

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Pauliny Jamińskiej-Gadomskiej
pt. „*Analiza oddziaływania wiatru na układ budynek-rusztowanie*”

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą opracowania niniejszej recenzji jest zlecenie Dziekana Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej, prof. dr hab. inż. Bogusława Szmygina, prof. PL, wyrażone w piśmie WB-898/2019 z dnia 15.07.2019r. i załączony egzemplarz przedmiotowej rozprawy doktorskiej mgr inż. Pauliny Jamińskiej-Gadomskiej pt. „*Analiza oddziaływania wiatru na układ budynek-rusztowanie*”. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Tomasz Lipecki, prof. PL.

2. Ogólna charakterystyka pracy

Recenzowana praca dotyczy zagadnień związanych z analizą działania wiatru na ramowe rusztowania fasadowe bez zakryć ochronnych ustawione przy budynkach o pełnych elewacjach i ma charakter doświadczalno-obliczeniowy. W pracy przedstawiono wyniki autorskich badań eksperymentalnych wykonanych w skali naturalnej na wybranych rusztowaniach fasadowych i wyniki symulacji płaskiego przepływu powietrza wokół obiektu budynek-rusztowanie przy wykorzystaniu metody symulacji komputerowej CFD. Przeprowadzono weryfikację modelu turbulencji na podstawie porównania wyników obliczeń z danymi literaturowymi i wynikami pomiarów in-situ.

Praca napisana jest w języku polskim, a jej treść ujęta jest na 157 stronach formatu A4 i zawiera 102 rysunki, 12 tablic, 41 ponumerowanych wzorów i 118 pozycji bibliografii (w tym 22 akty prawne i normy). Praca obejmuje stronę tytułową, podziękowania, spis treści, zestawienie najważniejszych symboli, 9 ponumerowanych rozdziałów zatytułowanych: (1) *Wstęp*, (2) *Rusztowania i ich klasyfikacja*, (3) *Zalecenia normowe dotyczące przyjmowania obciążeń rusztowań*, (4) *Aktualny stan wiedzy z zakresu oddziaływania wiatru na rusztowania*, (5) *Metody modelowania turbulencji w CFD*, (6) *Badania in-situ oddziaływania wiatru na rusztowania*, (7) *Symulacje przepływu wokół słupków rusztowania (walidacja modelu turbulencji)*, (8) *Symulacje przepływu wokół budynku z rusztowaniem*, (9) *Podsumowanie i wnioski*, a także bibliografię, streszczenie w języku polskim i angielskim.

3. Treść pracy

W rozdziale 1 (4 strony) Autorka przedstawia problematykę omawianą w pracy, formułuje cel i zakres pracy.

Rozdział 2 (10 stron) poświęcono klasyfikacji rusztowań i omówiono ich elementy składowe.

W rozdziale 3 (12 stron) opisano ogólne wytyczne normowe dotyczące zasad ustalania obciążeń działających na rusztowania. Ze względu na rozpatrywaną problematykę naukową, dokładnie wyjaśniono specyfikę normowego obciążenia wiatrem.

W rozdziale 4 (14 stron) przedstawiono przegląd literatury dotyczącej działania wiatru na ramowe rusztowania fasadowe. Przedstawiono współczesne osiągnięcia w zakresie badań modelowych prowadzonych w tunelach aerodynamicznych, symulacji numerycznych CFD i pomiarów w skali naturalnej. Przegląd literatury poprzedzono opisem struktury pola opływu powietrza wokół budynków prostokątnych z uwzględnieniem zjawiska interferencji aerodynamicznej.

Rozdział 5 (13 stron) poświęcono omówieniu podstaw teoretycznych CFD i metod stosowanych do numerycznego modelowania przepływu turbulentnego w aerodynamice budowli. Szczegółowo omówiono klasyfikację modeli obliczeniowych metody uśrednień czasowych RANS, które różnią się przede wszystkim sposobem wyznaczania naprężeń Reynoldsa. Podano ich najważniejsze równania opisujące energię kinetyczną turbulencji i jej dyssypację.

W rozdziale 6 (28 stron) przedstawione zostały autorskie badania eksperymentalne wykonane w skali naturalnej na kilkudziesięciu rusztowaniach fasadowych, mające na celu pomiar prędkości i kierunku wiatru w pięciu punktach istniejącego rusztowania. Pomiary w płaszczyźnie poziomej wykonano za pomocą pięciu anemometrów ultradźwiękowych. Jednocześnie wykonano pomiar referencyjnej prędkości i kierunku wiatru za pomocą trójkierunkowego anemometru ultradźwiękowego zlokalizowanego ponad dachem budynku. W pracy przedstawiono wyniki pomiarów dla 11 wybranych rusztowań. Otrzymane wartości porównano z wartościami normowymi i wyjaśniono zauważone różnice.

W rozdziale 7 (20 stron) przedstawiono procedurę walidacji modelu przepływu turbulentnego $k-\omega$ SST na podstawie porównania wyznaczonych parametrów aerodynamicznych wolnostojących słupków rusztowania ustawionych w rzędzie jeden za drugim z danymi literaturowymi. Omówiono zagadnienia aerodynamiki walca kołowego z uwzględnieniem zjawiska interferencji aerodynamicznej. Wyjaśniono strukturę domeny obliczeniowej CFD, problemy modelowania przepływu w warstwie przyściennej i kryteria oceny jakości elementów siatki obliczeniowej. Ocenę skuteczności odwzorowania opływu wokół słupków przeprowadzono z zastosowaniem modeli turbulencji $k-\varepsilon$ standard, $k-\varepsilon$ RNG, $k-\varepsilon$ realizable i $k-\omega$ SST dla czterech typów siatek obliczeniowych, tj. *o-grid*, *hybrid*, *quad* i *tri*. Do wykonania autorskiej symulacji numerycznej uzasadniono wybór modelu $k-\omega$ SST i siatki typu *quad*.

W rozdziale 8 (31 stron) przedstawiono wyniki autorskich symulacji numerycznych płaskiego opływu powietrza wokół modelu istniejącego budynku z rusztowaniem, który był obiektem badań in-situ. W symulacjach CFD uwzględniono wpływ: różnego kąta natarcia wiatru, odwzorowania szczegółów elewacji budynku i oddalenia rusztowania od budynku. Analiza pozwoliła na poznanie zjawisk zachodzących podczas płaskiego opływu powietrza wokół obiektu i oszacowanie obciążenia wiatrem działającego na słupki rusztowania i elewację budynku. Weryfikację modelu turbulencji wykonano na podstawie porównania pomierzonych i symulowanych wartości prędkości i kierunku wiatru w wybranych punktach rusztowania. Wyniki obliczeń odniesiono do wartości normowych.

Rozdział 9 (7 stron) zawiera podsumowanie pracy i wnioski końcowe. Sformułowano wnioski w odniesieniu do zaleceń normowych i wskazano kierunki dalszych badań.

4. Merytoryczna ocena pracy

W aspekcie wciąż obserwowanych katastrof i sytuacji niebezpiecznych spowodowanych działaniem wiatru na rusztowania budowlane analizowaną problematykę badawczą należy uznać za

aktualną i ważną. Świadczy o tym intensyfikacja badań w tym kierunku w ostatnim dziesięcioleciu na skalę międzynarodową. Sprzyja temu możliwość stosowania nowoczesnej aparatury i narzędzi badawczych, do których należą zastosowane przez Doktorantkę czujniki ultradźwiękowe do pomiaru prędkości i kierunku wiatru i symulacje numeryczne przepływu powietrza wokół badanych obiektów, bazujące na podstawach Obliczeniowej Mechaniki Płynów. Należy tu jednak podkreślić, że przeprowadzenie badań i analiza wyników z pewnością wymagały od Autorki dużej wiedzy i przygotowania.

Jak wskazano w pracy, publikacje dotyczące analizowanego zagadnienia są wciąż nieliczne i niewystarczające do pełnego opisu problemu. Wynika to przede wszystkim ze złożoności zjawisk występujących podczas opływu powietrza wokół budynku z rusztowaniem i trudności interpretacji wyników. Jak podkreśla Doktorantka, aktualnie obowiązujące zalecenia normowe w sposób zbyt uproszczony traktują złożone zagadnienie przepływu powietrza wokół rusztowań ustawionych przy budynkach, prowadząc do zbyt przybliżonego określenia ich miarodajnego obciążenia wiatrem. Na tym tle szczególnie interesujące są badania Autorki mające na celu oszacowanie obciążenia skręcającego rusztowanie, wywołanego działaniem wiru powietrza odrywającego się od naroża budynku. Tego typu obciążenie może w szczególności prowadzić do uszkodzenia zakotwień i oderwania rusztowań od fasady budynku. Biorąc powyższe pod uwagę należy stwierdzić, że wyniki analiz mają istotne znaczenie poznawcze i mogą zostać wykorzystane w praktyce projektowej.

Wartościowym i zasadniczym elementem pracy są wyniki autorskich pomiarów na rzeczywistych obiektach i symulacji numerycznych przedstawione w rozdziałach 6-9. Te elementy mają największą wartość poznawczą i stanowią oryginalne osiągnięcia Autorki, do których w szczególności należy zaliczyć:

- przeprowadzenie badań w skali naturalnej na istniejących rusztowaniach fasadowych ustawionych przy budynkach w celu pomiaru prędkości i kierunku wiatru napływającego na elementy tych rusztowań,

- wykonanie symulacji numerycznych CFD w celu poznania zjawisk zachodzących podczas płaskiego opływu powietrza wokół rozpatrywanego układu budynek-rusztowanie i obciążenia wiatrem działającego na słupki rusztowania i elewację budynku,

- weryfikację wyników symulacji CFD na podstawie porównania z danymi literaturowymi i wynikami pomiarów in-situ w celu oceny przydatności modelu turbulencji $k-\omega$ SST do oszacowania obciążenia wiatrem działającego na elementy rusztowania fasadowego.

Należy przy tym podkreślić, że Doktorantka jest świadoma uproszczeń wykonanych analiz CFD polegających na symulacji przepływu płaskiego z uwzględnieniem wpływu jedynie słupków rusztowania, podczas gdy w rzeczywistości mamy do czynienia ze złożonym przepływem przestrzennym, na który mogą wpływać inne poziome elementy rusztowania. Takie stwierdzenie zamieszczono w pracy na str. 119 i 142. W tym kontekście pozytywnie oceniam zakres planowanych przez Doktorantkę badań, w których przewiduje się w przyszłości analizę przepływu przestrzennego.

W mojej ocenie układ pracy jest przemyślany i uzasadniony. Doktorantka w sposób logiczny uporządkowała różnorodność zagadnień stanowiących jej treść. Wykazała przy tym dobrą znajomość poruszanej problematyki, m. in. wyrażoną w krytycznym przeglądzie literatury. Jasno zostały sformułowane problemy badawcze i dążenie do ich oryginalnego rozwiązania. Dobór rysunków i wykresów jest prawidłowy. Dobrze uzupełniają informacje opisane w tekście pracy. Pewien niedosyt budzi brak tablicowego zestawienia najważniejszych wyników symulacji numerycznych. Praca zredagowana jest na dobrym poziomie edytorskim i napisana poprawnym językiem.

5. Pytania i uwagi ogólne

1. Na str. 24 poruszono problem wpływu oblodzenia elementów rusztowań na ich obciążenie wiatrem. Dotychczasowe badania aerodynamiczne, w tym krajowe, smukłych elementów o przekroju kołowym w warunkach ich oblodzenia wykazały istotną zmianę ważnych parametrów aerodynamicznych pod wpływem oblodzenia. Czy znane są podobne badania odnośnie systemów konstrukcyjnych rusztowań budowlanych?

2. Pewne wątpliwości budzi tytuł rozdziału 6, bowiem pomiar prędkości i kierunku wiatru zaledwie w pięciu punktach pomiarowych rusztowania na jednej wysokości trudno uznać za badanie oddziaływania wiatru na rusztowanie. Należy podkreślić, że w rozdziale tym nie oszacowano obciążenia wiatrem działającego na elementy rusztowania na podstawie otrzymanych wyników pomiarów, a wyniki te stanowiły jedynie podstawę weryfikacji wybranego modelu CFD.

3. Pomiary in-situ prędkości i kierunku wiatru realizowane były w płaszczyźnie poziomej w pobliżu górnej krawędzi budynków z rusztowaniem. Jest to strefa złożonego przepływu z dominującą składową pionową wektora prędkości wiatru, w której występuje przestrzenny efekt przepływu powietrza względem górnej krawędzi budynku. W symulacjach CFD pominięto ten efekt. Zatem lokalizacja punktów pomiarowych może utrudniać późniejszą interpretację i porównanie wyników pomiarów z wynikami symulacji. Bardziej uzasadniony wydaje się tu pomiar na mniejszych wysokościach budynku. Dlaczego zdecydowano się na taką lokalizację punktów pomiarowych? Niezbędny jest tu komentarz.

4. Dokładność pomierzonych wartości prędkości wiatru podanych na Rys. 6.19-6.20 i w Tab. 8.2 do trzeciego miejsca po przecinku jest nieuzasadniona w odniesieniu do dokładności pomiarowej zastosowanych anemometrów, która wynosi $\pm 0,1$ m/s. Podobna uwaga dotyczy wartości kierunku wiatru podanych w Tab. 8.2 (błąd pomiarowy kąta napływu wynosi $\pm 2^\circ$).

5. W terenie przedmiejskim na wysokości kilkunastu metrów nad poziomem terenu intensywność turbulencji zwykle mieści się w przedziale 10-20%. Potwierdzają to wyniki pomiarów in-situ przedstawione w pracy (pomierzona intensywność turbulencji wyniosła około 15 %). Zatem dlaczego walidację modelu turbulencji, przedstawioną w Rozdziale 7, wykonano w warunkach napływu przy małej turbulencji rzędu 5 %?

6. Wyniki symulacji CFD, które przedstawiono na Rys. 8.8 (str. 118), w zależności od założonego czasu uśredniania symulacji przepływu wskazują na istotne różnice. W pracy brakuje jednoznacznego stwierdzenia według jakich kryteriów należy przyjmować właściwy czas uśredniania symulacji CFD. Jest to ważna kwestia i wymaga dalszych analiz.

7. Na Rys. 6.19 i 6.20 brakuje wskazania lokalizacji anemometru 3D na dachu budynku. Jest to istotne w celu oceny wpływu strefy zaburzeń opływu na wyniki pomiarów prędkości wiatru.

8. Formułowanie wniosków ogólnych w punkcie 9.5 w odniesieniu do zaleceń normowych na podstawie analizy tylko jednego układu budynek-rusztowanie jest przedwczesne. Obciążenie wiatrem działającego na rusztowanie w dużym stopniu zależy od kształtu budynku i lokalizacji rusztowania względem fasady budynku. Podobna uwaga dotyczy intensywności turbulencji, która istotnie wpływa na rozkład ciśnienia wiatru na ścianach budynku prostopadłościennego.

6. Uwagi szczegółowe

Poniższe uwagi szczegółowe mają głównie charakter edycyjny i zostały przytoczone w celu udoskonalenia przyszłych prac Doktorantki.

1. Na str. 7/8, w zestawieniu symboli pominięto szereg ważnych oznaczeń zawartych w treści pracy, np.: ρ – gęstość powietrza (str. 32, 50 i 51), I_u – intensywność turbulencji (str. 32), t – czas (np. str.

51 i 54), f – częstość odrywania się wirów (str. 90), α – kąt napływu powietrza (str. 102, rys 7.11) lub σ_ω – stała modelu $k-\omega$.

2. W treści pracy pojawiły się pewne nieścisłości dotyczące stosowanych symboli, np. na str. 50 i 63 symbolem „L” oznaczono dwie różne wielkości, zaś do symbolu „t”, występującego wielokrotnie (np. na str. 51 lub 54), nie podano wyjaśnienia.

3. Od str. 28 brakuje konsekwencji stosowania znaków interpunkcyjnych (przecinek lub kropka) po wzorach matematycznych, przy czym najczęściej znaki te nie są stosowane.

4. W tytule punktu 3.2.2 „Współczynnik siły aerodynamicznej c_f ” pojawiło się nieprecyzyjne sformułowanie, gdyż nie wiadomo jakiej siły aerodynamicznej dotyczy treść zawarta w tym punkcie.

5. Podsumowanie 5.5.4 na str. 60 dotyczy całego Rozdziału nr 5, zatem powinno być oznaczone numerem 5.6.

6. Na str. 55 pojawił się błąd w opisie oznaczenia naprężeń Reynoldsa do wzoru nr (17) – zamiast „ $-\overline{\rho u'_i u'_m}$ ” powinno być „ $-\overline{\rho u'_i u'_j}$ ”.

7. Schemat rozmieszczenia anemometrów w2, w3 i w4 przedstawiony na Rys. 8.3a nie jest zgodny z lokalizacją tych anemometrów przedstawioną na Rys. 8.3b.

8. Na str. 118 znajduje się sformułowanie „...dla punktu w1 znajdującego się przy narożu budynku.”, tymczasem punkt pomiarowy w1 nie znajduje się przy narożu budynku.

9. W wykazie bibliografii w pozycji [61] nie podano roku publikacji, w pozycjach [93] i [94] błędnie zapisano nazwisko współautora cytowanej publikacji, zaś w pozycji [110] nie podano wydawnictwa.

10. W wykazie bibliografii pewne zastrzeżenia budzi ujęcie, wraz z książkami i artykułami naukowymi, aktów prawnych i przepisów normowych, które należałoby zestawić osobno. Brak jest także wykazu trzech stron internetowych, które przywołano na str. 17, 36 i 110 (w podpisach Rys. 2.5, 4.1 i 8.1).

11. W kilku miejscach pojawiły się drobne błędy językowe, tj.: na str. 40 jest „...do punktowych pomiarów prędkość...” zamiast „...do punktowych pomiarów prędkości...”; na str. 52 (Rys. 5.1) jest „OPRATE NA” zamiast „OPARTE NA” oraz „Mixing lenght model” zamiast „Mixing length model”; na str. 88 jest „Rys. 6.20b przestawia...” zamiast „Rys. 6.20b przedstawia...”; na str. 117 jest „...poddając dwie składowe...” zamiast „...podając dwie składowe...”; na str. 121 (podpis Rys. 8.10) jest „...dokoła...” zamiast „...dookoła...”; na str. 139 (podpis Rys. 8.31) jest „...przy różnych kątach napływ wiatru...” zamiast „...przy różnych kątach napływu wiatru...”.

7. Wniosek końcowy

Podsumowując niniejszą recenzję stwierdzam, że rozprawa doktorska Pani mgr inż. Pauliny Jamińskiej-Gadomskiej pt. „*Analiza oddziaływania wiatru na układ budynek-rusztowanie*” stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wnosi cenny wkład w rozwój wiedzy w zakresie badania wpływu działania wiatru na rusztowania fasadowe ustawione przy budynkach. Przedmiotowa praca świadczy o umiejętności samodzielnego formułowania i rozwiązywania problemów naukowych przez Autorkę i potwierdza ogólną jej wiedzę w zakresie analizowanych zagadnień.

Reasumując powyższe stwierdzam, że opiniowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę „*O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki*” z dnia 14 marca 2003r. (art. 13 ust. 1). Tym samym **stawiam wniosek o dopuszczenie Pani magister inżynier Pauliny Jamińskiej-Gadomskiej do publicznej obrony przedmiotowej rozprawy doktorskiej.**