

Dr hab. inż. Piotr Górski
Katedra Dróg i Mostów
Wydział Budownictwa i Architektury
Politechnika Opolska
ul. Katowicka 48
45-061 Opole

Opole, dn. 23.01.2020r.

Recenzja

pracy doktorskiej mgr inż. Renaty Kłaput
pt. *„Wpływ szerokości szczelin w ściankach bocznych tunelu aerodynamicznego
na wyniki badań modelowych”*

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą opracowania niniejszej recenzji jest zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej, Pana dr hab. inż. Andrzeja Szaraty, prof. PK, wyrażone w piśmie LO.510.3.3.2019 z dnia 17.12.2019r. i załączony egzemplarz przedmiotowej pracy doktorskiej mgr inż. Renaty Kłaput pt. *„Wpływ szerokości szczelin w ściankach bocznych tunelu aerodynamicznego na wyniki badań modelowych”*. Promotorem pracy jest Pan prof. dr hab. inż. Andrzej Flaga.

2. Ogólna charakterystyka pracy

Recenzowana praca ma charakter doświadczalny i dotyczy badania wpływu ścianek bocznych szczelinowych o regulowanej szerokości poziomych szczelin na strukturę napływającego powietrza i efekt zjawiska blokowania przepływu powietrza w przestrzeni pomiarowej tunelu aerodynamicznego podczas badań modelowych. Pomiarów eksperymentalnych przeprowadzono w tunelu aerodynamicznym Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej, którego kierownikiem jest Pan prof. dr hab. inż. Andrzej Flaga. Prace badawcze zostały podzielone na trzy etapy. W pierwszym etapie przeprowadzono regulację kątów wzajemnego ustawienia łopatek jednostopniowego układu kierownic w celu uzyskania jednorodnego rozkładu średniej prędkości wiatru w przestrzeni pomiarowej tunelu aerodynamicznego. Kolejne dwa etapy stanowią zasadniczą część pracy. Przedstawiono tu wyniki autorskich badań eksperymentalnych w zakresie badania struktury wiatru w przestrzeni pomiarowej tunelu w sytuacji bez modelu i z dwoma modelami, które w różnym stopniu blokowały przepływ powietrza. Następnie przeprowadzono badania współczynnika oporu aerodynamicznego i ciśnienia wiatru na ścianach zewnętrznych modeli badawczych różniących się kształtem i wymiarami. Analizowano przy tym wpływ trzech szerokości szczelin w ściankach bocznych tunelu na wyniki pomiarów w warunkach przepływu powietrza formowanego o różnej prędkości i turbulencji przy trzech konfiguracjach chropowatości terenu.

Praca napisana jest w języku polskim, a jej treść ujęta jest na 129 stronach formatu A4 i zawiera 127 rysunków, 29 tablic, 43 wzory i 45 pozycji literatury. Praca obejmuje stronę tytułową, podziękowania, spis treści, 9 ponumerowanych rozdziałów zatytułowanych: (1) *Cel i zakres pracy*, (2) *Tezy pracy doktorskiej*, (3) *Pole prędkości wiatru w warstwie przyziemnej*, (4) *Niektóre kryteria podobieństwa*, (5) *Tunel aerodynamiczny Politechniki Krakowskiej i użyta w badaniach aparatura*, (6) *Badania przepływu powietrza na wlocie tunelu aerodynamicznego przy użyciu jednostopniowego układu kierownic*, (7) *Badania struktury wiatru w tunelu aerodynamicznym przy różnych*

szerokościach szczelin ścianek bocznych, trzech kategoriach chropowatości terenu, bez modelu i z dwoma modelami o różnej zabudowie, (8) Efekt blokady przepływu, (9) Wnioski końcowe, a także literaturę, streszczenie w języku polskim i angielskim.

3. Treść pracy

W rozdziale 1 (2 strony) Autorka przedstawia problematykę omawianą w pracy, formułuje cel i zakres pracy z podziałem na trzy etapy.

W rozdziale 2 (1 strona) przedstawiono dwie tezy pracy doktorskiej.

Rozdział 3 (7 stron) poświęcono omówieniu najważniejszych parametrów charakteryzujących strukturę wiatrów silnych w warstwie przyziemnej. Przedstawiono tu między innymi, znane z literatury, matematyczne ujęcie przestrzennego pola prędkości wiatru, pionowego profilu średniej prędkości wiatru, kategorii chropowatości terenu, intensywności turbulencji, funkcji korelacji własnej i wzajemnej fluktuacji prędkości wiatru, skali długości korelacji oraz funkcji własnej gęstości widmowej mocy prędkości wiatru.

W rozdziale 4 (4 strony) wyjaśniono sposób definiowania wybranych kryteriów podobieństwa stosowanych do analizy złożonych zagadnień inżynierii wiatrowej w pomniejszonej skali, dostosowanej do wymiarów przestrzeni roboczej tuneli aerodynamicznych. Omówiono trzy liczby stosowane do opisu podobieństwa zjawisk, tj. liczbę Reynoldsa, liczbę Macha i liczbę Strouhala. Na podstawie danych literaturowych, dla kilku podstawowych kształtów opisano zjawiska opływu powietrza i zależność współczynnika oporu aerodynamicznego od liczby Reynoldsa.

W rozdziale 5 (6 stron) przedstawiono opis budowy tunelu aerodynamicznego Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej i opis aparatury pomiarowej zastosowanej przez Doktorantkę w pracy badawczej.

W rozdziale 6 (8 stron) przedstawiono sposób regulacji kątów nachylenia łopatek kierujących strumień powietrza na wlocie do tunelu w celu uzyskania równomiernego rozkładu średniej prędkości wiatru w przestrzeni pomiarowej tego tunelu. Jednostopniowy układu kierownic zastosowany w Laboratorium jest rozwiązaniem oryginalnym. Skuteczność konfiguracji układu kierownic wykazano na podstawie średniej prędkości wiatru pomierzonej w kilkudziesięciu punktach pomiarowych w trzech przekrojach poprzecznych tunelu aerodynamicznego, tj. na wlocie do tunelu, na wlocie do przestrzeni pomiarowej i w przestrzeni pomiarowej.

Rozdział 7 (44 strony) poświęcono przedstawieniu obszernych wyników autorskich badań eksperymentalnych w zakresie badania struktury wiatru w dwóch przekrojach w poprzek przestrzeni pomiarowej tunelu w zależności od trzech szerokości szczelin w ściankach bocznych tunelu, tj. 2,5; 5 i 16 cm. Badania przeprowadzono przy trzech konfiguracjach chropowatości terenu i trzech prędkościach referencyjnych wiatru, tj. 5, 10 i 15 m/s, w sytuacji bez modelu i z dwoma modelami umieszczonymi w przestrzeni pomiarowej, które w różnym stopniu blokowały przepływ powietrza. Pomiary wykonano łącznie w 60 punktach pomiarowych dla 810 sytuacji pomiarowych. W każdym przekroju przedstawiono wyniki wyznaczonych doświadczalnie pionowych profili średniej prędkości wiatru i intensywności turbulencji powietrza przy jednej prędkości wiatru i jednej kategorii chropowatości terenu. Ponadto, w jednym przekroju przedstawiono wartości wykładnika potęgi we wzorze potęgowym profilu średniej prędkości wiatru i intensywności turbulencji na jednej wysokości przy trzech referencyjnych prędkościach wiatru i trzech kategoriach chropowatości terenu. Wyznaczono funkcje korelacji własnej i wzajemnej, a także skale długości fluktuacji.

W rozdziale 8 (45 stron), ze względu na rozpatrywaną problematykę badawczą, wyjaśniono zjawisko blokowania przepływu i jego wpływ na wartości parametrów aerodynamicznych

wyznaczanych w badaniach modelowych prowadzonych w tunelach aerodynamicznych. Przedstawiono wyniki autorskich badań średniej wartości współczynnika oporu aerodynamicznego i ciśnienia wiatru na ścianach zewnętrznych ośmiu modeli różniących się kształtem i wymiarami, którym odpowiadał różny współczynnik blokady przepływu w przedziale od około 4 do 15 %. Badania wykonano przy trzech szerokościach szczelin w ściankach bocznych tunelu, tj. 2,5; 5 i 16 cm, dla modelu płyty płaskiej (o szerokości 25 i 75 cm), prostopadłościanu (25 cm), sześciianu (75 cm), walca sekcyjnego (25 i 75 cm) i walca pełnego (25 i 75 cm). Symulowano przy tym przepływ powietrza o różnej prędkości, małej i dużej intensywności turbulencji, bez modelowania warstwy przyziemnej. Przeprowadzono analizę otrzymanych wyników.

Rozdział 9 (2 strony) zawiera wnioski końcowe dotyczące trzech etapów prac badawczych.

4. Merytoryczna ocena pracy

W badaniach modelowych prowadzonych w tunelach aerodynamicznych zawsze należy brać pod uwagę możliwość wystąpienia zjawiska blokowania przepływu powietrza w przestrzeni pomiarowej tunelu, które może mieć niekorzystny wpływ na dokładność wyników tych badań. Potwierdzają to znaczące różnice w wartościach współczynnika oporu aerodynamicznego i rozkładu ciśnień na powierzchniach modeli badawczych o różnym współczynniku blokowania, wyznaczone doświadczalnie przez Doktorantkę, przy trzech szerokościach szczelin w ściankach bocznych tunelu aerodynamicznego. Zatem podjęty w pracy temat badawczy jest w pełni uzasadniony i ma duże znaczenie praktyczne.

Zjawisko blokowania przepływu zależy między innymi od kształtu, wymiarów i ustawienia modeli badawczych względem napływającego powietrza, a także kształtu i wymiarów przestrzeni pomiarowej tunelu aerodynamicznego. W związku z tym rozpoznanie skali tego niekorzystnego zjawiska należy zawsze realizować w specyficznych warunkach tunelu, w którym będą prowadzone badania eksperymentalne. Warto jednak podkreślić, że ścianki boczne szczelinowe pozwalające na redukcję zjawiska blokowania przepływu nie są typowym rozwiązaniem budowy tuneli aerodynamicznych. W tym kontekście stwierdzam, że pomimo pewnych osiągnięć naukowych innych zespołów badawczych w zakresie analizowanego zagadnienia udział autorskich prac badawczych Doktorantki niewątpliwie wnosi nową wiedzę i stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

W rozdziałach 7 i 8 przedmiotowej pracy doktorskiej, które prezentują największą wartość poznawczą, Autorka wykazała, że istotnym efektem blokowania przepływu jest zmiana struktury wiatru formowanego w przestrzeni tunelu, a także gradientu ciśnienia na powierzchniach badanych modeli i w konsekwencji na ogół zwiększenie siły oporu aerodynamicznego tych modeli. Doktorantka stwierdziła, że efekt blokowania w znacznym stopniu zależy od szerokości szczelin poziomych w ściankach bocznych tunelu, przy czym większe szerokości szczelin zwykle ograniczają ten efekt. Są to wartościowe osiągnięcia prezentowane w pracy.

Mając na względzie złożoną strukturę opływu powietrza wokół modeli badawczych, a także stosunkowo dużą liczbę parametrów mających wpływ na strukturę napływającego powietrza, Doktorantka przeprowadziła obszerne i kompleksowe analizy, które zasługują na uznanie. Wykazała się przy tym dużym zaangażowaniem i bardzo dobrą znajomością poruszanej problematyki, opartą na wieloletnim doświadczeniu w realizacji zadań badawczych w tunelu aerodynamicznym Politechniki Krakowskiej. W przyszłości warto ewentualnie rozważyć analizę wpływu szerokości szczelin ścianek bocznych na funkcje gęstości widmowych mocy, opisujące strukturę częstotliwościową fluktuacji

prędkości wiatru, a także na poziomy profil średniej prędkości wiatru, ważny w badaniach modeli sekcyjnych zamocowanych poziomo.

Podsumowując stwierdzam, że problemy naukowe i zadania badawcze zostały jasno sformułowane, a ich realizacja pozwoliła na udowodnienie dwóch tez podanych w rozdziale 2. Układ pracy jest przemyślany i uzasadniony. Wszystkie wykresy, rysunki i tabele są czytelne i dobrze prezentują wyniki badań. Pewne zastrzeżenia budzi strona edycyjna pracy, a najważniejsze zauważone uchybienia zostały przytoczone w punkcie 6 niniejszej recenzji. Nie jest to najważniejsza kwestia, ale wpływa na ogólną ocenę pracy.

Za najważniejsze oryginalne elementy recenzowanej pracy doktorskiej należy uznać:

- wykonanie pomiarów i analiza średniej prędkości wiatru w kilkudziesięciu punktach pomiarowych w trzech przekrojach w poprzek tunelu aerodynamicznego, tj. na wlocie do tunelu, na wlocie do przestrzeni pomiarowej i w przestrzeni pomiarowej, a także regulacja kątów nachylenia kierownic w celu uzyskania jednorodnego pola przepływu powietrza na wlocie do tunelu,
- przeprowadzenie badań pionowego profilu średniej prędkości wiatru, intensywności turbulencji i funkcji korelacji w dwóch przekrojach przestrzeni pomiarowej tunelu przy trzech szerokościach szczelin w ściankach bocznych, trzech konfiguracjach chropowatości terenu, trzech prędkościach wiatru, w sytuacji bez modelu i z dwoma modelami umieszczonymi w przestrzeni pomiarowej, które w różnym stopniu blokowały przepływ powietrza (łącznie analizowano 810 sytuacji pomiarowych),
- przeprowadzenie badań wpływu szerokości szczelin w ściankach bocznych tunelu aerodynamicznego na wyniki pomierzonych wartości współczynnika oporu aerodynamicznego i ciśnienia wiatru na ścianach zewnętrznych ośmiu modeli, którym odpowiadał różny współczynnik blokady przepływu w przedziale od 4 do 15 %, przy różnej prędkości wiatru, małej i dużej intensywności turbulencji, bez modelowania warstwy przyziemnej.

5. Pytania i uwagi ogólne

1. Opis zjawisk opływu walca w zależności od zakresów liczby Reynoldsa, przedstawiony na str. 15, jest zbyt uproszczony, a podane zakresy wartości tej liczby budzą pewne zastrzeżenia.
2. Tytuł rozdziału 6 jest nieadekwatny do zakresu badań przedstawionych w tym rozdziale, bowiem wyniki pomiarów przedstawiono nie tylko na wlocie do tunelu aerodynamicznego, ale także na wlocie do przestrzeni pomiarowej i w przestrzeni pomiarowej.
3. W rozdziale 7 brakuje informacji o dokładnej lokalizacji punktu referencyjnego, w którym mierzono referencyjną prędkość wiatru. Na str. 32 podano jedynie wysokość referencyjną.
4. Tytuł rozdziału 7.2.2 jest nieadekwatny do przedstawionych na Rys. 7.16-7.50 wartości, które podano w pięciu punktach pomiarowych na wysokości referencyjnej. Ponadto pierwsze zdanie na str. 47: „W rozdziale tym przedstawiono zależność wykładnika α od położenia w przestrzeni pomiarowej na wysokości referencyjnej $z_{ref}=0.82$ m.” jest nieprecyzyjne. Wykładnik α ustala się dla pionowego profilu wiatru, a nie na jednej wysokości.
5. Na str. 84 brakuje wyjaśnienia w jakim celu umieszczono modele badawcze na pomoście jezdnym.
6. Wyznaczenie wartości współczynnika oporu aerodynamicznego badanych modeli (rozdział 8.7) na podstawie rozkładu ciśnienia wiatru pomierzonego w punktach pomiarowych rozstawionych wzdłuż obwodu modeli tylko na jednej wysokości jest zbyt dużym uproszczeniem i prowadzi do niedokładnych wyników. Można to potwierdzić porównując te wartości z wartościami współczynnika oporu aerodynamicznego tych samych modeli, które zostały wyznaczone na podstawie pomierzonej wypadkowej siły oporu aerodynamicznego działającej na cały model

(rozdział 8.5). Niezbędny jest tu komentarz. Co więcej, w pracy nie uzasadniono wyboru wysokości punktów pomiarowych na powierzchniach modeli - szczególnie dotyczy to modeli z uwzględnieniem efektu swobodnego końca.

7. Na str. 124 słusznie stwierdzono, że w zakresie krytycznym liczby Reynoldsa utrudniona jest interpretacja i porównanie wyników pomiarów dla modeli walca kołowego. Zatem dlaczego badania modelowe ograniczono do zakresu krytycznego liczby Reynoldsa?

8. Budowa wielu tuneli aerodynamicznych charakteryzuje się pełnymi ściankami bocznymi w całej przestrzeni pomiarowej. Zatem dobrym kierunkiem badań, który pozwoliłby ocenić efektywność ścianek szczelinowych w aspekcie zjawiska blokowania przepływu, wydaje się porównanie wyników przedstawionych w pracy z wartościami parametrów aerodynamicznych pomierzonych w sytuacji ścianek bocznych z pominięciem szczelin. Czy rozpatrywano możliwość wykonania takich badań?

6. Uwagi szczegółowe

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

1. W treści pracy zastosowano swobodną formę odsyłaczy do rysunków (przeważającą formą jest „Rys. x”, zaś np. na str. 24 jest „ryc. x”, a na str. 13 i 26-29 jest „rys. x”), tabel (przeważającą formą jest „Tab. x”, zaś np. na str. 9, 11, 23 i 27 jest „tab. x”) i literatury (np. na str. 8, 11 i 13 podano nazwisko autora w nawiasie okrągłym, na str. 10 i 11 - nazwisko autora i inicjały imion w nawiasie kwadratowym, zaś na str. 12, 13 i 81 – numer pozycji w nawiasie kwadratowym, pomimo że pozycje literatury nie są numerowane). Ponadto zastosowano dwa sposoby zapisu liczb dziesiętnych, tj. z użyciem przecinka (np. str. 18 lub Tab. 3.1 i 3.2) i kropki dziesiętnej (większa część pracy).

2. W treści pracy brakuje odsyłaczy do wielu rysunków (dotyczy to Rys. 4.5, 5.4, 5.7, 6.13, 6.14, 7.15-7.50, 8.2, 8.25 i 8.41), tabel (Tab. 7.2-7.7) i 18 pozycji literatury zamieszczonych w spisie na końcu pracy (według kolejności są to poz. 2-4, 7-9, 11-12, 18-20, 24, 30, 33, 35-36, 44-45).

3. W spisie literatury brakuje pracy Laneville A. (2008), do której odwołanie znajduje się na str. 80.

4. Na str. 17, 26 i 78 brakuje numeracji wzorów matematycznych.

5. W tytule Tab. 3.2 występuje odwołanie do błędnej normy.

6. Na str. 13 podano błędne funkcje gęstości widmowej mocy (wzór 3.22 i 3.23).

7. Wzór (4.1) podany na str. 14 został powtórzony na str. 86 jako wzór (8.3).

8. W punkcie 6.2, na str. 28 pojawiła się nieścisłość w odniesieniu do Rys. 6.9 dotycząca informacji o lokalizacji punktów pomiarowych na wlocie do przestrzeni pomiarowej.

9. Na str. 36 znajduje się informacja, że wyniki badań przedstawiono dla prędkości napływu powietrza 5, 10 i 15 m/s, podczas gdy na Rys. 7.5-7.14 przedstawione wyniki odnoszą się tylko do jednej prędkości wiatru 10 m/s.

10. Odwołania w tekście na str. 32 do Rys. 7.2, na str. 34 do Rys. 7.4-7.6 i na str. 78 do Rys. 8.3 są błędne - powinno być odpowiednio Rys. 7.1, Rys. 7.2-7.4 i Rys. 8.2.

11. Niektóre rysunki wraz z ich podpisami zostały niewłaściwie rozdzielone na dwie strony. Dotyczy to Rys. 7.3, 7.51, 7.52, 7.54, 8.10, 8.26 i 8.40.

12. Na Rys. 7.10-7.14 w opisie osi odciętych pojawił się błąd, bowiem wartości intensywności turbulencji nie zostały tu przedstawione w [%].

13. W podpisie Rys. 7.27-7.32 podano błędną prędkość wiatru – zamiast 5 m/s powinno być 10 m/s.

14. Na str. 74 znajduje się odwołanie do Rys. 7.55, którego nie ma.
15. Na str. 77 znajduje się błędnie sformułowane zdanie: „Przy bardzo małej liczbie Reynoldsa oraz przepływ pozostaje lepki i „przyczepiony” do modelu.”
16. Tytuł rozdziału 8.3 jest nieadekwatny do treści tego rozdziału, w którym przedstawiono tylko jedną metodę korekcji.
17. Tytuły rozdziałów 8.6.2 i 8.6.3 zostały częściowo powtórzone.
18. Wzór (8.6) jest błędny. Ciśnienie prędkości wiatru $q(t)$ nie zostało tu opisane jako funkcja zależna od czasu.
19. Od str. 101 brakuje konsekwencji w numeracji rysunków. Rys. 8.23 na tej stronie powinien mieć przypisany numer 8.24. Podobny błąd występuje na str. 120, gdzie dwa rysunki mają taką samą numerację Rys. 8.41.
20. Na str. 104/105 brakuje wyjaśnienia symbolu α_i , który występuje we wzorach 8.7-8.13.
21. Na Rys. 8.30 powtórzono dwa takie same wykresy, które dotyczą małej turbulencji.

7. Wniosek końcowy

Podsumowując niniejszą recenzję stwierdzam, że praca doktorska Pani mgr inż. Renaty Kłaput pt. *„Wpływ szerokości szczelin w ściankach bocznych tunelu aerodynamicznego na wyniki badań modelowych”* stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wnosi istotny wkład w rozwój wiedzy w zakresie badań modelowych prowadzonych w tunelach aerodynamicznych. 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. (Dz. U. Nr 65 poz. 595 z późniejszymi zmianami; art. 13 ust. 1). Tym samym **stawiam wniosek o dopuszczenie Pani magister inżynier Renaty Kłaput do publicznej obrony przedmiotowej pracy doktorskiej.**

Goaschi Piotr