ الطاقة في المباني المنزلية.

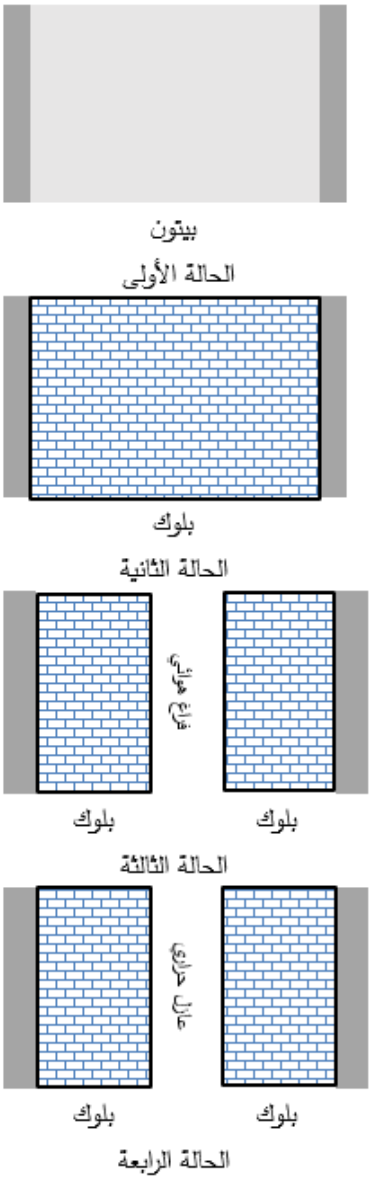
والمطلوب في جميع الحالات:

حدد مُعامل انتقال الحرارة في الحالات الأربعة.

حدد سماكة العازل في الحالة الخامسة.

بفرض أن:

- ❖ البلوك خفيف جداً
- ❖ البناء في قلب مدينة الرياض فهو يتعرض لرياح بسرعة منخفضة.
- ❖ كثافة الصوف الصخري مُتوسطة يتم أخذ القيمة المُتوسطة للمُوصيلية الحرارية.
- ❖ انبعاثية السطوح الداخلية عالية.



شكل 2-10. مخطط توضيحي لجدار متعدد الحالات.

فيما يلي القيم اللازمة:

المواد	رقم الجدول	المُوصيلية حرارية ((W/(m.K))
المُوصلية الحرارية للخرسانة	1-2	$k_{concrete}$= 2.1 W/m.K
المُوصلية الحرارية للبلوك	1-2	k_{brick}= 0.65 W/m.K
المُوصلية الحرارية للمونة الاسمنتية	1-2	k_{mortar} = 0.72 W/m.K
المُوصلية الحرارية للعازل الحراري	7-2	k_{ins} = 0.04 W/m.K
مُقاومة انتقال الحرارة بالحمل		
مُقاومة انتقال الحرارية بالحمل على السطح الداخلي	3-2	$R_i = 1/h_i = 0.13\ m^2.K\ /W$
مُقاومة انتقال الحرارية بالحمل على السطح الخارجي	2-2	$R_o = 1/h_o = 0.08\ m^2.K\ /W$

يُعطى مُعامل انتقال الحرارة الكلي بالعلاقة:

$$U = \frac{1}{R_t}$$

حيث المُقاومة الكلية عبر الجدار:

$$R_t = \sum_{j=1}^{n} R_j = \frac{1}{h_o} + \frac{S_1}{k} \dots + \frac{S_n}{k_n} + \frac{1}{h_i}$$

بالتعويض بالنسبة للحالة الأولى:

$$R_t = \sum_{j=1}^{n} R_j = 0.08 + \frac{0.02}{0.72} + \frac{0.25}{2.1} + \frac{0.02}{0.72} + 0.13 = 0.38 \frac{m^2.K}{W}$$

بالتعويض بالنسبة للحالة الثانية:

$$R_t = \sum_{j=1}^{n} R_j = 0.08 + \frac{0.02}{0.72} + \frac{0.25}{0.65} + \frac{0.02}{0.72} + 0.13 = 0.65 \frac{m^2.K}{W}$$

بالتعويض بالنسبة للحالة الثالثة (وجود الفراغ الهوائي):

$$R_t = \sum_{j=1}^{n} R_j = 0.08 + 2\frac{0.02}{0.72} + 2\frac{0.1}{0.65} + 0.18 + 0.13 = 0.75 \frac{m^2.K}{W}$$

بالتعويض بالنسبة للحالة الرابعة (استخدام عازل بدلاً من الفراغ الهوائي):

$$R_t = \sum_{j=1}^{n} R_j = 0.08 + 2\frac{0.02}{0.72} + 2\frac{0.1}{0.65} + \frac{0.05}{0.04} + 0.13 = 1.82 \frac{m^2.K}{W}$$

ومنه مُعامل انتقال الحرارة الكلي في الحالات الأربع:

U_1 = 2.60 W/ m².K

U_2 = 1.54 W/ m².K

U_3 = 1.33 W/ m².K

U_4 = 0.548 W/ m².K

أيضاً يتم استخدام نفس العلاقة من أجل تحديد سماكة العازل اللازم لتحقيق كود حفظ الطاقة السعودي [3] بحيث يتم وضع قيمة مُعامل انتقال الحرارة الكلي للجدران في المنطقة 1 حسب الجدول 2-6.

U_5 = 0.342 W/ m².K

$$\frac{1}{0.342} = \sum_{j=1}^{n} R_j = 0.08 + 2\frac{0.02}{0.72} + 2\frac{0.1}{0.65} + \frac{S_{ins}}{0.04} + 0.13$$

بحل المُعادلة يتم الحصول على السماكة الصُغرى التي تحقق شروط كود حفظ الطاقة:

$S_{ins} = 0.098\ m \approx 10\ cm$

ملحوظة: نلاحظ تأثير العزل الإيجابي في عملية الحد من الكسب الحراري كما أننا نجد أن الخرسانة سيئة من ناحية العزل الحراري وثقيلة الوزن أيضا وذلك نتيجة المقارنة بين U في الحالة الأولى والثانية حيث أن البلوك كان أكثر فائدة، كما أننا نجد أنه لابد من استخدام العوازل من أجل الحصول على تحقيق شروط كود حفظ الطاقة السعودي [3]. بفرض عدم استخدام عازل سيكون سماكة الجدار حوالي 2 m من البلوك لتحيق شروط كود حفظ الطاقة السعودي بينما مع استخدام العازل 0.34 m.

ملحوظة: بما أن الخرسانة لها مُوصلية حرارة تقريباً ثلاث أضعاف البلوك. مما يجعل استخدامها في المباني دون عازل حراري غير مريح للإنسان ويُؤدي إلى ارتفاع في فترة وقدرة تشغيل أجهزة التكييف مما ينتج عنه زيادة الأعباء المادية. برزت أهمية استخدام العزل الحراري للمباني لما في ذلك من آثار إيجابية على تقليل عدد ساعات تشغيل أجهزة التكييف وتقليل القدرة، وبالتالي تقليل الاستهلاك في الطاقة الكهربائية. يجب أن نذكر هنا أنه من الضروري من أجل حماية المباني من الزلازل والأمان استخدام الخرسانة.

2-3-7 العزل الحرارى للأسقف Thermal insulation of roofs

يجب عزل الأسقف حرارياً في المناطق الحارة نظراً لتعرض السقف أغلب أوقات النهار لأشعة الشمس خصوصاً في فصل الصيف، حيث تكون أشعة الشمس تقريباً رأسية على السطوح الأفقية. لذلك تم اعتماد قيم مُعامل انتقال حراري كلي للسقف في كود حفظ الطاقة السعودي أقل بحوالي 40% من قيم مُعامل انتقال الحرارة عبر الجدران الخارجية [3]. يُوضح الشكل 2-11 صورة لعزل سقف بناء كلية الهندسة في جامعة القصيم (المملكة العربية السعودية). لقد تم حماية طبقة العازل الحراري من تأثير الإشعاع الشمسي بطبقة من البحص.

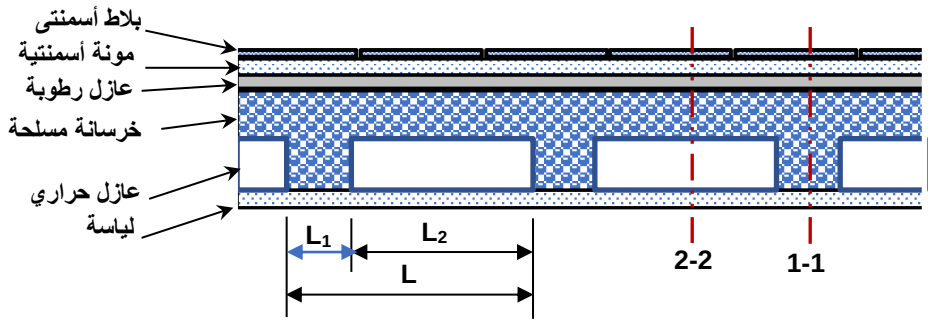
يتم حساب مُعامل انتقال الحرارة الكلي للأسقف باعتبارها عناصر غير مُتجانسة التركيب بتقسيمها الى عدة مساحات مُتجانسة حيث إن المقاومة الحرارية لمكونات هذه العناصر تختلف من مقطع إلى أخر كما هو الحال في السقف غير المتجانس (الهوردي) المُبين في الشكل 2-12. يُحسب مُعامل انتقال الحرارة الكلي لكل مساحة على حدة ثم يتم حساب مُعامل انتقال الحرارة الكلي المكافئ من العلاقة:

شكل 2−11. العازل الحراري فوق العازل المائي لسطح كلية الهندسة بجامعة القصيم عام 2012 [4].

$$U = \frac{U_1A_1 + U_2A_2}{A} \qquad 12-2$$

حيث:

U_1	$W/m^2.K$	مُعامل انتقال الحرارة الكلى للمقطع 1−1
U_2	$W/m^2.K$	مُعامل انتقال الحرارة الكلى للمقطع 2−2
A_1	m^2	نسبة مساحات الجزء الذي مقطعة 1−1 من السطح الكلي
A_2	m^2	نسبة مساحات الجزء الذي مقطعة 2−2 من السطح الكلي



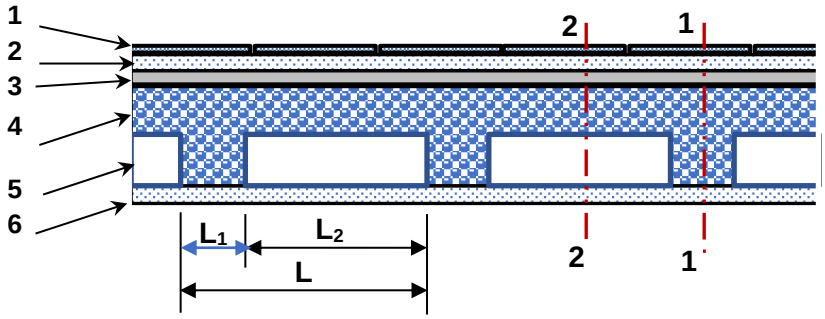
شكل 2−12. مقطع في سقف غير مُتجانس الطبقات (هوردي) [4].

مثال 2−5: سقف طابق أخير لبناء موجود داخل إحدى المُدن في حالة الصيف وانبعاثيه السطح عالية وفق المعلومات كما هو مُبين في الشكل 2−13. بفرض أن $L = 1\ m,\ L_1 = 0.3\ m,\ L_2 = 0.7\ m$ وأنه مُتجانس في كل مقطع ونسبة توزيع المساحات في السطح مثل الأطوال المُوضحة، احسب مُعامل انتقال الحرارة الكلي للسقف.

الطبقات المكونة للسقف كالتالي:

رقم الطبقة	المادة	رقم الجدول	المُوصلية الحرارية	المقطع 1−1	المقطع 2−2
			(W/(m.K))	(cm) S	(cm) S

.1	بلاط	1–2	1.0	2	2
.2	مونة أسمنتية	1–2	0.72	2.5	2.5
.3	عازل رطوبة (بيتومين)	1–2	0.17	0.2	0.2
.4	خرسانة	1–2	2.1	20	10
.5	عازل حراري من الستريوبور	2–7	0.036	–	10
.6	لياسة (مونة اسمنتية)	1–2	0.72	2	2



شكل 2–13. مقطع في سقف أحد الأبنية [4].

مُعامل الحمل الحراري

مُقاومة انتقال الحرارة بالحمل	توضيح	رقم الجدول	القيمة
على السطح الداخلي	انتقال الحرارة للأسفل نظراً لأنه في الصيف	3–2	$R_i = 1/h_i = 1/5.9 = 0.17\ m^2.K\ /W$
على السطح الخارجي	وسط إحدى المُدن – سرعة رياح منخفضة	2–2	$R_o = 1/h_o = 1/12 = 0.08\ m^2.K\ /W$

تحديد مساحة كل مقطع من السقف (باعتبار السطح موزع بنفس النسبة):

$$A = L \times W = 1 \times 1 = 1.0\ m^2$$

$$A_1 = L_1 \times W = 0.3 \times 1 = 0.3\ m^2$$

$$A_2 = L_2 \times W = 0.7 \times 1 = 0.7\ m^2$$

حساب مُعامل انتقال الحرارة الكلى للمقطع 1–1:

$$U_1 = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{S_1}{k_1} + \frac{S_2}{k_2} + \frac{S_3}{k_3} + \frac{S_4}{k_4} + \frac{S_6}{k_6} + \frac{1}{h_i}}$$

$$= \frac{1}{0.08 + \frac{0.02}{1.0} + \frac{0.025}{0.72} + \frac{0.002}{0.17} + \frac{0.2}{2.1} + \frac{0.02}{0.72} + 0.17} = 5.33\ \frac{W}{m^2K}$$

حساب مُعامل انتقال الحرارة الكلى للمقطع 2–2:

$$U_2 = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{S_1}{k_1} + \frac{S_2}{k_2} + \frac{S_3}{k_3} + \frac{S_4}{k_4} + \frac{S_5}{k_5} + \frac{S_6}{k_6} + \frac{1}{h_i}}$$

$$= \frac{1}{0.08 + \frac{0.02}{1.0} + \frac{0.025}{0.72} + \frac{0.002}{0.17} + \frac{0.1}{2.1} + \frac{0.1}{0.036} + \frac{0.02}{0.72} + 0.17} = 0.343 \ \frac{W}{m^2K}$$

حساب مُعامل انتقال الحرارة الكلي المُتوسط من المعادلة (2−12):

$$U = \frac{U_1A_1 + U_2A_2}{A} = \frac{5.33(0.3) + 0.343(0.7)}{1} = 1.84 \ \frac{W}{m^2K}$$

يُلاحظ ارتفاع قيمة مُعامل انتقال الحرارة الكلي المُتوسط بشكل كبير نتيجة وجود 30% من السقف غير معزول. لا يحقق هذا السقف متطلبات كود العزل الحراري في السعودية ودبي ($U_{max,KSA} = 0.273$ W/m^2 K, $U_{max,Dubai} = 0.300$ W/m^2 K), كما أن القسم المعزول لا يحقق المُتطلبات, مما يعني ضرورة عزل السقف بعازل بسماكة أكبر مما هو مُستخدم.

مثال 2−6: بافتراض تعرض مبنى سكني إلى سرعة متوسطة بالصيف. احسب مُعامل انتقال الحرارة الكلي U لسطح الأفقي في الحالات التالية:

- طبقة خرسانية مفردة k = 2.1 W/m K لسقف بسمك x = 0.15 m يهمل تأثير طبقة التليسة.
- سقف أفقي من طبقتين خرسانة بنفس المادة وسمك كل منهما.
- سقف أفقي من طبقتين خرسانة بنفس المادة والسماكة مع وجود فراغ هوائي بينهما سماكة 0.05 m.
- سقف أفقي من طبقتين خرسانة وبينهما عازل حراري (صوف زجاجي، كثافة متوسطة) بسمك 0.05 m
- تحديد سماكة العزل الحراري (نفس العازل) لتحقيق كود حفظ الطاقة السعودي المطلوب في منطقة القصيم.

المواد	رقم الجدول	المُوصلية حرارية ((W/(m.K))
خرسانة	1−2	2.1
عازل حراري (الصوف الزجاجي متوسط الكثافة)	7−2	0.040

مُقاومة انتقال الحرارة بالحمل	توضيح	رقم الجدول	القيمة
على السطح الداخلي	انتقال الحرارة للأسفل نظراً لأنه في حالة الصيف	3−2	$R_i = 1/h_i = 1/5.9 = 0.17 m^2.K/W$
على السطح الخارجي	سرعة رياح منخفضة	2−2	$R_o = 1/h_o = 1/20 = 0.05 m^2.K/W$

يُعطى مُعامل انتقال الحرارة الكلي للسقف بطبقة واحدة في W/(m^2 K):

$$U_1 = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{x_1}{k_1} + \frac{1}{h_i}} = \frac{1}{0.05 + \frac{0.15}{2.1} + 0.17} = 3.43 \ \frac{W}{m^2K}$$

يُعطى مُعامل انتقال الحرارة الكلي للسقف بطبقتين في W/(m^2 K):

$$U_2 = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{x_1}{k_1} + \frac{x_2}{k_2} + \frac{1}{h_i}} = \frac{1}{0.05 + \frac{0.15}{2.1} + \frac{0.15}{2.1} + 0.17} = 2.76\ \frac{W}{m^2K}$$

يُعطى مُعامل انتقال الحرارة الكلي للسقف بطبقتين مع فراغ هوائي (W/(m^2 K:

$$U_3 = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{x_1}{k_1} + Ra + \frac{x_2}{k_2} + \frac{1}{h_i}} = \frac{1}{0.05 + \frac{0.15}{2.1} + 0.21 + \frac{0.15}{2.1} + 0.17} = 1.746\ \frac{W}{m^2K}$$

يُعطى مُعامل انتقال الحرارة الكلي للسقف بطبقتين مع عازل حراري من الصوف الصخري بنفس سماكة الفراغ الهوائي W/(m^2 K):

$$U_4 = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{x_1}{k_1} + \frac{x_{ins}}{k_{ins}} + \frac{x_2}{k_2} + \frac{1}{h_i}} = \frac{1}{0.05 + \frac{0.15}{2.1} + \frac{0.05}{0.040} + \frac{0.14}{2.1} + 0.17} = 0.632\ \frac{W}{m^2K}$$

يتم تحديد سماكة العزل المطلوب لتحقيق كود حفظ الطاقة السعودي في منطقة القصيم (المنطقة المناخية 1 حسب الجدول 2–6 هي 0.202 W/m2 K) [3]:

$$U_{cod} = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{x_1}{k_1} + \frac{x_{ins}}{k_{ins}} + \frac{x_2}{k_2} + \frac{1}{h_i}} = 0.202\ \frac{W}{m^2K}$$

$$0.202\frac{W}{m^2K} = \frac{1}{0.05 + \frac{0.15}{2.1} + \frac{x}{0.040} + \frac{0.15}{2.1} + 0.17} = \frac{1}{0.363 + \frac{x}{0.041}}$$

$x = 0.188$ m

لاحظ أنه لا يكفي إضافة عازل بسماكة 5cm لتحقيق كود حفظ الطاقة السعودي [3]، ولكن يجب أن يكون حوالي 19 cm.

مثال 2–7: افترض أن مواصفات السقف كما في الشكل 2–13 والمبنى الخاص بك حسب الشروط الواردة في المثال 5–2، مُعامل انتقال الحرارة الإجمالي 1.84 W /(m2 K). بافتراض أن T_i = 25 °C و T_o = 49 °C، والمبنى معرض لسرعة رياح منخفضة. افترض البيانات اللازمة للحل.

- ❖ هل سقف منزلك مقبول لكود السعودية للحفاظ على الطاقة [3]؟
- ❖ احسب مُعدل انتقال الحرارة الكلي من منزلك عبر السقف بوحدة (W).
- ❖ ما هي سماكة العازل الواجب إضافته إلى السطح لتحقيق الكود السعودي للحفاظ على الطاقة في منطقتك؟
- ❖ احسب مُعدل انتقال الحرارة من منزلك عبر الجدران والسقف من خلال تحقيق الكود السعودية للحفاظ على الطاقة في منطقتك بوحدة (kW).

لاحظ أن قيمة مُعامل انتقال الحرارة الكلي 1.84 W/ (m^2 K) أكبر من قيمة كود حفظ الطاقة السعودية (على سبيل المثال بالنسبة لحائل في المنطقة 2 هي U_{cod} = 0.238 W/ m^2 K). يتم حساب معدل الانتقال الحراري عبر السقف حسب المعادلة 2–6 بافتراض مساحة السطح $15 \times 15 = 225$ m^2

$$Q = U \times A \times (T_o - T_i) = 1.84 \times 225 \times (49 - 25) = 9936 \text{ W}$$

تُعطى سماكة العازل الواجب إضافته إلى السطح لتحقيق الكود السعودي للحفاظ على الطاقة في حائل:

$$U_{cod} = \frac{1}{\frac{1}{U} + \frac{x_{ins}}{k_{ins}}} = 0.238 \frac{W}{m^2 K}$$

$$0.238 \frac{W}{m^2 K} = \frac{1}{\frac{1}{1.84} + \frac{x}{0.036}} = \frac{1}{0.543 + \frac{x}{0.036}}$$

$$x = 0.13 \text{ m}$$

يتم حساب مُعدل انتقال الحرارة عبر الجدران والسقف من خلال تحقيق الكود السعودية للحفاظ على الطاقة كما يلي:

$$Q = U_{cod,roof} \times A_{roof} + U_{cod,wall} \times A_{wall} \times (T_o - T_i) = (0.238 \times 225 + 0.397 \times 306) \times (24) = 4201 \text{ W}$$

بافتراض أن ارتفاع المبنى المكون من طابقين 6 أمتار ونسبة النوافذ 15% من مساحة الجدران الخارجية.

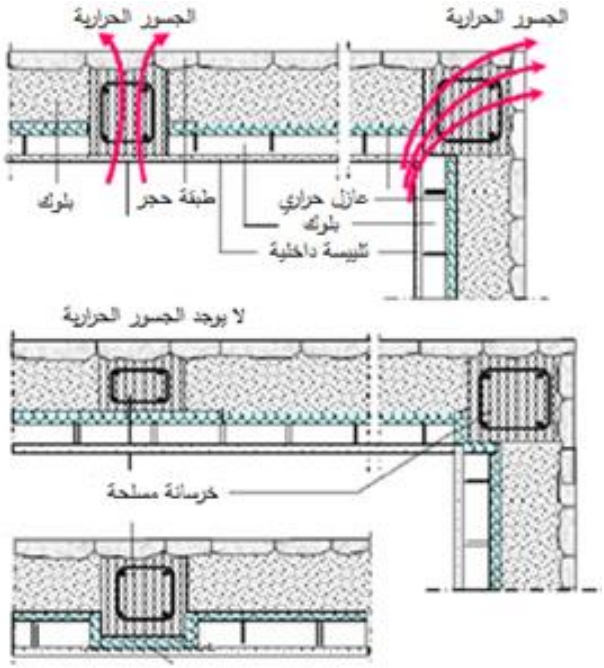
لاحظ أن مُعدل انتقال الحرارة من سقف وجدران المبنى، إذا استوفت الشروط المطلوبة بالكود، يكون حوالي 42% من مُعدل انتقال الحرارة للسقف الذي لا يتوافق مع الكود السعودي للحفاظ على الطاقة.

2–4 الجسور الحرارية Thermal bridges

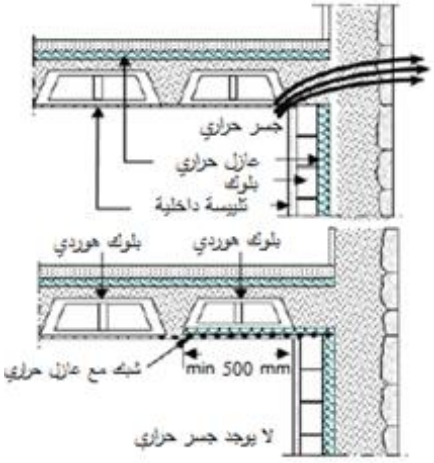
تُعرف الجسور الحرارية بأنها المناطق من عناصر البناء ذات المقاومة المنخفضة لتبادل الحرارة. كما يحدث ذلك في مناطق الخرسانة المسلحة أو عندما تكون سماكة الجدار قليلة. يحدث الجسر الحراري أيضاً في البناء حول الأبواب والنوافذ وأي مساحات غير محكمة الاغلاق في عناصر البناء. غالباً لا يتم معالجة الجسور الحرارية في الأبنية ويتم إهمال هذا الخطر، علماً أن التخلص من هذه الظاهرة ليس صعباً. تتعرض سطوح العناصر الإنشائية التي يتشكل فيها جسور حراري لخطر التشققات وتكاثف بخار الماء على السطح الداخلي وبالتالي إمكانية تشكل العفن ونزع الدهان وتقليل عمر المبنى.

كيف تتجنب الجسور الحرارية؟

يمكن تجنب الجسور الحرارية بتركيبة هيكلية مناسبة وعزل الجسور الحرارية القائمة. يُبين الشكل 2–14 جسور حرارية في منطقة تلاقي جدارين مع بعض أو امتداد جدار عند عامود والحل المُقترح لمعالجة هذا الجسور الحرارية. كما يُبين الشكل 2–15 حسور حرارية في مناطق تلاقي جدار خارجي مع سقف والحل المُقترح لمعالجة هذه الجسور الحرارية.

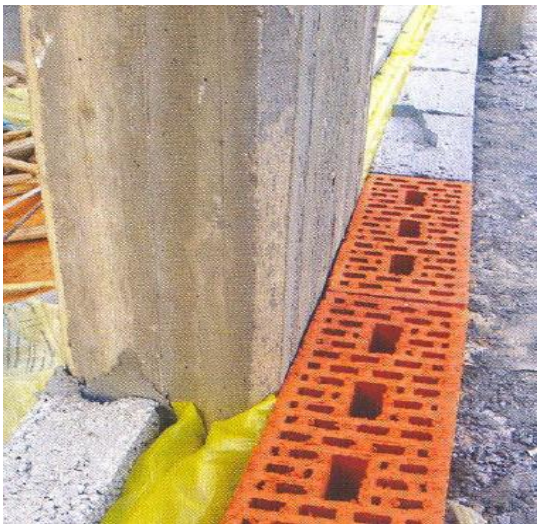


شكل 2–14. الجسور الحرارية في الجدران وطرق معالجتها [11].



شكل 2–15. الجسور الحرارية بين جدران وسقف وطرق معالجتها [11].

يُوضح الشكل 2–16 صورة لكيفية عزل جدار خارجي بطبقة عازل وسط الجدار، علماً أنه يحصل في هذه الطريقة جسر حراري حول عمود الخرسانة رغم وجود البلوك الأحمر. كما أنه يحتاج إلى سماكة كبيرة من البلوك الأحمر لمنع حدوث جسر حراري. تُعتبر عملية تغطية الجدار الخارجي بأكمله بطبقة مستمرة من العزل الحراري، على سبيل المثال ألواح البولسترين من الحلول الفعالة والآمنة كما في الشكل 2–17. يجب الاهتمام بهذه المشكلات ليس فقط لتوفير الطاقة وتقليل التكاليف ولكن أيضاً لزيادة عمر المبنى.



شكل 2-16. صورة لكيفية عزل جدار خارجي بطبقة عازلة وسط الجدار [4].

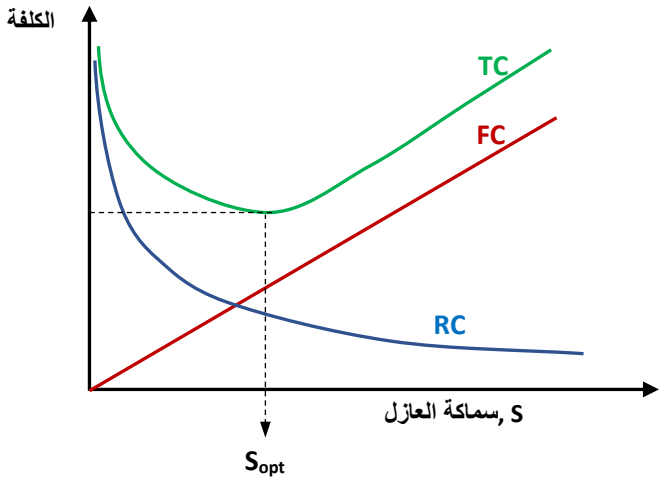
شكل 2-17. صورة لواجهة بناء معزول بشكل كامل [4].

2-5 اقتصادية العزل الحرارى Economic of thermal insulation

تُعتبر عملية العزل الحراري للأبنية من الاستثمارات الضرورية، لأن تكلفة العزل الحراري للمبنى (التكاليف الثابتة FC) يتم توفيرها واستعادتها من خلال خفض تكاليف استهلاك الطاقة الكهربائية (فاتورة الكهرباء الشهرية وتعرف بالتكاليف المتغيرة RC) في مدة محدودة، علماً بأن تكاليف العزل الحراري لا تتجاوز 5 إلى 6% من تكلفة البناء الكلية. يُلاحظ من الشكل 2-18 أن تكاليف العازل تزيد بزيادة سمك العازل بينما التكاليف المتغيرة تقل كلما زاد سمك العازل. كما تنخفض التكاليف الكلية TC بزيادة سمك العازل حتى تصل الى قيمة صغرى وتزيد بعدها التكلفة الكلية مع زيادة سمك العازل. تُمثل هذه الحالة المُوضحة بالشكل سماكة العازل المثالية S_{opt} من الناحية الاقتصادية وليس الأفضل من الناحية الفنية. في كثير من الحالات يكون المطلوب شروط فنية (سماكة عزل) أكبر من السماكة المثالية إقتصادياً، كما هو في كود حفظ الطاقة السعودي [3].

حدد [12] وقت الاسترداد رأس المال للعزل الحراري بأقل من عامين عن طريق تقليل قيم مُعامل انتقال الحرارة الكلي لجدار من 1.76 إلى 0.57 $W/m^2 K$، في المباني السكنية في قطر. أفادت دراستين [6, 13] أن قيمة فترة استرداد رأس المال بين 2.2–6.8 سنة و 10–15 سنة، على التوالي في المباني السكنية في منطقة القصيم، المملكة العربية السعودية. لاحظ أن هناك خلافاً بين قيم فترة الاسترداد. يُمكن أن تكون الأسباب سعر وحدة الطاقة ونوع مواد العزل وتكلفة العمالة والأهم من ذلك الشروط المطلوب تحقيقها من عملية العزل (مُعامل انتقال الحرارة المطلوب) وأخيراً تاريخ الدراسة.

يساهم العزل الحراري فى خفض تكاليف استهلاك الكهرباء "فاتورة الكهرباء الشهرية" بنسبة تتراوح بين 30 و50%. لذلك يُعتبر العزل الحراري من الضروريات في عالم البناء الحديث. كما أن جميع مواد وأنظمة العزل الحراري تتمتع بقدرات متفاوتة على عزل الصوت ما يسهم كثيراً في الحد من الضجيج داخل المبنى.



شكل 2–18. الكلفة الثابتة والمتغيرة والكلية للعزل الحراري [4].

8-2 المراجع العلمية References

1. Y. A. Cengel and M.A. Boles, Thermodynamics An Engineering Approach 8ed. 2015, New York: McGraw-Hill.
2. Theodore L. Bergman, et al., Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 2011: John Wiley & Sons.
3. Saudi Building Energy Conservation Code-Residential SBC 602; https://www.sbc.gov.sa/En/BuildingCode/Pages/SBC_602E.aspx 2018: Riyadh, KSA. p. 64.
4. Almasri, R., et al., Building Energy and Environment. 2017, Saudi Arabia: Qassim University Publications Center ISBN 978-603-8176-53-5 2017.
5. Schramek, E.-R. and e. al, Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, ed. 73. 2007, Germany: Oldenbourg Industrieverlag München.
6. Esmaeil, K.K., M.S. Alshitawi, and R.A. Almasri, Analysis of energy consumption pattern in Saudi Arabia's residential buildings with specific reference to Qassim region. Energy Efficiency, 2019. 12(8): p. 2123-2145.
7. Annual Statistical Booklet for Electricity and Seawater Desalination Industries, https://www.ecra.gov.sa/en-us/MediaCenter/doclib2/Pages/SubCategoryList.aspx?categoryID=5. 2017. p. 162-162.
8. Abdelrahman, M.A. and A. Ahmad, Cost-effective use of thermal insulation in hot climates. Building and Environment, 1991. 26(2): p. 189-194.
9. Al-Sanea, S.A. and M.F. Zedan, Improving thermal performance of building walls by optimizing insulation layer distribution and thickness for same thermal mass. Applied Energy, 2011. 88(9): p. 3113-3124.
10. 10. https://solarabic.com/reports/2020/07/%D9%8B%D8%A3%D9%82%D9%84-%D8%B9%D8%B4%D8%B1-%D9%85%D8%AD%D8%B7%D8%A7%D8%AA-%D8%B4%D9%85%D8%B3%D9%8A%D8%A9-%D9%83%D9%84%D9%81%D8%A9-lcoe/. 2020 [25 August 2020].
11. Baradiy, S., Jordan Thermal Insulation Buildings Atlas. 2014, iproplan® Planungsgesellschaft mbH Beratende Ingenieure und Architekten, bundesministerium für wirtschaftliche zusammenarbeit und entwicklung, DEG Deutsche Investitions- und Entwicklungsgesellschaft mbH,: Germany. p. 369
12. Kharseh, M., M. Al-Khawaja, and F. Hassani, Comparison between different measures to reduce cooling requirements of residential building in cooling-dominated environment. Energy and Buildings, 2015. 88: p. 409-412.
13. Almasri, R.A., et al., Exergy and Economic Analysis of Energy Consumption in the Residential Sector of the Qassim Region in the Kingdom of Saudi Arabia. 2020. 12(7): p. 2606.
14. Thermal insulation market distribution in Saudi Arabia in 2015 and 2021, by type, https://www.statista.com/statistics/741422/saudi-arabia-thermal-insulation-market-share-by-type/#statisticContainer