

Analiza nośności słupów stalowych o przekrojach klasy 4 w warunkach pożaru według EN 1993-1-2 oraz prEN 1993-1-2

An analysis of the load capacity of steel columns with class 4 cross-sections under fire conditions according to EN 1993-1-2 and prEN 1993-1-2

mgr inż. Tomasz Mąka, dr inż. Łukasz Polus (ORCID: 0000-0002-1005-9239),
dr inż. Marcin Chybiński (ORCID: 0000-0003-2539-7764), Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu,
Politechnika Poznańska

DOI: 10.5604/01.3001.0054.1310

Streszczenie: Publikacja drugiej generacji Eurokodów spodziewana jest do 2026 r. Uwzględnia ona najnowsze rezultaty badań i rozszerza zakres istniejącego pakietu norm. Modyfikacje dotyczą również normy EN 1993-1-2. W artykule przeanalizowano nośność słupów stalowych o przekrojach klasy 4 w warunkach pożaru według normy EN 1993-1-2 oraz projektu nowej wersji normy prEN 1993-1-2 w celu przedstawienia kluczowych zmian. W pracy porównano również nagrzewanie słupów wg krzywej standardowej oraz na podstawie krzywej otrzymanej z modelu pożaru strefowego w programie OZone.

Słowa kluczowe: druga generacja Eurokodów, słupy stalowe o przekrojach klasy 4, pożar.

Abstract: The second generation of Eurocodes is expected to be published by 2026. It integrates new findings from research and extends existing suite scope. The evolution also concerns EN 1993-1-2 standard. In this paper the load-bearing capacity of steel columns with class 4 cross-sections in fire conditions was analysed based on the EN 1993-1-2 standard and the prEN 1993-1-2 draft to demonstrate key changes. Furthermore, the column heating according to the standard curve and the curve obtained from the zone fire model in the OZone program was also compared.

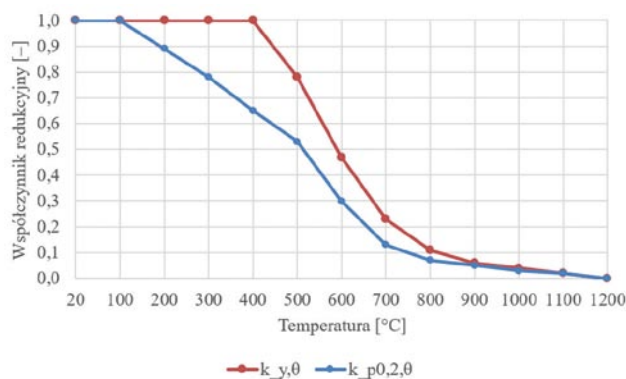
Keywords: second generation of Eurocodes, steel columns with class 4 cross-sections, fire.

1. Wprowadzenie

Publikacja ostatniego zeszytu pakietu norm drugiej generacji Eurokodów spodziewana jest do 2026 r. Obecnie trwają konsultacje projektów nowych wersji norm. Zmiany dotyczą również normy EN 1993-1-2 [1] i zostały zawarte w projekcie prEN 1993-1-2 [2]. Niedawno wydane książki [3–6] dotyczące projektowania konstrukcji stalowych w warunkach pożaru nie zawierają informacji związanych z planowanymi zmianami. Wcześniejsze prace, takie jak artykuły [7, 8], odnoszą się do obliczeń elementów stalowych w warunkach pożaru według pierwszej generacji Eurokodów. Ważne jest zatem rozpoczęcie dyskusji nad proponowanymi zmianami, aby odpowiednio się na nie przygotować. Artykuł poświęcono elementom ściskanym o przekroju klasy 4. Oceniono nośność ogniową i czas odporności ogniowej słupów stalowych o przekrojach klasy 4, korzystając z obecnie obowiązującej normy [1] oraz projektu nowej wersji normy prEN 1993-1-2 [2].

W obecnie obowiązującej normie sposób obliczeń elementów o przekrojach klasy 4 został zawarty w załączniku E. Wykonując obliczenia wg algorytmu z tego załącznika można (dla elementów o niewielkim wyężeniu) otrzymać temperaturę krytyczną wyższą niż 350°C [9]. Jednak w uwadze 2 punktu 4.2.3.6 normy [1] wprowadzono informacje o granicznej wartości

temperatury krytycznej dla elementów o przekrojach klasy 4: „The limit Θ_{crit} may be chosen in the National Annex. The value $\Theta_{crit} = 350^\circ\text{C}$ is recommended”. Stąd przyjmuje się temperaturę krytyczną równą 350°C dla elementów o przekrojach klasy 4. Projekt drugiej generacji normy [2] nie zawiera załącznika E. Zasady projektowania elementów o przekrojach klasy 4 zostały wprowadzone zaraz po zasadach projektowania elementów o przekrojach klas 1–3. W projekcie nowej normy zaproponowano, żeby temperatura krytyczna równa 350°C była temperaturą domyślną. Pozostawienie zapisu o temperaturze krytycznej równej 350°C może jednak budzić wątpliwość, czy będzie można dla elementów o przekrojach klasy 4 przyjmować wyższą wartość temperatury krytycznej niż 350°C. Jednak gdyby nie wprowadzono tego zapisu, to każdy element o przekroju klasy 4 wymagałby dokładnych i czasochłonnych obliczeń ze względu na konieczność wyznaczania przekroju efektywnego. Treść uwagi 2 z projektu normy [2] podkreśla, że 350°C ma być domyślną temperaturą krytyczną. Zapis ten może oznaczać, że wartość tą będzie można przyjmować dla elementów o przekrojach klasy 4 bez skomplikowanych i czasochłonnych obliczeń. Algorytm obliczeń dla elementów o przekrojach klasy 4 z prEN 1993-1-2 [2] może dać możliwość wyznaczenia wyższej temperatury krytycznej dla tych elementów [10]. W planowanej nowej wersji normy brakuje jednak zapisu, który potwierdziłby, że będzie



Rys. 1. Porównanie współczynników redukcyjnych

można przyjąć temperaturę krytyczną wyższą niż 350°C, gdy wykona się dokładne obliczenia. Taki zapis ograniczałby ostatecznie kontrowersje, które mogą wynikać z interpretacji tej uwagi.

W projekcie nowej wersji normy [2] w celu wyznaczenia nośności w warunkach pożarowych elementów o przekrojach klasy 4 stosuje się współczynnik redukcyjny granicy plastyczności $k_{y,\theta}$, który stosowany jest również dla klas 1–3. W obecnie obowiązującej normie dla elementów o przekrojach klasy 4 przyjmowany jest współczynnik redukcyjny $k_{p0,2,\theta}$, który dla temperatury większej niż 100°C ma mniejszą wartość niż współczynnik $k_{y,\theta}$ (rys. 1).

W obliczeniach według projektu nowej normy [2] efektywne pole przekroju A_{eff} wyznacza się ponownie w warunkach pożarowych i jest ono inne niż w warunkach normalnych. Zmiana efektywnego pola jest związana z nowym wzorem służącym obliczaniu wartości współczynnika redukcyjnego ścianki ściskanej ρ . W obliczeniach według obecnie obowiązującej normy [1] pole efektywne wyznaczone dla warunków normalnych można było wykorzystać podczas wyznaczania nośności w warunkach pożarowych.

W celu oceny wpływu proponowanych zmian na nośność ogniową słupów ściskanych osiowo o przekrojach klasy 4 wykonano obliczenia dla słupów o różnym stopniu wyłączenia według obecnie obowiązującej normy [1] oraz projektu jej nowej wersji [2]. Oceniono również wpływ sposobu modelowania rozwoju temperatury w słupach, który w pracy [11] został uznany za istotny. W tym celu słupy nagrzewano zarówno w pożarze standardowym, jak i strefowym pomieszczenia biurowego.

2. Analiza nośności ogniowej słupów w pożarze standardowym

Analizie poddano słupy osiowo ściskane o wysokości 3,5 m wykonane ze stali S355 [12]. Każdy z analizowanych słupów zaprojektowano z dwuteownika IPE 500, który był przekrojem klasy 4. Słupy różniły się wyłączeniem w warunkach normalnych, które wynosiło 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 oraz 100%. Założono, że współczynniki długości na wyboczenie w obu płaszczyznach wynoszą 1,0. Wykorzystano uproszczony

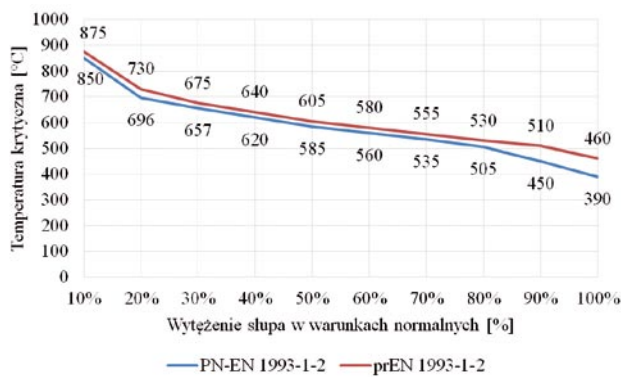
model obliczeniowy dla wydzielonego elementu. Nie uwzględniano nierównomiernego nagrzewania elementów [13], zmiany warunków zamocowania na końcach elementów [14] oraz nie oceniano, czy możliwe jest wydłużenie termiczne elementów bez ograniczeń [15]. Przyjęto kategorię obciążenia B (pomieszczenia biurowe) oraz założono, że udział obciążenia stałego oraz zmiennego w obciążeniu słupa w warunkach normalnych wynosi odpowiednio 40% oraz 60%. Obliczenia każdego słupa składały się z kilku etapów. Na początku wyznaczono przekrój efektywny słupa oraz nośność jego przekroju. Następnie określono nośność elementu. Po wyznaczeniu nośności słupa na wyboczenie określono siłę ściskającą odpowiadającą danemu wyłączeniu, a następnie określano jaka jej część stanowi obciążenie stałe oraz zmienne słupa w warunkach normalnych. Następnie wyznaczono obciążenie słupa w warunkach pożarowych dla kombinacji wyjątkowej. W kolejnym etapie obliczono temperaturę krytyczną metodą iteracyjną, którą wykorzystuje się podczas analizy elementów narażonych na zjawiska niestateczności takich jak słupy czy belki [16, 17]. Następnie wyznaczono czas odporności ogniowej, uwzględniając nagrzewanie słupów w pożarze standardowym. W przypadku obliczeń według projektu nowej wersji normy [2] uwzględniono zmianę pola przekroju efektywnego w warunkach pożarowych. Porównanie obliczonych parametrów dla słupa o wyłączeniu 100% w warunkach normalnych przedstawiono w tabeli 1. Mniejsze pole efektywne uzyskano na podstawie obliczeń według projektu nowej wersji normy [2]. Jednak ze względu na mniejszą redukcję granicy plastyczności (większy współczynnik redukcyjny) temperatura krytyczna i czas odporności ogniowej były wyższe, gdy wykonano obliczenia według projektu nowej wersji normy [2]. Dla słupów o mniejszym wyłączeniu temperatura krytyczna i czas odporności ogniowej były również wyższe, gdy wykonano obliczenia według prEN 1993-1-2 (rys. 2 i 3).

3. Analiza nośności ogniowej słupów w pożarze strefowym

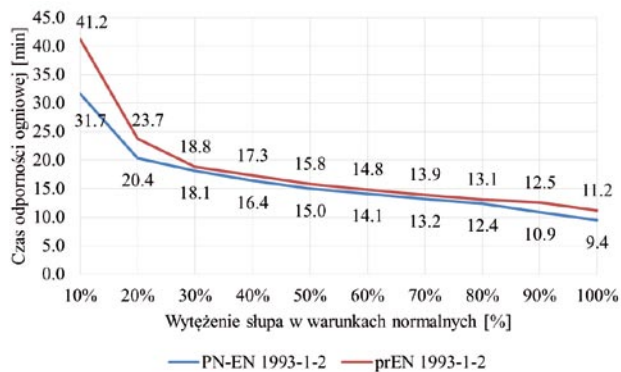
Analizie nośności ogniowej w pożarze strefowym poddano słupy, których nośność ogniową oceniono wcześniej w pożarze

Tabela 1. Porównanie obliczonych parametrów wg EN 1993-1-2 [1] oraz prEN 1993-1-2 [2] dla słupa o wyłączeniu 100% w warunkach normalnych

Parametr	EN 1993-1-2 (a)	prEN 1993-1-2 (b)	(a)/(b)
Pole efektywne A_{eff}	108,76 cm ²	93,66 cm ²	1,16
Współczynnik wyboczenia względem osi z $\chi_{n,z}$	0,491	0,436	1,13
Współczynnik redukcyjny $k_{p0,2,\theta}$ lub $k_{y,\theta}$	0,663	0,868	0,76
Temperatura krytyczna	390°C	460°C	0,85
Czas odporności ogniowej	9 min 26 sec	11 min 10 sec	0,83



Rys. 2. Zależność temperatura krytyczna – wyłężenie w warunkach normalnych (porównanie wyników otrzymanych na podstawie [1] oraz [2])

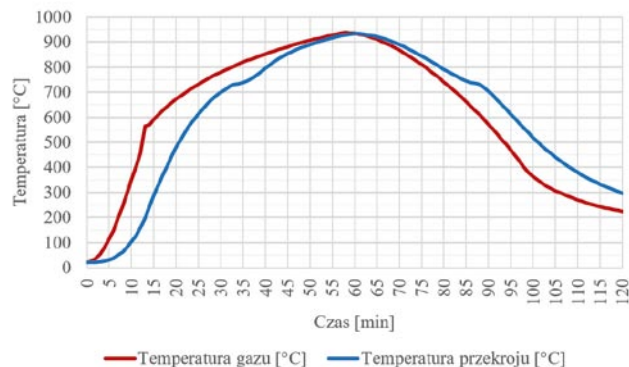
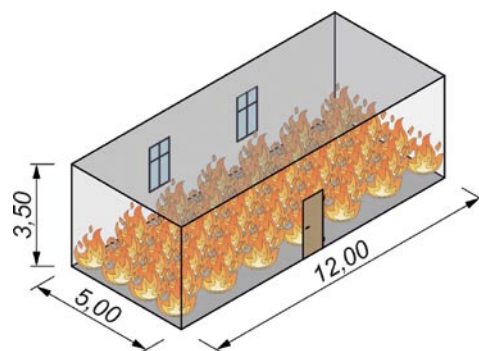


Rys. 3. Zależność czas odporności ogniowej – wyłężenie w warunkach normalnych (porównanie wyników otrzymanych na podstawie [1] oraz [2])

standardowym. Uwzględniono temperatury krytyczne słupów wyznaczone według EN 1993-1-2 oraz prEN 1993-1-2. Pożar strefowy pomieszczenia biurowego został zamodelowany w programie OZone [18]. W programie można modelować pożar dwustrefowy, jednostrefowy oraz sytuację, w której pożar dwustrefowy rozwija się do jednostrefowego po rozgorzeniu [19]. Pomieszczenie biurowe miało plan prostokąta o wymiarach 5,0x12,0 m, a wysokość pomieszczenia wynosiła 3,5 m (rys. 4).

Wejście do pomieszczenia (0,9x2,0 m) znajdowało się na środku dłuższej ściany, natomiast na przeciwległej ścianie uwzględniono dwa otwory okienne 0,9x1,5 m. Wymiary pomieszczenia spełniały wymagania dla modeli jedno- i dwustrefowych opisane w pracy [20], dotyczące nieskomplikowanej geometrii, niewielkiej powierzchni oraz małej wysokości. Zarówno strop nad, jak i pod pomieszczeniem przyjęto jako monolityczny żelbetowy o grubości 20,0 cm. Ściany wykonano z bloczków z betonu komórkowego o grubości 24,0 cm. Obliczeniowa gęstość obciążenia ogniowego (519,2 MJ/m²) została ustalona w programie, biorąc pod uwagę wartość fraktyla 80% charakterystycznej gęstości obciążenia ogniowego (511 MJ/m²), współczynniki uwzględniające ryzyko pojawienia się pożaru ($\delta_{q1} = 1,27$, $\delta_{q2} = 1,00$), współczynnik korekcyjny uwzględniający czynne środki ochrony przeciwpożarowej ($\delta_n = 1,00$)

Rys. 4. Pomieszczenie biurowe, dla którego zamodelowano pożar strefowy



Rys. 5. Krzywa temperatury gazu oraz krzywa temperatury słupa stalowego dla pożaru strefowego modelowanego w programie OZone

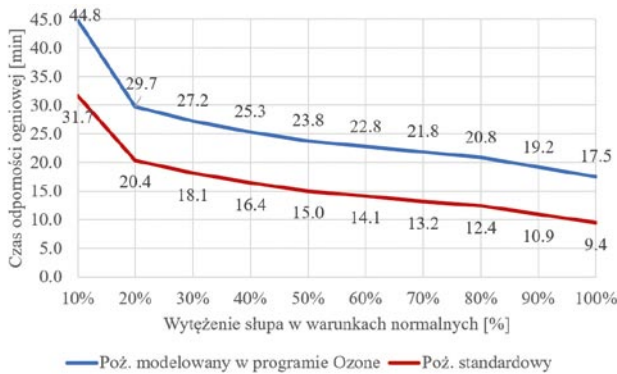
oraz współczynnik spalania ($m = 0,8$). Krzywe temperatury gazu oraz temperatury słupa stalowego otrzymane z programu OZone przedstawiono na rysunku 5.

Zależność czasu odporności ogniowej od wyłężenia w warunkach normalnych dla słupów nagrzewanych w pożarze standardowym oraz w pożarze strefowym, których temperatury krytyczne ustalono wg EN 1993-1-2 [1] oraz prEN 1993-1-2 [2] przedstawiono na rysunkach 6 oraz 7.

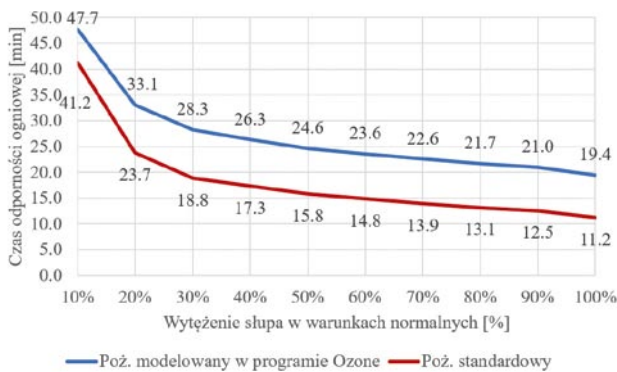
Czas odporności ogniowej słupa, którego temperaturę krytyczną ustalono według obecnie obowiązującej normy [1] w pożarze strefowym, był od 1,4 (przy wyłężeniu 10%) do 1,9 (przy wyłężeniu 100%) razy dłuższy niż w pożarze standardowym (rys. 6). W przypadku słupa, którego temperaturę krytyczną ustalono według prEN 1993-1-2 [2], czas odporności ogniowej w pożarze strefowym był od 1,2 (przy wyłężeniu 10%) do 1,7 (przy wyłężeniu 100%) razy dłuższy niż w pożarze standardowym (rys. 7).

4. Podsumowanie

Projekt nowej wersji normy do obliczania elementów stalowych w warunkach pożaru – prEN 1993-1-2 [2] zawiera zmiany, które wpływają na obliczenia elementów stalowych w warunkach pożaru. W artykule poddano analizie zmiany dotyczące ściskanych osiowo słupów stalowych o przekrojach klasy 4. W projekcie nowej wersji normy nie ma załącznika E dotyczącego obliczeń elementów klasy 4. Zasady projektowania elementów o przekroju klasy 4 zostały wprowadzone do głównej części normy zaraz po zasadach projektowania elementów



Rys. 6. Zależność czasu odporności ogniowej – wyłączenie w warunkach normalnych dla słupów nagrzewanych w pożarze standardowym oraz w pożarze strefowym, których temperatury krytyczne ustalono według EN 1993-1-2 [1]



Rys. 7. Zależność czasu odporności ogniowej – wyłączenie w warunkach normalnych dla słupów nagrzewanych w pożarze standardowym oraz w pożarze strefowym, których temperatury krytyczne ustalono według prEN 1993-1-2 [2]

o przekrojach klas 1–3. W projekcie nowej wersji normy dla klasy 4 założono stosowanie współczynnika redukcyjnego granicy plastyczności $k_{y,0}$ zamiast współczynnika redukcyjnego $k_{p0,2,\theta}$. W obliczeniach według projektu nowej normy wyznacza się ponownie współczynnik redukcyjny ścianki ściskanej ρ , co wpływa na zmianę efektywnego pola przekroju A_{ef} . Porównując obliczenia prowadzone według EN 1993-1-2 [1] oraz prEN 1993-1-2 [2] zauważono, że wartość pola efektywnego jest mniejsza, gdy korzysta się z projektu normy [2]. Większa jest za to wartość współczynnika redukcyjnego granicy plastyczności. Temperatura krytyczna słupa osiowo ściskanego wyznaczona według prEN 1993-1-2 była od 1,03 do 1,18 razy większa niż obliczona według EN 1993-1-2. Czas odporności ogniowej słupa osiowo ściskanego w pożarze standardowym wyznaczony według prEN 1993-1-2 był od 1,04 do 1,30 razy większy niż obliczony według EN 1993-1-2.

W artykule porównano również nagrzewanie słupów w pożarze standardowym oraz strefowym pomieszczenia biurowego. Czas odporności ogniowej słupa, w pożarze strefowym był 1,4–1,9 (dla temperatur krytycznych wyznaczonych według [1]) oraz 1,2–1,7 (dla temperatur krytycznych wyznaczonych według [2]) razy dłuższy niż w pożarze standardowym. Podsumowując, projekt nowej wersji normy [2] zawiera zasady

obliczeń elementów o przekrojach klasy 4 w swojej głównej części. W przypadku obliczeń według projektu nowej wersji normy [2] otrzymano nieznacznie większą temperaturę krytyczną i czas odporności ogniowej niż dla obliczeń na podstawie obecnie obowiązującej normy [1]. Po wprowadzeniu drugiej generacji Eurokodów opisane w pracy różnice mogą prowadzić do mniejszego zużycia środków ochrony przeciwpożarowej i związanych z tym oszczędności finansowych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] EN 1993-1-2:2005: Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design
- [2] Draft prEN 1993-1-2:2022, Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design
- [3] Turkowski P., Sulik P., Projektowanie konstrukcji stalowych z uwagi na warunki pożarowe według Eurokodu 3. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa, 2015
- [4] Gwóźdź M., Suchodoła M., Bezpieczeństwo pożarowe budowlanych konstrukcji metalowych. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2016
- [5] Kurzawa Z., Polus Ł., Szumigala M., Stany graniczne i odporność pożarowa elementów stalowych według Eurokodu 3. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2016
- [6] Maślak M., Trwałość pożarowa stalowych konstrukcji prętowych. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2008
- [7] Maślak M., Ocena odporności ogniowej stalowych słupów ściskanych osiowo – podstawy teoretyczne, Inżynieria i Budownictwo 12/2005, str. 690–694
- [8] Maślak M., Ocena odporności ogniowej stalowych słupów ściskanych osiowo, Przykłady obliczeń, Inżynieria i Budownictwo 4/2006, str. 206–209
- [9] Rzeszut K., Polus Ł., Classes of Cross-Sections of Steel Structural Elements in the Fire Situation, Procedia Engineering 57/2013, str. 967–976, doi: 10.1016/j.proeng.2013.04.123
- [10] Kaźmierski S., Analiza nośności blachownic stalowych o przekrojach klasy 4 w warunkach pożaru według EN 1993-1-2 oraz prEN 1993-1-2, praca magisterska, Politechnika Poznańska, Poznań, 2023
- [11] Malendowski M., Szymkuć W., Modelowanie rozwoju temperatury w konstrukcji w warunkach pożaru, Nowoczesne Hale 1/2022, str. 18–24
- [12] Mąka T., Analiza nośności słupów stalowych o przekrojach klasy 4 w warunkach pożaru według EN 1993-1-2 oraz prEN 1993 1-2. Praca magisterska, Politechnika Poznańska, Poznań, 2023
- [13] Szymkuć W., Glema A., Malendowski M., Odporność ogniowa słupów stalowych i żelbetowych nagrzewanych z mniej niż czterech stron, Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza 43(3)/2016, str. 95–104, doi: 10.12845/bitp.43.3.2016.9
- [14] Maślak M., Pazdanowski M., Snela M., Moment-Rotation Characteristics for Flexible Beam-to-Column Steel Joint Exposed to Fire, Journal of Civil Engineering and Architecture 9/2015, str. 257–261, doi: 10.17265/1934-7359/2015.03.002
- [15] Maślak M., Simplified approach to evaluation of steel beam-column fire resistance, Advanced Steel Construction 3(1)/2007, str. 512–529
- [16] Szumigala M., Polus Ł., A comparison of the rise of the temperature of an unprotected steel column subjected to the standard fire curve ISO 834 and to a natural fire model in the office, Engineering Transactions 63(2)/2015, str. 157–170
- [17] Chybinski M., Polus L., Kłoj M., Fire Resistance of the Rafter Used in the Steel Portal Frame, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 471/2019, 052082, doi: 10.1088/1757-899X/471/5/052082
- [18] Pintea D., Zaharia R., Charlier M., Hanus F., WP1 – Preparation of nomograms, design guide, Powerpoint presentations and adaptation of Ozone software, Technical Report D1.4, TGS8, 2018
- [19] Figuli L., Horváth L. I., Kubíková Z., Magdolenová P., Malendowski M., Mózer V., Spremić M., Szikra C., Szymkuć W., Takács L., Wald F., V4 guidelines on advanced structural fire safety design with Eurocodes, Czech Technical University in Prague, 2021
- [20] Woźniczka P., Modelowanie komputerowe pożaru w halach wielkopowierzchniowych, Czasopismo Inżynierii Łądowej, Środowiska i Architektury 34(64)/2017, str. 7–16, doi: 10.7862/rb.2017.99