

Analiza termiczna w warunkach pożaru

Pole temperatury

Poradnik SectionPro · Nieustalone profile temperatury
w przekroju poddanym działaniu ognia, metodą elementów skończonych

BridgeKernel · 2026

I Wprowadzenie

Sprawdzenie przekroju żelbetowego w warunkach pożaru opiera się przede wszystkim na znajomości temperatury w każdym punkcie przekroju po zadanym czasie ekspozycji, na przykład 30, 60, 90 lub 120 minut. Ten przestrzenny rozkład, czyli pole temperatury, rządzi dalszym ciągiem obliczeń: bezpośrednio z niego wynika spadek wytrzymałości betonu i stali, a następnie resztkowa nośność przekroju. Stanowi ono jednak samodzielny etap termiczny, który SectionPro rozwiązuje i przedstawia niezależnie od sprawdzenia mechanicznego.

Niniejszy artykuł ogranicza się do tego etapu termicznego. Przypomina jego podstawy, opisuje model przyjęty w SectionPro, a następnie porównuje wyniki z referencyjnymi profilami z Załącznika A normy EN 1992-1-2.

Zagadnienie termiczne

Nieustalone przewodzenie ciepła w przekroju podlega nieliniowemu równaniu przewodnictwa ciepła:

$$\rho(\theta) \cdot c_p(\theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda(\theta) \nabla \theta)$$

Właściwości cieplne betonu zmieniają się wraz z temperaturą. Przewodność cieplna $\lambda(\theta)$ maleje monotonicznie, podczas gdy ciepło właściwe $c_p(\theta)$ wykazuje wyraźny pik w okolicy 115 °C, związany z odparowaniem wody wolnej, tym większy, im wyższa jest zawartość wilgoci. Pik ten pochłania znaczną część strumienia i wyraźnie opóźnia postęp frontu cieplnego ku wnętrzu przekroju.

Na powierzchniach nagrzewanych strumień netto łączy konwekcję i promieniowanie:

$$\dot{h}_{\text{net}} = \underbrace{\alpha_c (\theta_g - \theta_m)}_{\text{konwekcja}} + \underbrace{\Phi \varepsilon_m \sigma \left[(\theta_g + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4 \right]}_{\text{promieniowanie}}$$

gdzie θ_g jest temperaturą gazów (krzywa pożarowa), θ_m — temperaturą powierzchni, $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ oraz $\varepsilon_m = 0.7$ (wartości domyślne, regulowane). Powierzchnie nienagrzewane przyjmuje się jako adiabatyczne ($\partial\theta/\partial n = 0$).

Znormalizowana krzywa pożarowa ISO 834 określa temperaturę gazów:

$$\theta_g = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8t + 1) \quad [t \text{ w min}]$$

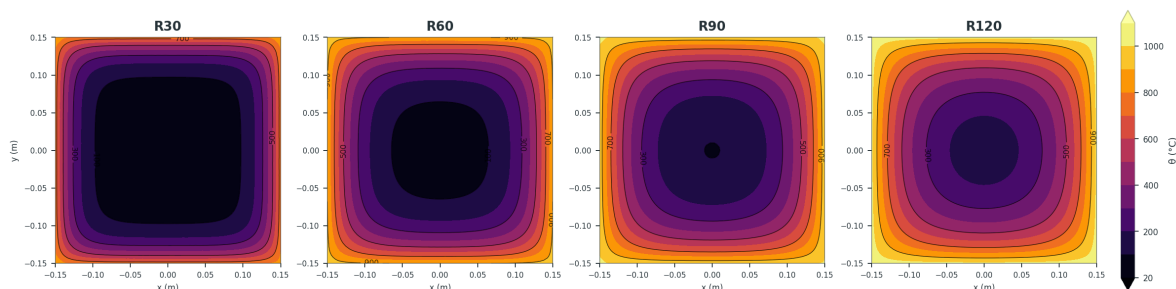
Równania te wprowadzają kilka parametrów: krzywą pożarową, prawa $\lambda(\theta)$ i $c_p(\theta)$ materiału oraz współczynniki wymiany ciepła na powierzchni. Przyjmują one domyślnie wartości z EN 1992-1-2 i pozostają modyfikowalne na wejściu.

Pole temperatury w SectionPro

SectionPro rozwiązuje pole temperatury dla przekroju o dowolnym kształcie — pełnego, drażonego lub złożonego z kilku materiałów — bez ograniczania się do stabilizowanych geometrii normowych. Jego główne możliwości:

- **Krzywe pożarowe.** ISO 834 (pożar znormalizowany), węglowodorowa, zewnętrzna lub krzywa zdefiniowana przez użytkownika w postaci punktów czas-temperatura.
- **Ekspozycja na poszczególnych powierzchniach.** Każda powierzchnia jest nagrzewana lub nie, niezależnie od pozostałych. Belka zabetonowana w płycie ma trzy powierzchnie nagrzewane, przy czym górna pozostaje adiabatyczna; słup ma ich cztery.
- **Zabezpieczenia.** Warstwę ochronną można zdefiniować dla każdej powierzchni z osobna (grubość d_p , przewodność λ_p , gęstość ρ_p , ciepło właściwe $c_{p,p}$): płyty gipsowe, natryskowe powłoki ochronne lub materiały izolacyjne. Jej opór cieplny wchodzi do warunku brzegowego.
- **Materiały i geometria.** Beton z kruszywem krzemianowym lub wapiennym, zawartość wilgoci, gęstość oraz granica przewodności są regulowane. Przekrój może zawierać otwory i pustki, strefy wielomateriałowe oraz zatopione pręty stalowe.

Dla każdej żądanej chwili czasowej otrzymuje się pełne pole temperatury: mapę izoterm, temperatury w zbrojeniu oraz wielkości zbiorcze (maksymalną temperaturę przy powierzchni, temperaturę średnią, temperaturę w rdzeniu). Dane te służą następnie jako wejście do obliczenia nośności resztkowej, które będzie przedmiotem kolejnego artykułu.



Rysunek 1: Przykład pola temperatury obliczonego przez SectionPro: słup 300×300 nagrzewany z czterech stron, izotermi dla czasów R30 / R60 / R90 / R120.

Walidacja według Załącznika A normy EN 1992-1-2

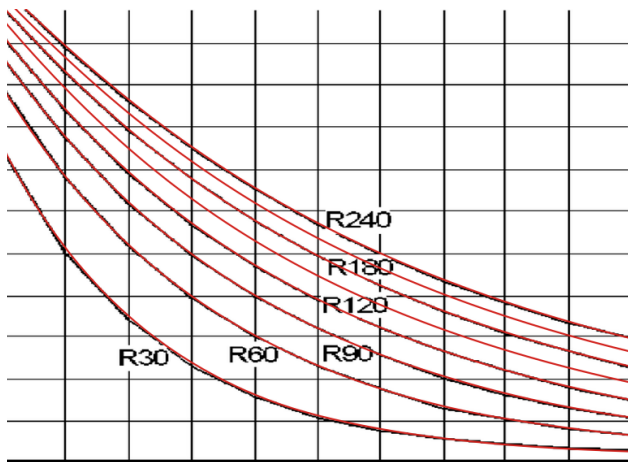
Załącznik A normy EN 1992-1-2 podaje referencyjne profile temperatury dla typowych przekrojów wystawionych na pożar znormalizowany ISO 834: płyta (Fig A.2), belki (Fig A.3 do A.10) oraz słupy

(Fig A.11 do A.20). Profile te ustalono dla zawartości wilgoci 1,5% oraz dolnej granicy przewodności. To właśnie te założenia przyjmujemy jako wzorzec walidacji.

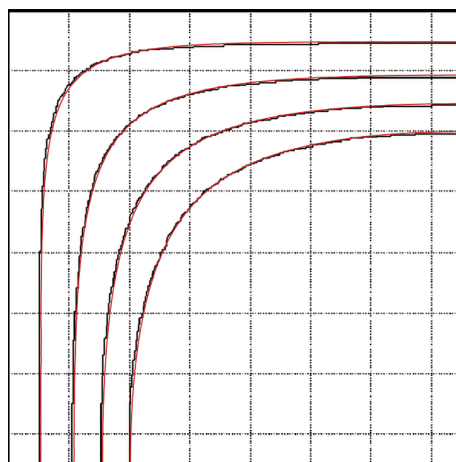
Dwie reprezentatywne dla normy geometrie odtworzono przy tych samych założeniach: płyta, przypadek jednowymiarowy nagrzewany z jednej strony, oraz słup nagrzewany z czterech stron, dla którego norma podaje bezpośrednio położenie izotermy 500 °C wyznaczającej granicę betonu uznawanego za nośny. Na każdym wykresie izotermy obliczone przez SectionPro, na czerwono, nałożono na profile opublikowane w Załączniku A, na czarno, wykreślone w tym samym układzie współrzędnych. Porównanie dotyczy zatem bezpośrednio tych samych krzywych.

— EN 1992-1-2, Załącznik A — SectionPro

Przepływ ciepła w płycie pozostaje niemal jednowymiarowy od powierzchni nagrzewanej, podczas gdy słup rozwija pole podwójnie symetryczne, którego zimny rdzeń kurczy się w miarę wydłużania ekspozycji.



Rysunek 2: Płyta $h = 200$ mm nagrzewana od spodu, od R30 do R240 (głębokość 0 do 100 mm na osi odciętych, temperatura na osi rzędnych).

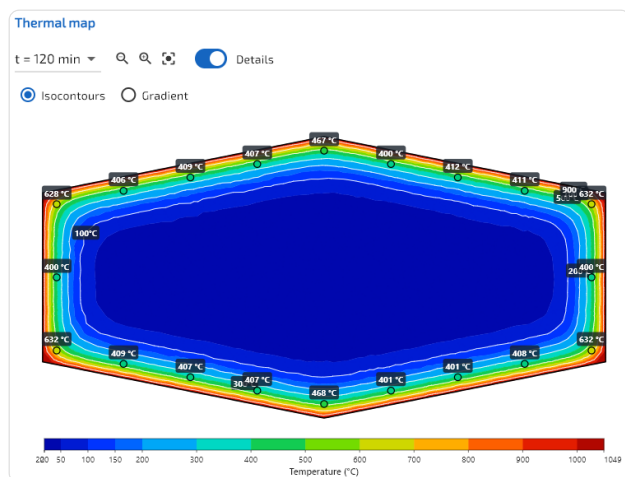


Rysunek 3: Słup 300×300 , izoterma 500 °C dla R30, R60, R90 i R120 (ćwiartka przekroju, 0 do 150 mm boku).

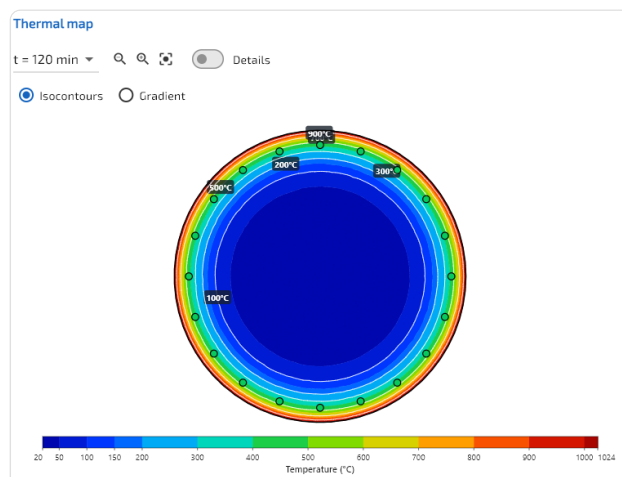
Podsumowanie walidacji. Dla płyty, referencyjnego przypadku jednowymiarowego, obliczony profil pokrywa się z profilem z Fig A.2 na całym zakresie użytecznych otulin, aż do rdzenia. Dla słupa nagrzewanego z czterech stron położenie izotermy 500 °C jest zgodne z normą dla każdego czasu. Solver termiczny zostaje w ten sposób zwalidowany dla obu tych konfiguracji ekspozycji.

Przykład zastosowania

Poza kształtami stablicowanymi w normie SectionPro obsługuje dowolną geometrię. Dwa poniższe przykłady — przekrój sześciokątny i przekrój kołowy — są nagrzewane na całym obwodzie.



Rysunek 4: Przekrój sześciokątny, pole temperatury przy $t = 120$ min. Tryb „Details,” wyświetla temperatury w zbrojeniu (znaczniki): zimny rdzeń centralny, gorące naroża przy powierzchni.



Rysunek 5: Przekrój kołowy nagrzewany na całym obwodzie, izotermy przy $t = 120$ min. Kontury odniesienia (100, 200, 300, 500 i 900 °C) wykreślono na biało.

Wydajność

Obliczenie pola temperatury jest niemal natychmiastowe: poniżej sekundy, również dla najdłuższych czasów odporności ogniowej. Czasy zmierzone dla przypadków walidacyjnych zestawiono poniżej.

Przekrój	Powierzchnie	Symulowany czas	Czas obliczeń
Belka 300×160	3	R90 (3 chwile czasowe)	0,12 s
Słup 300×300	4	R120 (4 chwile czasowe)	0,35 s
Belka 600×300	3	R120 (4 chwile czasowe)	0,52 s
Płyta 200	1	R240 (8 chwil czasowych)	0,57 s

Eksport

Pole temperatury eksportuje się jako obraz (mapa izoterm, w motywie jasnym lub ciemnym), w formacie CSV (współrzędne węzłów, temperatury węzłowe w każdej chwili, temperatury zbrojenia) oraz w notce obliczeniowej PDF generowanej przez SectionPro. Chwile wyjściowe są dowolne, równomierne lub wybierane pojedynczo, co pozwala precyzyjnie celować w wymagane czasy odporności ogniowej R30, R60, R90 i R120.

Podsumowanie

Pole temperatury stanowi podstawę każdego sprawdzenia w warunkach pożaru. SectionPro oblicza je za pomocą nieustalonej analizy elementami skończonymi, rozwiązując nieliniowe równanie przewodnictwa ciepła, które sprzęga zależną od temperatury przewodność cieplną, ciepło właściwe z pikiem wilgotnościowym oraz promieniowanie w θ^4 , dla dowolnej geometrii i ekspozycji zdefiniowanej dla każdej powierzchni z osobna, wraz z zabezpieczeniami. Prawa materiałowe i krzywa pożarowa przyjmują tam domyślnie wartości z EN 1992-1-2, modyfikowalne na wejściu.

Porównanie z profilami z Załącznika A potwierdza to podejście: obliczony profil pokrywa się z referencją w jednowymiarowym przypadku płyty, a położenie izotermy 500 °C w słupie nagrzewanym

z czterech stron jest zgodne z normą dla każdego czasu. Otrzymane w ten sposób pole dostarcza wiarygodnej podstawy do obliczenia resztkowej nośności przekroju w sytuacji pożarowej.