

Zrównoważony rozwój i materiały budowlane: mity, fakty i błędne przekonania

Streszczenie

Gdy jest mowa o zrównoważonym rozwoju, oczywiście jest branie pod uwagę nie tylko kwestii związanych z ekologią, ale także kwestii społecznych i ekonomicznych¹. Te trzy „filary” zostały znormalizowane i muszą być rozważane w przypadku materiałów budowlanych², gdzie uproszczone podejście, często stosowane, w celu wywarcia wrażenia na laikach, może prowadzić do wyciągania błędnych wniosków. Poniższa praca bada trzy materiały budowlane: drewno, stal i beton, poświęcając szczególną uwagę aspektom trzech filarów zrównoważonego rozwoju – społecznemu (bezpieczeństwo obywateli), ekologicznemu – (emisja CO₂) i ekonomicznemu (koszty). Założeniem pracy jest odróżnienie faktów od mitów i od myśli, które brzmią tak przekonująco, że stały się akceptowane pomimo tego, że są oparte na błędnych założeniach. Koncepcja „funkcjonalnej jednostki” jest zdefiniowana, a przypadek prostej funkcjonalnej jednostki budowlanej, idealnej kolumny, jest przedstawiony w odniesieniu do norm odpowiedniego eurokodu, europejskiego standardu projektowania. W przypadku niejednorodnego materiału, jakim jest na przykład beton zbrojony, przy obecności stali zbrojeniowej, brane są pod uwagę „współczynniki zwiększenia”. Pokróćce opisane zostały wnioski rozważania prawdziwych przypadków i zastosowania idei w stosunku do innych konstrukcyjnych funkcjonalnych jednostek.

1) Mit: stosunek wytrzymałości do masy jednostkowej
Poniższa tabela pochodzi ze slajdów wykorzystywanych na wykładach włoskiego uniwersytetu na temat projektowania konstrukcji budowlanej drewnianej³. W tabeli podane są średnie wartości wytrzyma-

ści (na ściskanie) **do masy jednostkowej**, drugie zdanie przedstawia rozważanie wpływu materiału budowlanego na projektowanie konstrukcji.

Na pierwszy rzut oka kryterium **stosunku wytrzymałości do masy jednostkowej** wygląda dobrze – im lżejszy i mocniejszy materiał budowlany, tym lepiej. Co to jednak oznacza w przypadku gdy **wytrzymałość na ściskanie** użyta jest tak, jak podano w tabeli? Może być uznana za mit – brzmi przekonująco, ale wprowadza w błąd, gdy wdać się w szczegóły. Pomysłem leżącym u podstaw jest zbudowanie idealnej kolumny ze stałym przekrojem A tak wysokim jak na to pozwala wytrzymałość (na ściskanie) materiału oraz ocenienie wydajności materiałów na zasadzie „im większa wysokość, tym lepszy materiał”.

Zdefiniujmy „f” jako wytrzymałość upadkową (ładunek ściskający na jednostkę powierzchni) materiału gatunkowego, i „A” jako powierzchnię jego przekroju poprzecznego: maksymalny ładunek F, jaki powierzchnia A jednakowo obciążona może wytrzymać (tak jak w kolumnie poddanej teoretycznie doskonałemu obciążeniu osiowemu) to $F = (f A)$. Waga W kolumny o wysokości „h” jest otrzymana przez pomnożenie jej objętości $V = (Ah)$ przez w, masę jednostkową materiału, tak więc $W = w V = w (A h)$. Zrównując „opór” F i „akcję” W **wysokość h_{\max} równa się stosunkowi wytrzymałości (na ściskanie) do masy jednostkowej:**

$$F = W \rightarrow f A = w A h_{\max} \rightarrow h_{\max} = (f/w)$$

Wyrażając wytrzymałość w kg/m^2 i h_{\max} w metrach, używając „s” dla stali, „c” dla betonu i „t” dla drewna oraz dane z tabeli:

$$h_{\max,s} = (4000 \times 104) / 7850 = 5100 \text{ m}$$

$$h_{\max,c} = (400 \times 104) / 2500 = 1600 \text{ m}$$

$$h_{\max,t} = (400 \times 104) / 500 = 8000 \text{ m}$$

Na podstawie tego łatwego do zrozumienia i polichenia kryterium wydajności, drewno osiąga najlepsze wyniki z trzech materiałów: to naprawdę atrakcyjny materiał budowlany! Jednakże w tym podejściu musi czegoś brakować, lub musi występować błąd, jeżeli w rzeczywistym świecie najwyższy betonowy budynek, Burj Dubaj, ma „tylko” 830 metrów wysokości, najwyższy budynek wykonany ze stali, Tajpej 101, ma „tylko” 501 metrów wysokości, a najwyższy budynek wykonany z drewna (według podanego kryterium z „najwydajniejszego” materiału budowlanego) ma 12 drewnianych pięter wspieranych przez 3 piętra betonowe, zbudowany na EXPO 2015 w Mediolanie (Włochy). A Hyperion, najwyższe drzewo na świecie, sekwoja wieczniezielona w parku narodowym Redwood w Kalifornii, ma „tylko” 116 metrów wysokości! Dlaczego, mając dostęp do komputerów, nasi inżynierowie (a nawet najlepszy spośród nich, Matka Natura) nie są wciąż w stanie poradzić sobie z wrodzonymi właściwościami materiałów budowlanych? Czy to ich wina, czy stosunek wytrzymałości do masy jednostkowej, tj. maksymalna teoretyczna wysokość h_{\max} , jest wprowadzającym w błąd wskaźnikiem, mitem?

Drewno jest materiałem budowlanym o najwyższym stosunku wytrzymałości do masy jednostkowej: jest bardzo wydajne!

	Wytrzymałość na ściskanie kg/cm^3	Masa jednostkowa kg/m^3	Moduł sprężystości kg/cm^3
Drewno	ok 400	500-700	100000
Beton zbrojony	ok 400	2500	300000
Stal	4000-5000	7800	2100000

Dobrze zaprojektowana konstrukcja drewniana ma przekrój podobny do konstrukcji z betonu (zbrojonego), a wagę zbliżoną do stalowej konstrukcji

łości na ściskanie (resistenza)⁴, masy jednostkowej (peso specifico)⁵ i modułu sprężystości (modulo elastico) trzech materiałów: drewna (legno), stali (acciaio) oraz betonu zbrojonego (cemento armato). Zdanie nad tabelą brzmi: „Drewno jest materiałem budowlanym o najwyższym **stosunku wytrzymałości do masy jednostkowej**: jest bardzo wydajne!”. Zdanie poniżej brzmi: „Dobrze zaprojektowana konstrukcja drewniana ma przekrój podobny do konstrukcji z betonu (zbrojonego), a wagę zbliżoną do stalowej konstrukcji”. Obydwa zdania odnoszą się do dwóch różnych pytań. Pierwsze zdanie opiera się jedynie na materiale budowlanym i głosi, że „wydajność” materiałów powinna być mierzona, a poprzez to materiały porównane, na podstawie **stosunku ich wytrzyma-**

Tabela 1. Właściwości materiału, wysokość h_{max} i zasięg smukłości

Materiał	Gęstość, masa właściwa ρ _{mean}	Charakter. wytrzymałość na ściskanie f _k	Czynnik bezpieczeństwa γ	Projektowana wytrzymałość f _d	h _{max} = f _d /w	Współczynnik smukłości λ	Zasięg smukłości h/λ
	kg/m ³	N/mm ²	-	N/mm ²	m	-	m
Drewno ⁶	350 - 550	19 - 29	2,40	7,9 - 12,0	2025 - 2210	20	101 - 111
Beton	2300-2400	20 - 55	1,4 - 1,5	13,3 - 36,7	566 - 1560	50	11 - 31
Stal	7850	390 - 550	1,05	224 - 524	2850 - 6670	150	19 - 45

Przyjrzyjmy się zatem kilku „faktom”. W projekcie budowlanym nawet najprostszej konstrukcji, takiej jak idealna kolumna, muszą być użyte prawdziwe liczby: wytrzymałość na ściskanie wszystkich trzech materiałów nie jest w rzeczywistości pojedynczą liczbą, jak w tabeli powyżej, ale zestawem wytrzymałości „f_k” (k w indeksie dolnym oznacza „właściwość”, tj. pojedynczą liczbę oszacowaną na zasadach statystycznych). Te wartości f_k identyfikujące „klasę wytrzymałości” każdego materiału są zdefiniowane w odpowiedniej normie jakości produktu i jest o nich mowa w odpowiednim standardzie projektowania (w Europie, w eurokodach). Jako że prawdopodobieństwo upadku konstrukcji zaprojektowanej na podstawie charakterystycznej wytrzymałości materiału byłoby za wysokie, inżynierowie używają wartości niższej niż charakterystyczna wytrzymałość materiału f_k – jego „projektowaną” wytrzymałość f_d = f_k/γ_m (d = „design”-projekt). Jest ona otrzymana przez podzielenie „charakterystycznych” wartości przez typowy dla materiału „czynnik bezpieczeństwa”, γ_m, który bierze pod uwagę zarówno kwestię materiału jak i projektu - sposób produkcji materiału, wpływ środowiska na właściwości materiału, dokładność teoretycznych modeli użytych w projekcie itd. Czynniki bezpieczeństwa, γ_m, mogą różnić się w państwach, ale wartości max-min można łatwo zidentyfikować. Mając do czynienia z kolumnami poddanymi ścisaniu, zestaw charakterystycznych wytrzymałości na ściskanie f_k, odpowiednie czynniki bezpieczeństwa, projektowane wytrzymałości f_d, i inne (częściowo zmodyfikowane) mechaniczne właściwości materiałów są wymienione w tabeli 1 dla trzech materiałów.

Po ponownym obliczeniu zakresów maksymalnych wysokości na podstawie projektowanej wytrzymałości, poprzedni obraz zostaje odwrócony (patrz tabela 1): stal jest na pierwszym miejscu, potem drewno i beton. Chociaż wygląda to teraz bardziej realistycznie, nowe maksymalne wartości wysokości pozostają dalekie od rzeczywistości, więc nadal czegoś brakuje.

Pierwszą regułą zrównoważonego użycia jakiegokolwiek materiału jest **zredukowanie ilości potrzebnego materiału do absolutnego minimum**. Jak mówią inżynierowie, „konstrukcje są projektowane od góry do dołu” (i zazwyczaj budowane od dołu do góry), ponieważ idąc w dół od wierzchołka całkowita waga W konstrukcji – i obciążenie eksploatacyjne, jeżeli występuje – oczywiście wzrasta. Mając podaną maksymalną wytrzymałość materiału, f_d, powierzchnia konstrukcji, A, nie powinna więc być stała, ale powinna wzrastać od teoretycznego minimum na wierzchołku do maksymalnej wartości A_{max} u podstawy. Geometria tej „kolumny o jednolitym oporze” ze zróżnicowanym przekrojem powierzchni A jest bardzo dobrze zna-

na i łatwa do rozpoznania w szeregu konstrukcji powstałych naturalnie lub wytworzonych przez człowieka. (rys. 1).

Ze zmienną powierzchnią A waga W jest zredukowana, a wysokość h_{max} powinna wzrosnąć, więc pozostaje problem: dlaczego kolumna, nawet o jednolitym oporze, nie może osiągnąć teoretycznej maksymalnej wysokości h_{max}? Odpowiedź: ponieważ byłaby zbyt „smukła” i upadłaby z powodu niestabilności, jak to się stało w przypadku Wieży Babel. Ten „stosunek do wybożenia” jest brany pod uwagę w standardach projektowania przez ustalanie limitów „wskaźnika smukłości” materiału, λ. Dla idealnej kolumny o stałym kołowym kształcie o promieniu r, tj. bez określonego kierunku wybożenia, jest to: λ = K h/r → r = K h/λ.

K jest parametrem, który zależy od efektywności ograniczenia na krańcach kolumny i w uproszczonej analizie wartość K = 1,0 może zostać przyjęta dla wszystkich materiałów, tj. nie zależy od materiału.

Dla podanej wysokości h, im wyższy jest współczynnik smukłości λ, tym mniejszy jest promień i powierzchnia A, a tym samym mniejsza ilość potrzebnego materiału – i odwrotnie. Parametr h/λ bierze zatem pod uwagę zarówno wytrzymałość i stabilność, dwa aspekty rozważane w przypadku kolumn.

Zasięgi smukłości (h/λ) zastały obliczone na podstawie wyliczonej wcześniej maksymalnej wysokości h_{max} i limitów dla λ podanych w odpowiednich eurokodach dla drewna, betonu (zbrojonego) i stali (tabela 1). Na podstawie (h/λ) beton jest pierwszy i chociaż nie ma istotnej różnicy między betonem a stalą, wartość (h/λ) drewna jest znacząco wyższa od dwóch pozostałych materiałów. Jest to jeden z powodów, dla których najwyższy budynek w świecie jest betonowy, a wysokość rzeczywistych konstrukcji drewnianych jest ograniczona: problemem tego materiału jest wybożenie.

Biorąc pod uwagę „fakty” widoczne staje się, że **stosunek wytrzymałości (na ściskanie) materiałów budowlanych do ich masy jednostkowej jest zwodniczy**, gdy konstrukcje mają utrzymać obciążenie ściskające. Ma to sens dla innych konstrukcji – rakiety, statków, samolotów, samochodów Formuły 1, mostów, gdzie ciężar naprawdę jest problemem. Z tego powodu lekkie stopy, jak aluminium, były używane w przeszłości, a dziś używane są materiały kompozytowe, takie jak włókna węglowe. Sytuacja zmieni się prawdopodobnie w przyszłości z powodu postępu nauki i technologii, który przyniesie mocniejsze a lżejsze materiały budowlane. Dzisiaj fakty wyglądają jednak tak, jak zostały opisane.

2) Od materiałów do funkcjonalnych jednostek

Powyższe przykłady pokazują, że **porównania** w konstrukcjach budownictwa i inżynierii lądowej



Rys. 1. Wytworzone przez człowieka i naturalne konstrukcje o jednolitym oporze

robione tylko na podstawie właściwości materiału są zwodnicze. Pytaniem, które powinno paść pierwsze jest: **jaka funkcję ma pełnić element strukturalny?** Płyta ma podtrzymywać dany ciężar (włączając własną wagę); kolumna ma podierać daną całkowitą powierzchnię płyt, a więc znowu dany całkowity ładunek; fundament ma wspierać kolumnę podtrzymującą liczne płyty, więc znowu dany ciężar... I tak dalej. **Jeżeli chodzi o elementy strukturalne, wytrzymałość na obciążenie jest podstawowym kryterium,** ale inne mogą zostać dodane, np. trwałość (utrzymanie nośności przez okres trwania konstrukcji określonej w projekcie), odporność, użytkowalność, koszt, wpływ na środowisko itd.

Generalizując, wymagana „wydajność” (konstrukcyjna, termiczna itd.) jest związana z „**funkcjonalną jednostką**” konstrukcji. Ta „funkcjonalna jednostka” powinna zostać zidentyfikowana najpierw – tak mała jak pojedyncza kolumna lub tak duża jak cały budynek. Aby prawidłowo to wykonać, należy przemyśleć „ograniczenia”. Przykładowo, jako że konstrukcje muszą stać pewnie na ziemi, optymalnie zaprojektowana kolumna wywrze nacisk na ziemię mniej więcej równy projektowanej wytrzymałości, f_d , użytego materiału budowlanego. Wyłączając skałę, wytrzymałość na obciążenie zwykłej ziemi jest częścią projektowanej wytrzymałości f_d jakiegokolwiek materiału: w konsekwencji kolumny nie mogą leżeć bezpośrednio na ziemi i potrzebny jest pośredni element strukturalny, fundament, by rozłożyć ciężar. Niezależnie od materiału, z którego zrobiona jest nasza idealna kolumna, jeżeli mamy porównywać budowlane rozwiązania w użyciu alternatywnych materiałów, musimy rozważać kolumnę razem z fundamentem, a ten zazwyczaj budowany jest z betonu.

Inne ograniczenia mogą zależeć od sposobu połączenia jednostki z większą konstrukcją – kolumna może być różnie utwierdzona na końcach, tak więc jej smukłość jest modyfikowana – lub od sposobu dostępności funkcjonalnej jednostki na rynku – przemysłowo produkowane komponenty, takie jak elementy stalowe i drewniane, mają zazwyczaj określone i ograniczone wymiary podane w katalogu i projektant przyjmuje najbliższy dostępny przekrój, a nie „idealny”⁷. Jeżeli porównujemy materiały, funkcjonalna jednostka powinna być:

- zidentyfikowana najpierw, a potem zdefiniowane „ograniczenia”, jeżeli istnieją
- optymalnie zaprojektowana z użyciem właściwości **projektowych** każdego materiału i braniem pod uwagę powszechnie stosowanych praktyk na rynku.

Jak już powyższe kryteria zostaną spełnione w przypadku elementów strukturalnych, łatwo jest obliczyć ciężar, jaki funkcjonalna jednostka o danej geometrii zrobiona z konkretnego materiału może udźwignąć – wliczając własny ciężar. Ten ciężar powinien zostać użyty do określenia wymiarów tej samej jednostki wykonanej z innych materiałów, biorąc pod uwagę ich właściwości i zachowanie konstrukcyjne. Zrównoważona ewaluacja oparta na trzech „zrównoważonych filarach” może zostać przeprowadzona tylko wtedy, gdy zostały zidentyfikowane różne rozwiązania, wszystkie zdolne do podtrzymania tego samego ciężaru, tj. wypełnienia żądanej funkcji.

W celu szybkiego porównania i uniknięcia kłopotliwego projektu można jednakże wykorzystać uproszczone podejście opisane poniżej.

3) Pierwsza zasada projektu strukturalnego

Rozważmy metrowej długości wycinek idealnej kolumny pod długoterminowym ciężarem teoretycznie doskonale wycentrowanym tak, że skrzywienie nie musi być brane pod uwagę. Kolumna jest częścią budynku, który będzie miał piętra o ograniczonej wysokości, znowu aby nie musieć brać pod uwagę wybożenia, bo może stanowić to problem dla drewnianych elementów.

W przypadku braku wybożenia, jeżeli kolumna jest zrobiona z jednorodnego materiału (w tym kontekście drewno i stal budowlana mogą być uważane za jednorodne, podczas gdy beton zbrojony już nie) wytrzymujące projekt siły osiowej N_{Rd} są podane poprzez wzór już określony („t” = drewno, „s” = stal):

$$N_{Rdt} = A_t f_{tk} / \gamma_t = A_t f_{td} N_{Rds} = A_s f_{sk} / \gamma_s = A_s f_{sd} \quad [1]$$

A_t i A_s to pola przekroju poprzecznego drewna i stali, f_{td} i f_{sd} to ich „projektowane” wytrzymałości na ściskanie.

W przypadku niejednorodnego materiału, takiego jak beton zbrojony („rc”), jednowymiarowa kolumna zewnętrznej części betonowej powierzchni A_c zawiera powierzchnię A_{sl} podłużnych prętów ze stali zbrojeniowej i powierzchnię A_{swt} poprzecznej stali użytej w strzemiączkach zbrojeniowych; ta druga nie jest wymagana w obliczeniach obciążenia osiowego, ale musi być brana pod uwagę w ekonomicznych i środowiskowych ewaluacjach.

Aby porównać niejednorodne rozwiązanie betonu zbrojonego z innymi, konieczne jest „ujednorodnienie”, przekształcenie stali w idealny beton przy użyciu tak zwanych „współczynników zwiększania” betonu zbrojonego, które „idealnie” mnożą podstawowe właściwości betonu (wytrzymałość, koszt itd.), żeby wziąć pod uwagę obecność stali⁸. Dla osiowo obciążonych kolumn „współczynnik zwiększania wytrzymałości” α_c jest zdefiniowany tak, że wzór ma format podobny do tych stali i drewna:

$$N_{Rdrc} = A_c (\alpha_c f_{ck}) / \gamma_c = A_c \alpha_c f_{cd} \quad [2]$$

Niezależnie od któregośkolwiek z trzech materiałów, „funkcją” kolumny jest wspieranie zaprojektowanego ciężaru osiowego N_{Ed} . Do porównania jednostek funkcjonalnych stosuje się następujące równości:

$$N_{Ed} = N_{Rdt} = N_{Rds} = N_{Rdrc} \rightarrow N_{Ed} = A_t f_{td} = A_s f_{sd} = A_c (\alpha_c f_{cd}) \quad [3]$$

Równanie [3] określa **pierwszą zasadę projektu (strukturalnego)**: z powodów ekonomicznych, społecznych i ekologicznych, niezależnie od materiału, należy używać **minimum ilości** (powierzchnia A), co jest technicznie możliwe przez wybranie jego technicznie **maksymalnie dostępnej wydajności** (wytrzymałość projektowana f_d), ponieważ **odpowiednie bezpieczeństwo** jest gwarantowane przez konkretne czynniki bezpieczeństwa γ .

Po zidentyfikowaniu (faktycznej lub wzmocnionej) wytrzymałości projektowanej f_d każdego materiału, powyższe równości dają teoretyczne minimalne powierzchnie drewna A_t , stali A_s i betonu A_c , tj. dla każdego materiału powierzchnie przekroju zdolne podtrzymać określony ciężar N_{Ed} . To podejście jest o wiele efektywniejsze niż stosunek wytrzymałości do masy jednostkowej, jako że nie jest oparte jedynie na właściwościach materiału ale na koncepcie „funk-

cjonalnej jednostki” spełniającej określoną funkcję – w tym przypadku podtrzymanie ciężaru N_{Ed} . Jednakże odniesienie do „teoretycznej minimalnej” powierzchni jest częściowo zwodnicze, więc powinno być użyte jedynie do pierwszej, wstępnej ewaluacji, ponieważ ograniczenia istnieją w powszechnie dostępnych przekrojach drewna i stali, i w przypadku betonu zbrojonego, w bieżącej geometrii i minimalnej/maksymalnej ilości wzmocnienia. Jak już wspomniano, porównanie powinno być oparte na obliczeniu maksymalnej nośności ciężaru R_d funkcjonalnej jednostki o **prawdziwym** przekroju wybranego materiału. Dla kolumny, po wyborze materiału, obliczona zostaje maksymalna nośność $N_{Rd} \geq N_{Ed}$ a potem jest użyta do zaprojektowania **prawdziwych** wymiarów, po wykorzystaniu innych materiałów, we wszystkich przypadkach brane są pod uwagę ograniczenia geometryczne typowe dla materiału, jeżeli występują. Następnie można porównać otrzymane wyniki.

4) Uwzględnianie ekonomii i środowiska

To, co zostało opisane powyżej, dotyczy głównie bezpieczeństwa, społecznego filaru zrównoważonego rozwoju, więc tylko częściowo odnosi się do kwestii. A co z pozostałymi dwoma filarami – ekonomicznym i ekologicznym?

Odnosząc się do **ekonomicznego filaru**, należy oszacować koszt C funkcjonalnej jednostki zrobionej z każdego materiału. Po zidentyfikowaniu powierzchni A , jak opisano wyżej, objętość V metrowego elementu otrzymana jest przez pomnożenie powierzchni przekroju A (w m^2) przez l , tak więc $V = (A \times l) = A$. Jeżeli koszt jednostkowy materiałów c (koszt na jednostkę objętości)⁹ w konkretnym miejscu **w tych samych warunkach dostawy** (np. pod bramą placu budowy) jest znany, koszty metrowej funkcjonalnej jednostki dla drewna C_t , stali C_s i betonu zbrojonego C_{rc} to:¹⁰

$$\begin{aligned} C_t &= c_t A_t = N_{Ed} (c_t / f_{td}) \\ C_s &= c_s A_s = N_{Ed} (c_s / f_{sd}) \\ C_{rc} &= c_{rc} A_c = N_{Ed} (c_{rc} / \alpha_c f_{cd}) \end{aligned} \quad [4]$$

W przeciwieństwie do obliczeń wytrzymałości, współczynnik kosztu betonu zbrojonego c_{rc} musi w tym przypadku zawierać koszt zarówno powierzchni podłużnej stali A_{st} i poprzecznej stali A_{swt} używanej w strzemiaczkach zbrojeniowych. Można to uzyskać poprzez zastosowanie „współczynnika zwiększania kosztu” betonu zbrojonego $\alpha_{cc} > 1$ do podstawowego kosztu betonu c_c :

$$c_{rc} = \alpha_{cc} c_c$$

A co z **ekologicznym filarem**? Chociaż profil ekologiczny każdego materiału może być opisany przy użyciu wielu parametrów¹¹, w celu uproszczonego podejścia używanego w tym studium używany jest jedynie „ślad węglowy” odnoszący się do „efektu cieplarnianego”. Energochłonność i liczby związane z emisją, określone jako część inwentaryzacji cyklu życia (LCI) każdego materiału budowlanego, mogą być ewaluowane w kwestii kosztów przy użyciu tak zwanego „wyemitowanego CO_2 ” (ECO_2 – ilość CO_2 wyemitowana z objętości jednostkowej materiału¹²) i Analizy Cyklu Życia (LCA) od „kotłyszki do bramy (budowy)”.

CO_2 w materiałach jest „... *nadal sprawą debaty i z uwagą należy przekazywać dane zebrane w jednym kraju lub regionie do innych krajów*...”¹³; jako że dane pochodzące z różnych źródeł podają różne

wartości „wyemitowanego CO_2 ”, mile widziana będzie ustandaryzowana informacja (na przykład jak w Deklaracji Środowiskowej Produktu – EPD).

Wymieniając w równaniu [4] koszty jednostkowe (c) na jednostkę wyemitowanego CO_2 (e_{CO_2}) w kg/m^3 , utrzymując jak wcześniej $V = (A \times l) = A$:

$$\begin{aligned} ECO_{2t} &= e_{CO_{2t}} A_t = N_{Ed} (e_{CO_{2t}} / f_{td}) \\ ECO_{2s} &= e_{CO_{2s}} A_s = N_{Ed} (e_{CO_{2s}} / f_{sd}) \\ ECO_{2rc} &= e_{CO_{2rc}} A_c = N_{Ed} / (e_{CO_{2c}} r / \alpha_c f_{cd}) \end{aligned} \quad [5]$$

Jeżeli chodzi o koszt, aby wziąć pod uwagę podłużną i poprzeczną stal, „współczynnik zwiększenia” $\alpha_{cCO_2} > 1$ musi być zastosowany do wyemitowanego CO_2 z betonu $e_{CO_{2c}}$:

$$e_{CO_{2rc}} = \alpha_{cCO_2} e_{CO_{2c}}$$

Mając trzy jednostki pełniące tę samą funkcję (wspieranie tego samego ciężaru N_{Ed}), **każda z nich używa dokładnie takie samo teoretyczne minimum materiału** (minimalna powierzchnia A), z równania [4] i [5] **porównanie teoretycznego kosztu i/lub wyemitowanego CO_2** może być otrzymane poprzez **porównanie stosunku** (prawdziwego lub zwiększonego) „kosztu do jednostki projektowanej wytrzymałości” (c/f_d) i **stosunku „wyemitowanego CO_2 do jednostki projektowanej wytrzymałości”** (e_{CO_2}/f_d) różnych materiałów – im mniejsze, tym lepiej. Podkreślamy „teoretyczne”, ponieważ, jak wspomniano wcześniej, „idealne” rozwiązania mogą być zwodnicze i korzystniej jest porównywać „prawdziwe” rozwiązania. Mimo to, pierwsza klasyfikacja może być oparta na porównaniu stosunków materiałów (c/f_d), unikając wykonania projektu strukturalnego. Trzeba przypomnieć, że wyniki zależą od **kosztów, wyemitowanego CO_2 użytych materiałów, a te są zazwyczaj różne w różnych państwach z uwagi na zwyczaje projektowania, charakterystyki materiałów i ceny jednostkowe.**

5) Przykład

W poniższym przykładzie funkcjonalnej jednostki, czyli „idealnej kolumny” wspierającej ten sam ładunek osiowy N_{Ed} trzy różne materiały są porównane przy użyciu stosunku koszt/wytrzymałość i wyemitowany CO_2 /teoretyczna wytrzymałość.

W przypadku wytrzymałości odniesienia robione są do materiałów obecnie używanych w UE; koszty są zależne od danego państwa, w którym dane związane z cenami są publicznie dostępne¹⁴; dane dotyczące wyemitowanego CO_2 są wzięte z literatury¹⁵. Zaprojektowane wytrzymałości są obliczane przy założeniu wskaźnika bezpieczeństwa sugerowanego w odpowiednich Eurokodach. Dla wszystkich materiałów przyjmuje się podejście od kotłyszki do bram budowy. Wykorzystane dane dotyczące materiałów: Drewno: klasa C30, f_{td} 9,6 N/mm²

$$c_t = € 300/m^3 \quad e_{CO_{2t}} = 80 \text{ kg/m}^3$$

Stal budowlana: klasa S355, f_{yd} = 338 N/mm²

$$c_s = 12.560 \text{ €/m}^3 \quad e_{CO_{2s}} = 9420 \text{ kg/m}^3$$

Beton: klasa C30/37 XC4, f_{cd} = 20 N/mm²

$$c_c = 95 \text{ €/m}^3 \quad e_{CO_{2c}} = 304 \text{ kg/m}^3$$

Stal zbrojona: klasa B500, f_{yd} = 435 N/mm²

$$c_s = 7850 \text{ €/m}^3 \quad e_{CO_{2rs}} = 6700 \text{ kg/m}^3$$

Zakładając, że przekrój betonowej powierzchni A_c wzmocnionej powierzchnią $A_s = 1,5\% A_c$ stali zbrojonej klasy B500, „współczynniki zwiększenia” betonu zbrojonego wynoszą¹⁶:

$$\alpha_c = 1,23 \quad \alpha_c f_{cd} = 1,23 \times 20 = 24,5 \text{ N/mm}^2$$

$$\alpha_{cc} = 2,86 \quad c_{rc} = \alpha_{cc} c_c = 2,86 \times 95 = 272 \text{ €/m}^3$$

$$\alpha_{cCO_2} = 1,39 \quad e_{CO_{2rc}} = \alpha_{cCO_2} e_{CO_{2c}} = 1,39 \times 304 = 423 \text{ kg/m}^3$$

Obecność stali zbrojeniowej zwiększa wytrzymałość betonu o 23%, koszt o 186%, a wyemitowany CO₂ o 39%: optymalizacja jest możliwa przez: a) decyzję, na jakich aspektach się skupić; i staranny wybór b) typu cementu, c) klasy betonu i d) jakości zbrojenia: **wybory projektanta** – świadome czy nieświadome – **dotyczące różnicowania efektywności rozwiązań, ich opłacalności i przyjazności dla środowiska.**

Na podstawie powyższych danych stosunki kosztu do wytrzymałości i wyemitowanego CO₂ do wytrzymałości są wykazane w tabeli 2. Relatywne stosunki są oszacowane, przyjmując drewno jako 100% odsyłacz: koszt rozwiązania związanego ze stalą jest około 1,2 wyższy niż drewna i około 4 razy wyższy niż betonu; koszt rozwiązania związanego z drewnem jest około 2,8 razy wyższy niż betonu. CO₂ wyemitowany z betonu jest około 2,6 razy wyższy niż z drewna, a CO₂ wyemitowanego ze stali więcej niż 3,3 razy wyższy: drewno wyraźnie okazuje się materiałem „przyjaznym środowisku”!

Ale ta wydajność wiąże się z kosztami: w ostatnich dwóch wierszach tabeli 2 znajduje się odniesienie do zarówno ekonomicznych jak i ekologicznych aspektów zrównoważonego rozwoju. Koszt metrowej funkcjonalnej jednostki jest podzielony przez ilość w kilogramach wyemitowanego CO₂, dającego koszt 1 kg CO₂ w jednym metrze jednostki. Jeżeli obydwa aspekty, ekonomiczny i ekologiczny, mają być zoptymalizowane – im mniejsza liczba, tym lepiej. Brane pod uwagę w ten sposób **drewno jest właściwie najmniej efektywnym materiałem**; stal i beton zbrojony są o wiele lepsze – liczba dla stali stanowi około 1/3 liczby dla drewna, a ta dla betonu zbrojonego około 1/6. **Decyzja, które wskaźniki potraktować jako priorytetowe spośród ekonomicznych i ekologicznych, jest uwarunkowana politycznie i społecznie**, szczególnie w okresie niedostatku środków finansowych, ale jeżeli brane są pod uwagę zarówno aspekty techniczne jak i ekonomiczne, optymalne rozwiązanie jest oczywiste.

Jeżeli, jak zostało to opisane wcześniej, „rzeczywiste” porównanie jest robione w optymalnym projektowaniu drewnianej jednostki w celu określenia maksymalnego ciężaru, który może ona udźwignąć, wtedy użycie tego ciężaru w optymalnym projektowaniu jednostek wykonanych ze stali i betonu zbrojonego potwierdza wartości podane w tabeli 2: można zatem wyciągnąć wniosek, że

teoretyczne **stosunki kosztu do wytrzymałości i wyemitowanego CO₂ do wytrzymałości mogą być używane we wstępnych porównaniach.**

Chociaż koszty różnią się w krajach, a wartości wyemitowanego CO₂ są dalekie od bycia uniwersalnie uzgodnionymi, to względne stanowisko cechuje się ogólną zasadnością i wyjaśnia, dlaczego zbrojony beton pozostaje powszechnie używanym materiałem budowlanym: po prostu dlatego, że **dla żądanej konstrukcji i wydajności ekologicznej jest zdecydowanie najbardziej opłacalnym materiałem.**

Także, w przeciwieństwie do dwóch konkurujących rozwiązań, wpływ betonu na środowisko może być dalej optymalizowany poprzez dostosowywanie projektu mieszanki betonowej. Producenci drewna nie mogą zredukować wyemitowanego z ich materiału CO₂, a producenci betonu mogą chociażby przez wybór typu cementu (wieloskładnikowy cement jest zarówno technicznym jak i przyjaznym dla środowiska rozwiązaniem) i zawartości cementu, co wpływa także na klasę wytrzymałości cementu. Używając mechanicznych określeń w niemechaniczny sposób, można powiedzieć, że producenci cementu (oraz osoby określające szczegółową specyfikę materiałów) mają liczne „**stopnie swobody**” w projektowaniu, specyfikacji i użyciu produktu. Konkurenci nie mają podobnej opcji technicznego ulepszenia, jak producenci betonu. Jeżeli redukcja wyemitowanego CO₂ jest głównym celem funkcjonalnej jednostki, „przyjazne dla środowiska” rozwiązanie betonowe może być łatwo określone poprzez użycie cementu różnego typu i/lub wyższej klasy betonu, i/lub ilości wzmocnienia.

Nawet te wnioski są dalekie od bycia końcowymi. Powyższe studium jest oparte na optymalnym projekcie (tj. minimalnej powierzchni) drewnianego rozwiązania: i jako takie może być zwodnicze, jako że występują dotkliwie ograniczenia dotyczące maksymalnego obciążenia, jakie drewno jest w stanie udźwignąć. Na przykład (300x300) mm C30 drewniany wycinek może dostarczyć maksymalnie 860 kN (86 t) projektowanego obciążenia osiowego. Ta nośność może być adekwatna dla budynków z ograniczoną ilością pięter – gdzie drewno jest używane – ale jeżeli potrzeba większej ilości pięter (i w konsekwencji projektowanego ciężaru ponad 860 KN), rozwiązanie z drewnem nie może być zastosowane z technicznych względów. W tym przypadku stal i zbrojony beton są jedynymi technicznymi rozwiązaniami dostępnymi dla projektantów.

Ponadto, przekrój powierzchni stali i drewna, które doskonale pasują do żądanej nośności, mogą nie być dostępne na rynku. Wraz z ograniczonym wzrostem rozmiaru kolumny rośnie jej nośność też w ograniczonym stopniu. Stalowe kolumny są zazwyczaj zrobione przy użyciu tak zwanych HEA profili (rys. 2), których wysokość i baza wzrastają w 20 mm stopniach: dla określonej projektowanej wytrzymałości nośność takich kolumn rośnie w przybliżeniu proporcjonalnie do ich powierzchni około 20%, więc w licznych przypadkach nieunikniony jest materiał, który jest „odpadem”.

Nie jest to prawdopodobne w przypadku betonu dzięki elastyczności zapewnionej przez łączenie powierzchni wzmocnienia i wydajności betonu.

Tabela 2. Funkcjonalna jednostka, kolumna – „orientacyjne” porównanie

Parametr	Jednostka	Drewno C30	Stal S355	Beton 30/37
(wzmocniony) koszt jednostkowy	€/m ³	300	12560	272
(wzmocniona) wydajność jednostkowa	N/mm ²	9,6	338,0	24,5
koszt/wytrzymałość	(€/m ³)/(N/mm ²)	31,3	37,2	11,1
		100%	119%	36%
(wzmocniony) ECO ₂ jednostkowy	kg/m ³	80	9420	535
ECO ₂ /wytrzymałość	(kg/m ³)/(N/mm ²)	8,3	27,9	21,8
		100%	334%	262%
koszt/ ECO ₂	€/kg	3,75	1,33	0,51
		100%	36%	14%

6) Wnioski

Podejście zaprezentowane w tym studium, oparte na użyciu „współczynników wzmocnienia” dla wytrzymałości, kosztu i wyemitowanego CO₂ betonu zbrojonego, pozwala na optymalizację strukturalną i ewaluację kosztu i wyemitowanego CO₂ funkcjonalnych jednostek wykonanych z betonu. Porównania innych materiałów pokazują, że **beton zbrojony jest sam w sobie optymalnym i przyjaznym dla środowiska materiałem.**

Chociaż podejście to powstało dla prostej „idealnej” funkcjonalnej jednostki, nieulegającej wyboczeniu kolumny pod scentrowanym ciężarem, może być wykorzystane dla bardziej skomplikowanych funkcjonalnych jednostek z betonu zbrojonego, np. kolumny z różnie rozłożonym obciążeniem, płyty, belki itd. Dla tych elementów bierze się pod uwagę nie tylko nośność, ale też czynniki (np. ograniczenia odchylenia pod obciążeniem eksploatacyjnym, geometrię przekrojów itd.), które mogą mieć znaczący wpływ na ilości potrzebnego materiału i w konsekwencji na koszt i ekologię, obliczone muszą więc zostać różne wartości „współczynników zwiększania” betonu zbrojonego, ale porównania i/lub optymalizacja powinna być przeprowadzona tak, jak zostało to określone powyżej. Dzięki elastyczności w fazie projektu i w późniejszych (dostawa dokładnej żądanej ilości, odlewanie w bardziej skomplikowanych formach itd.), wydaje się, że beton zbrojony zostanie oceniony bardzo wysoko, kiedy weźmie się pod uwagę wszystkie kwestie związane ze zrównoważonym rozwojem także dla tych funkcjonalnych jednostek. Przedstawiając argumenty za rozwiązaniem beto-

nowym, musimy docenić i zrozumieć, że w przypadku dwuskładnikowego kompozytowego materiału takiego jak beton zbrojony możliwe są alternatywne projekty dopasowujące pożądane obciążenie i/lub wydajność ekologiczną – można:

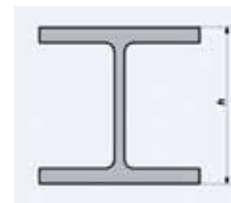
- zmienić przekrój powierzchni betonu i/lub stali zbrojonej, i/lub
- zoptymalizować projekt mieszanki betonowej, aby uzyskać zrównoważony rozwój lub wymagania budowlane.

Te „stopnie swobody” czynią beton zbrojony bardzo elastycznym i atrakcyjnym materiałem budowlanym, jako że mogą być dostarczone **dokładne** żądane ilości i właściwości, oznacza to mniejsze zużycie materiału, redukcję kosztu i obciążenia ekologicznego.

Rozważając zrównoważony rozwój betonu, powinno brać się pod uwagę także jego inne naturalne właściwości (dostępne **bez dodatkowych kosztów!**) – odporność na ogień, masę termiczną oraz przypadek betonu towarowego i liczne produkty z betonu prefabrykowanego z „0-km produkcją”. Ponadto, zrównoważony rozwój nie może być rozważany z pominięciem wpływu używania budynku i następującej przetwarzalności. Projektowane życie betonu wynosi przynajmniej 50 lat i może być on całkowicie przetworzony z powrotem na beton lub na podbudowę drogi. Wniosek jest więc oczywisty: **Zignoruj mity, skoncentruj się na faktach i naprawdę zrównoważonym budownictwie, użyj betonu!**

prof. Francesco Biasioli
ERMCO

European Ready Mixed Concrete Organization



Rys. 2. HEA przekrój

Przypisy

- 1 ONZ Bruntland Raport Światowej Komisji ds. Środowiska i Rozwoju
- 2 NE 15643-1 Zrównoważone obiekty budowlane – Ocena zrównoważoności budynków – Część 1: Postanowienia ogólne
- 3 <http://sparch.unipr.it/didattica/att/7bf4.7390.file.pdf>
- 4 Jeżeli nie ma mowy o wyboczeniu, próbka poprzecznej powierzchni A zawodzi w wytrzymałości, gdy siła obciążenia F : nacisk $f = (F/A)$ jest (ostateczną) wytrzymałością (siła upadku na jednostkę powierzchni) materiału, wyrażana zazwyczaj w N/mm^2
- 5 „Masą jednostkową” materiału jest jego waga W na objętość V ($w = W/V$). Symbolem używanym w fizyce do oznaczenia gęstości materiału (masa na jednostkę objętości) jest ρ (grecka litera rho) i $w = \rho g$, gdzie g oznacza przyspieszenie przyciągania ziemskiego. Według Międzynarodowego Systemu jednostek, gęstość jest podawana w kg , a masa jednostkowa w , w kN/m^3 . Ogólnie mówiąc kilogramy (kg) i tony (t) są często używane dla wagi: do przeliczania $1 kN \cong 100 kg$, $1 t = 1000 kg \cong 10 kN$
- 6 Max-min wartości według NE338 – Drewno konstrukcyjne – klasy wytrzymałości C20 – C50
- 7 W praktyce wykorzystywane są elementy stalowe, drewniane i z betonu prefabrykowanego o określonym przekroju. Odlewane na miejscu betonowe części mogą mieć teoretycznie dostosowaną wartość, ale w praktyce modelowanie też się zdarza
- 8 F. Biasioli – Mierzenie „współczynników zwiększania” w zrównoważoności betonu zbrojonego – w trakcie publikacji.
- 9 Podczas gdy koszt na jednostkę objętości ($€/m^3$) jest używany dla drewna i betonu, w przypadku stali jest on podany w $€/kg$ i musi być zmieniony na koszt na jednostkę objętości przez pomnożenie go przez masę jednostkową stali w : $(€/kg) \times (kg/m^3) = (€/m^3)$
- 10 Wszystkie koszty są do „bramy” placu budowy. Koszty związane z fazą budowlaną nie zostały rozważone: dla drewna i stali te związane z wnoszeniem i łączeniami (materiał i siła robocza); i dla betonu koszty rusztowania, odlewania i dojrzewania. Nawet jeżeli koszty są zawarte, pozycja materiałów nie zmienia się znacząco
- 11 Deklaracja Środowiskowa Produktu zgodna z NE15804 dostarcza do 24 różnych parametrów środowiskowych
- 12 Dane ECO₂ dostarczane zazwyczaj jako bezwymiarowe liczby – tj. kg emisji CO₂ na kg materiału – są przekształcane na wartości dla $1 m^3$ materiału przez mnożenie ich dla masy jednostkowej materiału
- 13 strona 15, Fib Bulletin 67, 2012– wytyczne dla konstrukcji z zielonego betonu – www.fib-international.org
- 14 Oficjalne ceny materiałów budowlanych i prac publikowane są we Włoszech albo przez producentów, albo przez lokalną Izbę Handlową, „uliczne” ceny są zazwyczaj niższe. Wykorzystane zostały następujące odniesienia: dla drewna i stali <http://www.elencoprezzi.provincia.tn.it>; dla betonu: http://www.marx.it/Preislisten/Beton_italienisch.pdf
- 15 Wyemitowany CO₂ betonu, drewna i stali: Fib Bulletin 67, 2012– wytyczne dla konstrukcji z zielonego betonu
- 16 F. Biasioli – Mierzenie „współczynników zwiększania” w zrównoważoności betonu zbrojonego – w trakcie publikacji