

dr inż. **Tomasz Domański**<sup>1</sup>

Przyjęty/Accepted/Принята: 09.06.2014;

Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 12.03.2015;

Opublikowany/Published/Опубликована: 31.03.2015;

## Wpływ obciążeń na bezpieczeństwo pożarowe dachów drewnianych na polskich obszarach górskich

The Impact of Loads on Fire Safety of Timber Roofs in Mountain Regions in Poland

Влияние нагрузок на пожарную безопасность деревянных крыш в горных районах Польши

### ABSTRAKT

**Cel:** Celem pracy jest pokazanie metod pozwalających uwzględnić historię obciążeń dla oszacowania parametrów bezpieczeństwa pożarowego dachów drewnianych wykonanych z drewna litego oraz materiałów drewnopochodnych takich jak sklejka lub LVL (tworzywo ze sklejonych warstwowo fornirów).

**Wprowadzenie:** W obowiązującej normie do projektowania konstrukcji drewnianych w przypadku pożaru PN-EN 1995-1-2 [1] nie uwzględnia się obniżenia własności mechanicznych drewna w czasie, spowodowanych działaniem obciążeń stałych i zmiennych. Ma to duże znaczenie dla oszacowania bezpieczeństwa pożarowego dachów drewnianych przy różnej intensywności występowania obciążeń zmiennych takich jak obciążenie śniegiem.

**Metody:** Opracowano dane statystyczne opadów śniegu na terenach górskich ze stacji meteorologicznych w Zakopanem, Świeradowie, Lesku z ostatnich 50 lat [2–3]. Oszacowano metodami probabilistycznymi [4] charakterystyki statystyczne tzw. pakietów [5] śnieżnych takich jak częstość, okres występowania, wartości maksymalnych obciążeń śniegiem. Wyznaczono stany graniczne nośności dla chwili początkowej i końcowej. Zastosowano rozkłady prawdopodobieństw Poissona, eksponencjalny dla parametrów występowania „pakietów” śnieżnych oraz rozkład Gumbela dla opisu wartości maksymalnych obciążeń śniegiem. Efekt obniżenia własności mechanicznych drewna został wyznaczony przy zastosowaniu metody JCSS [6].

**Wyniki:** Obniżenie własności mechanicznych drewna w czasie wpływa na bezpieczeństwo pożarowe konstrukcji. Obniżone zostają wskaźniki niezawodności i zwiększa się prawdopodobieństwo awarii w wyniku pożaru. Wprowadzenie do obliczeń współczynnika redukcyjnego  $k_{mod}$  [7] wpływa na zwiększenie bezpieczeństwa pożarowego dachów o konstrukcji drewnianej w fazie projektowania. Przedstawiono wyniki badań statystycznych obciążeń śniegiem na polskich terenach w postaci parametrów stochastycznych dla rozkładów Poissona, wykładniczego, Gumbela. Parametry te zostały przedstawione dla różnych materiałów drewnianych stosowanych w konstrukcjach dachów – typu drewno lite, sklejka, drewno klejone typu LVL.

**Wnioski:** Zastosowane metody probabilistyczne oceny bezpieczeństwa pożarowego dachów drewnianych oraz wyniki obliczeń i zaprezentowane wykresy wskazują na konieczność uwzględnienia obniżenia własności mechanicznych elementów drewnianych spowodowanych destrukcją mikrowłókien drzewnych. Zastosowane metody oraz wyniki wykazały konieczność uwzględnienia wpływu obciążeń stałych i zmiennych na bezpieczeństwo dachów drewnianych w warunkach pożaru.

**Słowa kluczowe:** niezawodność, wytrzymałość drewna, zapas bezpieczeństwa, konstrukcje drewniane, bezpieczeństwo pożarowe

**Typ artykułu:** oryginalny artykuł naukowy

### ABSTRACT

**Aim:** The aim of the paper is to expose methods which take into account load history for estimating the parameters of fire safety of wooden roofs made of solid wood, wood-based materials such as plywood or Laminated Veneer Lumber (LVL) products.

<sup>1</sup> Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej / Cracow University of Technology; doman@usk.pk.edu.pl;

**Introduction:** Current standard for the design of timber structures, which are exposed to a fire EN 1995-1-2 [1] does not mention the impact of permanent and variable loads on the strength of wood elements. However, it is a vital factor for estimating the fire safety of wooden roofs exposed to variable loads of different intensity e.g. snow load.

**Methods:** The author prepared snowfall data for Polish mountain regions [2-3], covering the last 50 years, from weather stations in Zakopane, Świeradów and Lesko. From the source data and with the aid of probabilistic techniques, statistical characteristics [4] were estimated for so-called “packages” [5] of snow such as: frequency, duration and maximum value of snow loads. Limit parameters were determined for the initial and final stage of timber carrying capacity. The Poisson, exponential, Gumbel probability functions were used to determine stochastic parameters of maximum snow loads. The effective reduction in mechanical properties of wood was determined with the use of JCSS methods [6].

**Results:** The reduction of mechanical properties of wood over time has an impact on the fire safety of structures. The reliability index falls over time and the probability of failure, caused by a fire, increases. Incorporation into calculations, at the design stage, of a reduction factor [7] increases the fire safety of timber structure roofs. The paper presents results from statistical calculations for snow loads in Polish mountain regions in the form of stochastic parameters for Poisson, exponential and Gumbel distributions. These parameters were used to describe changes in the strength of different materials used in the construction of wooden roofs, such as: solid wood, plywood, and LVL products.

**Conclusions:** The results from probabilistic calculations and graphs reveal that it is necessary to take into account the reduction of mechanical properties of timber elements caused by damage to wood micro-fibres. The methods and results presented in the article showed the need to consider the impact of permanent and variable loads on the safety of timber roofs in fire conditions.

**Keywords:** reliability, timber strength, safety margin, timber structures, fire safety

**Type of article:** original scientific article

## АННОТАЦИЯ

**Цель:** Целью работы является представление методов, позволяющих учитывать историю нагрузок для оценки параметров пожарной безопасности деревянных крыш из сжатой древесины и материалов на основе древесины таких как фанера или ЛВЛ-брус (материал из клееных слоев шпона).

**Введение:** В действующей норме по проектировке деревянных конструкций в случае пожара (PN-EN 1995-1-2) [1] не учитывается снижения во времени механических свойств древесины, вызванных действием постоянных и переменных нагрузок. Это имеет большое значение для оценки пожарной безопасности деревянных крыш, при разной интенсивности появления переменных нагрузок таких, как снеговая нагрузка.

**Методы:** Разработаны статистические данные на тему снегопадов в горных районах, полученных из метеорологических станций в городах Закопане, Сьерардов и Леско за последние 50 лет [2-3]. С помощью вероятностных методов [4] были оценены статистические характеристики так называемых снеговых „пакетов” [5] такие как частота, время появления, значения максимальных снеговых нагрузок. Определены предельные состояния грузоподъемности в начальный и конечный моменты. Использованы вероятностные распределения Пуассона, экспоненциальные параметры возникновения „пакетов” снега и распределения Гумбеля для описания величины максимальных нагрузок снега. Эффект снижения механических свойств древесины был определен с использованием методов JCSS (*Joint Committee of Structural Safety*) [6].

**Результаты:** Снижение механических свойств древесины во времени влияет на пожарную безопасность конструкции. Снижаются параметры устойчивости и повышается вероятность аварии в результате пожара. Использование в вычислениях редуцированного показателя  $k_{mod}$  [7] способствует повышению пожарной безопасности крыш на этапе проектировки. Представлены результаты статистических исследований снеговых нагрузок на территории Польши в виде стохастических параметров для распределения Пуассона, для экспоненциального распределения, для распределения Гумбеля. Данные параметры были представлены для различных древесных материалов, используемых в конструкции крыш – типа цельное дерево, фанера, клеёная древесина типа ЛВЛ-брус.

**Выводы:** Используемые методы вероятностной оценки пожарной безопасности деревянных крыш, а также результаты вычислений и представленные схемы указывают на необходимость учёта снижения механических свойств деревянных элементов, вызванных разрушением микроволокон древесины. Используемые методы и результаты указывают на необходимость учёта влияния постоянных и изменчивых нагрузок на безопасность деревянных крыш в условиях пожара.

**Ключевые слова:** устойчивость, устойчивость древесины, резерв (запас) безопасности, деревянные конструкции, пожарная безопасность

**Вид статьи:** оригинальная научная статья

## 1. Wprowadzenie

Niezawodność konstrukcji budowlanych jest jednym z podstawowych terminów opisujących bezpieczeństwo konstrukcji w warunkach normalnych i pożarowych. Jedną z miar niezawodności jest tzw. wskaźnik niezawodności  $\beta$  opisujący standardowy zapas bezpieczeństwa:

$$\beta = \frac{\bar{Z}}{\sigma_Z}$$

Zapas bezpieczeństwa  $Z$  określa różnicę pomiędzy nośnością elementu  $R$  i efektem oddziaływania  $E$  w postaci  $Z = R - E$ .  $\bar{Z}$  jest wartością średnią zapasu bezpieczeństwa będącą różnicą pomiędzy średnimi wartościami nośności  $\bar{R}$  oraz efektów oddziaływania  $\bar{E}$ ,  $\sigma_Z$  jest odchyleniem standardowym zapasu bezpieczeństwa. W praktyce uznaje się nośność elementu  $R$  i efekt oddziaływania  $E$  za losowo niezależne. W przypadku elementów drewnianych istotny wpływ na wytrzymałość drewna ma historia obciążeń. W normie do projektowania konstrukcji drewnianych PN-EN 1995-1-1 [8] ten czynnik jest uwzględniany w postaci wprowadzonych współczynników redukcyjnych parametrów wytrzymałościowych drewna  $k_{mod}$ ,  $k_{def}$  zależnych od rodzaju obciążeń oraz wilgotności. W normie projektowania konstrukcji drewnianych PN-EN 1995-1-2 [1] w pożarze ten aspekt nie jest brany pod uwagę, przyjmuje się wartość  $k_{mod} = 1$ . W artykule przedstawiono analizę bezpieczeństwa elementów drewnianych w pożarze uwzględniającą zmiany własności materiałowych w czasie eksploatacji dla różnych kombinacji obciążeń stałych i zmiennych. Podejście takie powoduje, że współczynnik  $k_{mod} \neq 1$  jest funkcją wielu parametrów takich jak: udział obciążeń zmiennych w stosunku do całości obciążeń działających na element drewniany, wilgotność drewna i otoczenia, poziom niezawodności, przy którym projektuje się konstrukcję.

## 2. Metodyka

Określa się następujące warunki, które powinien spełnić element drewniany w warunkach pożaru:

a) warunek zapewnienia wymaganego czasu przetrwania w postaci:

$$t_f - t_{fi,req} \geq 0 \quad (1)$$

gdzie:

$t_f$  – chwila pożaru odpowiadająca losowej realizacji awarii elementu,

$t_{fi,req}$  – wymagana odporność ogniowa elementu drewnianego.

b) warunek spełnienia stanu granicznego nośności zapisany jako:

$$g_{fi}(t_{fi}) = R_{fi}(t_{fi}) - E_{fi}(t_{fi}) \geq 0 \quad (2)$$

gdzie:

$g_{fi}(t_{fi})$  – losowy zapas bezpieczeństwa zdefiniowany w formie addytywnej,

$R_{fi}(t_{fi})$  – losowa nośność elementu w chwili  $t_{fi}$  pożaru,

$E_{fi}(t_{fi})$  – efekt działania przyłożonych do elementu obciążeń.

c) warunek zapewnienia minimum prawdopodobieństwa przetrwania w czasie pożaru, zdefiniowany przez porównanie prawdopodobieństw:

$$P_f(t_{fi}) \leq P_{req} \quad (3)$$

gdzie:

$P_f(t_{fi})$  – prawdopodobieństwo awarii elementu drewnianego w danej chwili pożaru,

$P_{req}$  – maksymalne akceptowane prawdopodobieństwo awarii elementu (nominalne) określone w PN-EN 1990 [11] dla elementów drewnianych, w zależności od przyjętej klasy niezawodności RC.

Nierówność (3) może być zapisana przy zastosowaniu zapisu wyrażonego przez wskaźniki niezawodności:

$$\beta(t_{fi}) \leq \beta_{req}$$

gdzie:

$\beta(t_{fi})$  – wskaźnik niezawodności elementu dla danej chwili pożaru,

$\beta_{req}$  – minimalny akceptowalny poziom wskaźnika niezawodności.

Minimalne wartości wskaźnika niezawodności  $\beta_{req}$  są zróżnicowane w normie [11] z uwagi na okres odniesienia oraz klasę niezawodności RC i pokazane zostały w tabeli 1.

**Tabela 1.** Klasy niezawodności [11]**Table 1.** Reliability classes [11]

Klasy niezawodności/ Reliability class	Minimalne wartości $\beta_{req}$ , maksymalne $P_{req}$ / Minimum values for $\beta_{req}$ , maximum for $P_{req}$	
	okres odniesienia 1 rok 1 year reference period	okres odniesienia 50 lat 50 years reference period
RC3	$\beta_{req} = 5,2; P_{req} \cong 9,9 \cdot 10^{-8}$	$\beta_{req} = 4,3; P_{req} \cong 8,5 \cdot 10^{-6}$
RC2	$\beta_{req} = 4,7; P_{req} \cong 1,3 \cdot 10^{-6}$	$\beta_{req} = 3,8; P_{req} \cong 7,1 \cdot 10^{-5}$
RC1	$\beta_{req} = 4,2; P_{req} \cong 1,2 \cdot 10^{-5}$	$\beta_{req} = 3,3; P_{req} \cong 4,8 \cdot 10^{-4}$

Klasom niezawodności RC odpowiadają klasy konsekwencji zniszczenia CC, które są przedstawione w tab. 2.

**Tabela 2.** Klasy konsekwencji zniszczenia [11]

Klasa konsekwencji	Opis	Przykłady konstrukcji budowlanych i inżynierskich
CC3	<b>Wysokie</b> zagrożenie życia ludzkiego lub bardzo duże konsekwencje ekonomiczne, społeczne i środowiskowe	Widownie, budynki użyteczności publicznej, których konsekwencje zniszczenia są wysokie
CC2	<b>Przeciętne</b> zagrożenie życia ludzkiego lub znaczne konsekwencje ekonomiczne, społeczne i środowiskowe	Budynki mieszkalne i biurowe oraz budynki użyteczności publicznej, których konsekwencje zniszczenia są przeciętne
CC1	<b>Niskie</b> zagrożenie życia ludzkiego lub małe lub nieznaczne konsekwencje społeczne i ekonomiczne	Budynki rolnicze, w których ludzie zazwyczaj nie przebywają oraz szklarnie

**Table 2.** Consequences Classes [11]

Consequences Class	Description	Examples of buildings and civil engineering works
CC3	<b>High</b> consequence for loss of human life, economic, social or environmental consequences <b>very great</b>	Grandstands, public buildings where consequences of failure are high
CC2	<b>Medium</b> consequence for loss of human life, economic, social or environmental consequences <b>considerable</b>	Residential and office buildings, public buildings where consequences of failure are medium (e.g. an office building)
CC1	<b>Low</b> consequence for loss of human life, <i>and</i> economic, social or environmental consequences <b>small or negligible</b>	Agricultural buildings where people do not normally enter

Wartość obliczeniową wytrzymałości drewna w warunkach pożaru  $f_{d,fi}$  wg PN-EN 1995-1-2 [1] określa się z formuły (4):

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (4)$$

gdzie:

$k_{mod,fi}$  – współczynnik modyfikujący w warunkach pożaru, wyznaczony wg PN-EN 1995-1-2 [1] na podstawie analizy zwęglania elementu drewnianego,  
 $f_{20}$  – 20 % kwantyl wytrzymałości elementu drewnianego w temperaturze normalnej,

$\gamma_{M,fi}$  – częściowy współczynnik materiałowy drewna w chwili pożaru.

$$f_{20} = k_{fi} \cdot f_k$$

gdzie:

$f_k$  – wartość charakterystyczna wytrzymałości drewna, wyznaczona jako 5% kwantyl rozkładu prawdopodobieństwa wytrzymałości drewna w warunkach normalnych,

$k_{fi}$  – współczynnik redukcyjny w warunkach pożarowych, wg normy PN-EN 1995-1-2 dla odpowiednich logarytmicznych współczynników zmienności  $v_{fi}$  przedstawiony jest w tabeli 3.

**Tabela 3.**  $k_{fi}$  – współczynnik redukcyjny w warunkach pożarowych, wg PN-EN 1995-1-2 [1]**Table 3.**  $k_{fi}$  – reduction coefficient in fire according PN-EN 1995-1-2 [1]

	$k_{fi}$	$v_{fi}$
Drewno lite / Solid timber	1,25	0,26
Drewno klejone warstwowo / Glued laminated timber	1,15	0,17
Płyty drewnopochodne / wood-based panels	1,15	0,17
fornir klejony warstwowo / LVL	1,10	0,11
Połączenia na łączniki ścinane z bocznymi elementami drewnianymi / Connections with fasteners in shear with side members of wood-based panels	1,15	0,17
Połączenia na łączniki ścinane z bocznymi elementami stalowymi / Connections with fasteners in shear with side members of steel	1,05	0,06
Połączenia z zastosowaniem łączników obciążonych osiowo / Connections with axially loaded fasteners	1,05	0,06

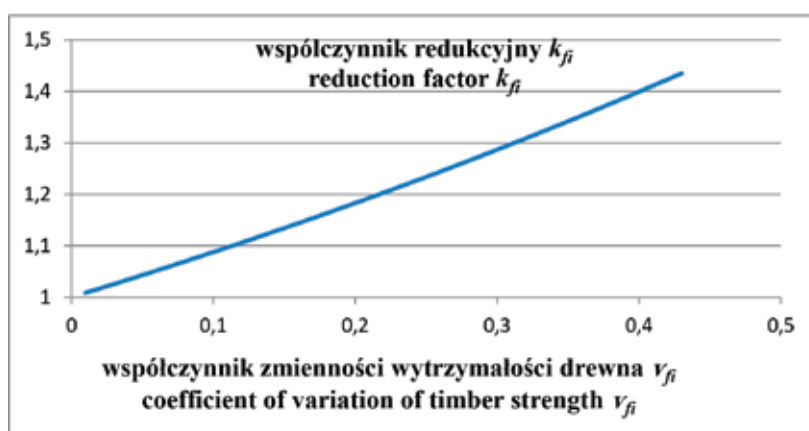
Współczynnik redukcyjny  $k_{fi}$  jest funkcją logarytmicznego współczynnika zmienności  $v_{fi}$  drewna w warunkach normalnych. Wyznacza się go z warunku (5):

$$k_{fi} = \exp\left\{v_{fi} \left[\Phi^{-1}(5\%) - \Phi^{-1}(20\%)\right]\right\} \quad (5)$$

gdzie:

$\Phi^{-1}(\cdot)$  – odwrotna funkcja Laplace'a na poziomie 5% i 20%.

W przypadku indywidualnych oszacowań logarytmicznego współczynnika zmienności wytrzymałości drewna w fazie początkowej pożaru parametr  $k_{fi}$  można oszacować z nomogramu ryc. 1.

**Ryc. 1.** Współczynnik redukcyjny  $k_{fi}$ **Fig. 1.** Reduction factor  $k_{fi}$ 

**Źródło:** Opracowanie własne.

**Source:** Own elaboration.

Wartość charakterystyczna wytrzymałości drewna  $f_k$  wg normy PN-EN 1995-1-1 [8] jest określana dla chwili początkowej eksploatacji  $f_{k,S}$  oraz dla chwili końca oczekiwanego okresu eksploatacji  $f_{k,L}$  (okres 50 lat). Zależność pomiędzy parametrami  $f_{k,S}$  oraz  $f_{k,L}$  jest zależna od wilgotności drewna oraz intensywności – historii obciążeń w okresie eksploatacji, i wyznaczana jest wg następującej formuły:

$$f_k = f_{k,L} = f_{k,S} \cdot k_{mod}$$

Współczynnik  $k_{mod}$  określany jest w normie PN-EN 1995 [8] głównie w zależności od intensywności obciążeń elementu drewnianego. Obciążenia te powodują destrukcję włókien w strukturze drewna, przez co obniżają się jego własności mechaniczne w czasie. Przykładowo w tabeli 4 przedstawiono wartości normowe  $k_{mod}$  dla drewna litego.

**Tabela 4.** Współczynnik redukcyjny  $k_{mod}$  [8]  
**Table 4.** Reduction factor  $k_{mod}$  [8]

Klasa obciążenia / Load duration class	Czas trwania obciążenia / Order of accumulated duration of characteristic load	Przykład obciążenia Examples of loading	Klasa użyteczności wg [8] Service class humidity		
			klasa 1	klasa 2	klasa 3
			MC<12%	12%<MC<20%	MC>20%
Stałe/ Permanet	Więcej niż 10 lat/ More than 10 years	Obciążenia stałe Self weight	0,60	0,60	0,50
Długotrwałe/ Long term	6 miesięcy do 10 lat/ 6 months – 10 years	Składowanie/ storage	0,70	0,70	0,65
Średniotrwałe Medium term	1 tydzień do 6 miesięcy / One week – 6 months	Obc. użytkowe, śnieg Imposed load, snow	0,80	0,80	0,70
Krótkotrwałe Short term	Mniej niż 1 tydzień/ Less than one week	Wiatr, śnieg Wind, snow	0,90	0,90	0,70
Chwilowe/ Instantaneous		Obc. wyjątkowe Accidental load	1,10	1,10	0,90

Współczynnik  $k_{mod}$  jest określany wg formuły przedstawionej we wzorze (6):

$$k_{mod} = \frac{\gamma_M^S(\beta_S)}{\gamma_M^L(\beta_L)} \quad (6)$$

gdzie:

$\gamma_M^S(\beta_S)$  – częściowy materiałowy współczynnik bezpieczeństwa dla części krótkotrwałej w momencie początkowym pożaru,

$\gamma_M^L(\beta_L)$  – częściowy materiałowy współczynnik bezpieczeństwa dla części długotrwałej w momencie początkowym pożaru,

$\beta_S$  – wskaźnik niezawodności dla warunku bezpieczeństwa w chwili początkowej w momencie początkowym pożaru,

$\beta_L$  – wskaźnik niezawodności dla warunku bezpieczeństwa w części długotrwałej w momencie początkowym pożaru.

Powyższe współczynniki zostały wyznaczone stosując metody symulacyjne Monte Carlo przy następujących warunkach:

dla części krótkotrwałej,

zapas bezpieczeństwa  $g$ :

$$g = z f_{k,S} - ((I - \kappa)G + \kappa Q)$$

gdzie:

$z$  – parametr kształtu,

$f_{k,S}$  – początkowa charakterystyczna wytrzymałość drewna,

$\kappa$  – udział obciążeń zmiennych w stosunku do całości obciążeń,

$Q, G$  obciążenia zmienne – śnieg i stałe.

Przy warunku granicznym dla wyjątkowej sytuacji pożarowej:

$$\frac{z f_{k,S} k_{fi}}{\gamma_m} - ((I - \kappa)G_k + \kappa \psi_2 Q_k) = 0$$

gdzie:

$f_{k,S}$  jest wartością charakterystyczną wytrzymałości drewna w chwili początkowej (5% kwantyl),  $Q_k$  jest wartością charakterystyczną dla obciążeń zmiennych – śnieg (2% kwantyl),

$G_k$  jest wartością charakterystyczną obciążeń stałych (wartość średnia)

$\gamma_m$  – częściowy materiałowy współczynnik zmienności (dla drewna litego = 1.3),  $\psi_2$  – współczynnik redukcyjny dla obciążeń quasi-stałych wg PN-EN 1990 [11]. dla części długotrwałej,

zapas bezpieczeństwa  $g$ :

$$g = z(I - \alpha) f_{k,S} - (I - \kappa)G + \kappa Q$$

przy warunku granicznym:

$$\frac{z f_{k,S} k_{mod} k_{fi}}{\gamma_m} - ((I - \kappa)G_k + \kappa \psi_2 Q_k) = 0$$

Wielkość  $\alpha$  jest parametrem zniszczenia w czasie  $t$  włókien drewna o wartościach od 0 (brak zniszczeń) do 1 (zniszczenie całkowite), definiowanym ogólnie przez równanie:

$$\frac{d\alpha}{dt} = F[s(t), \bar{X}]$$

gdzie:

$F[\cdot]$  – funkcja zniszczenia zależna od wyężenia elementu drewnianego w czasie  $t$   $s(t)$  oraz wektora stałych materiałowych  $\bar{X}$ . [12, 13, 14, 15]

Obliczenia wykonano przy następujących parametrach stochastycznych – tabela 5.

**Tabela 5.** Model stochastyczny dla: Zakopane (Z), Świeradów (S), Lesko (L)**Table 5.** Stochastic model for: Zakopane (Z), Świeradów (S), Lesko (L)

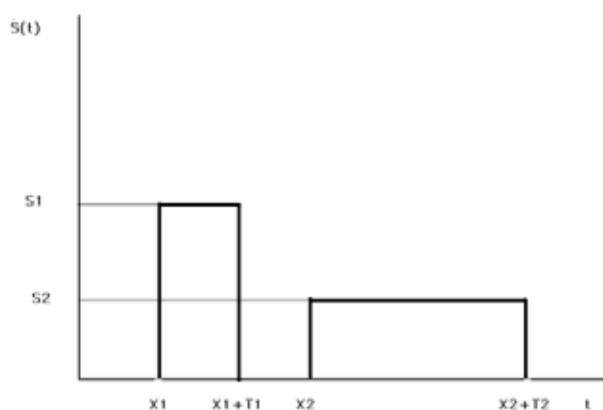
Zmienna / Variable	Rozkład prawdopodobieństwa / Probability distribution	Wartość oczekiwana / Expected value	Współczynnik zmienności COV
$f_o$ wytrzymałość drewna $f_o$ timber strength	Lognormalny/ Lognormal	1	0,18
$G$ obciążenie stałe $G$ permanent load	Normalny/ Normal	1	0,10
$Q$ obciążenie śniegiem $Q$ snow load	Gumbel	1	0,34/0,44/0,46 (Z/S/L)

**Źródło:** Opracowanie własne.

**Source:** Own elaboration.

### 3. Wyniki, dyskusja

Model obciążeń śniegiem dachów drewnianych narażonych na działanie pożaru w czasie przyjęto jako prostokątny (ryc. 2).



Ryc. 2. Model obciążeń śniegiem [5]

Fig. 2. Snow load model [5]

Obciążenia śniegiem  $S(t)$  są modelowane jako „pakiety” obciążeń obniżające własności wytrzymałościowe drewna przy następujących założeniach:

- występowanie obciążeń śniegiem w czasie  $X1, X2, \dots$  podlegają procesowi Poissona,
- czas pomiędzy „pakietami” podlega rozkładowi wykładniczemu z wartością oczekiwaną  $1/\lambda$ , gdzie  $\lambda$  jest ilością występowania „pakietów” w ciągu jednego roku,
- maksymalne wartości  $P_m$  obciążeń śniegiem dla „pakietów” podlegają rozkładowi Gumbela z wartością oczekiwaną  $\mu_p$  oraz odchyleniem standardowym  $\sigma_p$ ,
- czas trwania „pakietów” obciążeń śniegiem  $T$  jest określany z formuły  $X_T P_m$  proporcjonalnym do rozkładu obciążeń śniegiem w „pakiecie”  $X_T$  opisanym rozkładem wykładniczym z wartością oczekiwaną  $\mu_{XT}$ .

**Tabela 6.** Probabilistyczne parametry obciążeń śniegiem**Table 6.** Probabilistic parameters of the snow loads

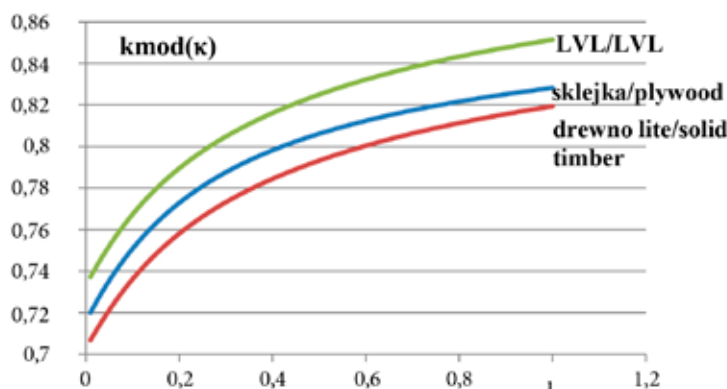
	Zakopane	Świeradów	Lesko	Średnio, obszar górski / Total, mountain region
$\mu_p$ [ $kN/m^2$ ]	1,47	1,12	0,80	1,19
$\sigma_p$ [ $kN/m^2$ ]	0,49	0,65	0,37	0,53
$\mu_{XT}$ [dni/( $kN/m^2$ )]	65,58	40,97	53,62	60,23
$\lambda$	1,43	1,85	1,64	1,73

**Źródło:** Opracowanie własne.

**Source:** Own elaboration.

Dla powyższych danych i założeń wyznaczono współczynnik redukcyjny  $k_{mod}$  dla polskich obszarów górskich, dla drewna litego, sklejki oraz LVL. Zastosowano procedurę rekomendowaną przez JCSS [16].

Dla różnych udziałów obciążenia zmiennego w całości obciążeń działających na element drewniany obliczono współczynnik redukcyjny  $k_{mod}$ . Ilustracja graficzna zmian  $k_{mod}$  przedstawiona jest na ryc. 3.



$\kappa$  – udział obciążeń zmiennych w stosunku do obciążeń całkowitych  
 $\kappa$  – part of variable loads in relation to the total loads

Ryc. 3. Współczynnik w funkcji udziału obciążeń zmiennych do obciążeń całkowitych  
 Fig. 3. Coefficient  $k_{mod}$  in function of variable load part in relations to total loads

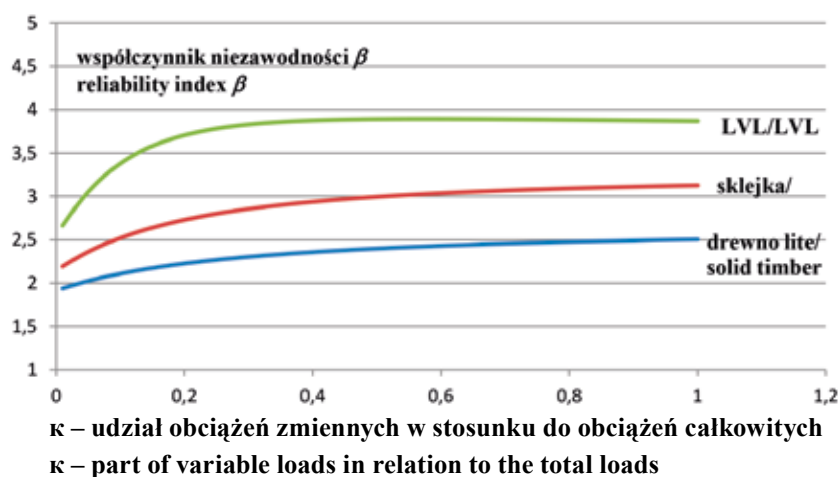
Źródło: Opracowanie własne.  
 Source: Own elaboration.

Wzrost współczynnika  $k_{mod}$  jest wprost proporcjonalny do udziału obciążeń zmiennych – śniegu w całości obciążeń. Wynika to z okresowości działań obciążeń zmiennych i powodowanych przez to mniejszych szkód w strukturze drewna. Współczynnik  $k_{mod}$  ma istotny wpływ na kwantyl 20% wytrzymałości drewna, który jest podstawą dalszych obliczeń wytrzymałościowych – nośności elementu drewnianego. Wartość charakterystyczna  $f_k$  jest zależna od współczynnika  $k_{mod}$  w funkcji udziału obciążeń zmiennych do całkowitych reprezentowanych przez współczynnik  $\kappa$ . Współczynnik  $k_{fi}$  wnosi informację o rodzaju konstrukcji, warunkach wilgotnościowych oraz stanu wyęźnienia. Relacje determinujące wyznaczanie kwantyla 20% wytrzymałości drewna oraz współczynnik  $k_{fi}$  przedstawiają wzory (7) (8).

$$f_{20} = k_{fi} \cdot f_k \quad (7)$$

$$k_{fi} = esp(0,84 \cdot v_m) \cdot k_{mod}(\kappa) \quad (8)$$

Zmiany w strukturze drewna spowodowane obciążeniami powodują obniżenie własności mechanicznych elementu drewnianego, co skutkuje obniżeniem bezpieczeństwa obiektu w przypadku wystąpienia pożaru. Miarą bezpieczeństwa konstrukcji drewnianej w przypadku pożaru jest wskaźnik niezawodności  $\beta$  pokazany w funkcji udziału obciążeń zmiennych do całkowitych na ryc. 4. Jak można zauważyć, wskaźnik  $\beta$  zależny jest głównie od udziału obciążeń, których współczynnik zmienności jest stosunkowo duży, dochodzi do  $v_Q = 0,7$ , przy stosunkowo niedużym współczynniku zmienności dla obciążeń stałych  $v_G = 0,1 - 0,3$  zależnym od rodzaju materiału.



$\kappa$  – udział obciążeń zmiennych w stosunku do obciążeń całkowitych  
 $\kappa$  – part of variable loads in relation to the total loads

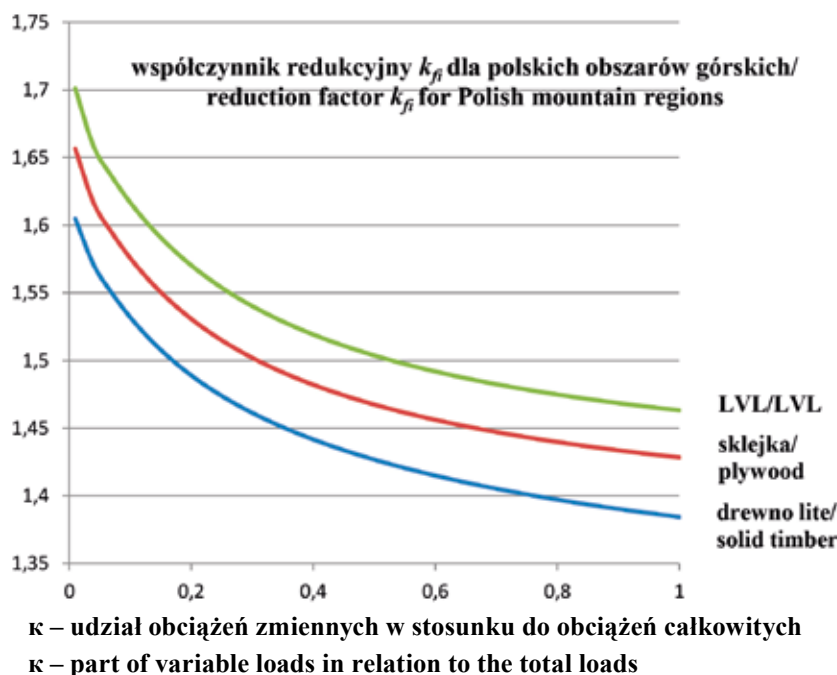
Ryc. 4. Współczynnik niezawodności  $\beta$  w funkcji udziału obciążeń zmiennych do obciążeń całkowitych  
 Fig. 4. Reliability index  $\beta$  in function of variable load part in relations to total loads

Źródło: Opracowanie własne.  
 Source: Own elaboration.



Współczynnik  $k_{fi}$  determinuje wartość 20% kwantyla wytrzymałości elementu drewnianego  $f_{20} = k_{fi} \cdot f_k$ . Jest to istotny czynnik wpływający na

późniejsze obliczanie wskaźnika bezpieczeństwa w stosunku od udziału obciążeń śniegiem a tym samym na prawdopodobieństwo awarii w przypadku pożaru.



Ryc. 5. Współczynnik  $k_{fi}$  w funkcji udziału obciążeń zmiennych do obciążeń całkowitych  
Fig. 5. Coefficient  $k_{fi}$  in function of variable load part in relations to total loads

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

#### 4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono analizę wpływu historii obciążeń na bezpieczeństwo ogólne i pożarowe konstrukcji drewnianych. Zaprezentowano probabilistyczną metodologię wyznaczania współczynników redukcyjnych parametrów wytrzymałościowych elementów drewnianych takich jak: LVL, sklejki, elementy z drewna litego. Współczynniki redukcyjne  $k_{mod}$ ,  $k_{fi}$  oraz wskaźniki niezawodności  $\beta$  zostały wyznaczone wg zasad Europejskich Organizacji dotyczących Bezpieczeństwa Konstrukcji Budowlanych JCSS [16]. Przy określaniu odporności ogniowej budynków

o konstrukcji drewnianej istotne jest położenie obiektu, inne parametry wytrzymałościowe mają budynki na terenach nizinnych, a inne na terenach górskich, gdzie obciążenie śniegiem jest decydującym czynnikiem w kalkulacji obciążeń całkowitych. Ponadto na bezpieczeństwo pożarowe ma wpływ rodzaj materiału stosowanego w obiektach drewnianych takiego jak drewno lite, płyty OSB, drewno klejone LVL. Potrzebne są dalsze badania wytrzymałościowe materiałów drewnianych i drewnopochodnych dla określenia statystyk umożliwiających określenie klas odporności ogniowej konstrukcji drewnianych na terenach nizinnych i górskich.

#### Literatura

- [1] PN-EN 1995-1-2, Eurokod 5: Projektowanie konstrukcji drewnianych, Część 1–2: Postanowienia ogólne, Projektowanie konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe, PKN Warszawa 2008.
- [2] IMiGW Kraków. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej w Krakowie, Raport obciążeń śniegiem za lata 1960–2008.
- [3] IMiGW Wrocław. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej we Wrocławiu, Raport obciążeń śniegiem za lata 1960–2008.
- [4] Benjamin J. R., Cornell C. A., *Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers*, McGraw-Hill, Inc., Nowy Jork 1970.

- [5] Sorensen J., Svensson S., Stang B., *Reliability – based calibration of load duration factors for timber structures*, “Structural Safety” Vol. 27 Issue 2, 2005, pp. 153–169.
- [6] Köhler J., Sørensen J., Faber M., *Probabilistic modeling of timber structures*, “Structural Safety” Vol. 29 Issue 4, 2007, pp. 255–267.
- [7] Faber M., Köhler J., Sørensen J., *Probabilistic modeling of graded timber material properties*, “Structural Safety” Vol. 26 Issue 3, 2004, pp. 295–309.
- [8] PN-EN 1995-1-1, Eurokod 5: Projektowanie konstrukcji drewnianych, Część 1-1: Postanowienia ogólne i zasady dla budynków, PKN, Warszawa 2008.
- [9] Maślak M., Domański T., *Safety factors in design of steel members for accidental fire situation*, Proceedings of International Conference “Design, Fabrication and Economy of Welded Structures”, Miskolc, Horwood Publishing, Chichester, s. 563–570.
- [10] Domański T., Maślak M., *Probabilistyczna ocena nośności belki drewnianej w pożarze rozwiniętym*, IX konferencja „Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych”, Szczecin 2011, s. 45–55.
- [11] PN-EN 1990, Eurokod 0, Podstawy projektowania konstrukcji. PKN Warszawa 2004.
- [12] Rosowsky D., Bulleit M., *Load duration effect in wood members and connections order statistics and critical loads*, “Structural Safety” 2002, Vol. 24 Issue 2-4, pp. 347–362.
- [13] Gerhard C. C., *Time related effects on wood strength: a linear cumulative damage theory*, Wood Sci., Vol. 11 Issue 3, 1979, pp. 139–144.
- [14] Barret J.D, Foschi R.O., *Duration of load and probability of failure in wood*. Part 1; Modeling creep rupture, “Canadian Journal of Civil Engineering: Vol. 5 Issue 4, 1978, pp. 505–514.
- [15] Foschi R.O., Folz B. R., Yao F., *Reliability-based design of wood structures*. Structural research series. Rep. no 34. Dep. of Civil Eng., Univ. of British Columbia. Vancouver, Canada 1989.
- [16] Joint Committee of Structural Safety (JCSS, 2001). Probabilistic Model Code, Internet Publication: [www.jcss.ethz.ch](http://www.jcss.ethz.ch) [dostęp 12.06. 2014].

\* \* \*

**dr inż. Tomasz Domański** – ukończył kierunek Podstawowe Problemy Techniki, specjalność Mechanika Stosowana na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej. Pracę doktorską pt. „Probabilistyczne metody oceny odporności ogniowej elementów konstrukcji stalowych” obronił w 1987 roku. Jako adiunkt prowadził zajęcia na Politechnice Krakowskiej z przedmiotów Niezawodność Konstrukcji i Konstrukcji Metalowych oraz na Akademii Rolniczej w Katedrze Matematyki. Pracował w biurach projektowych oraz firmach wykonawczych związanych z budownictwem. Obecnie pracuje w Katedrze Konstrukcji Metalowych Politechniki Krakowskiej.