



Получена: 07.05.2021 г.

Приета: 17.05.2021 г.

ОПРЕДЕЛЯНЕ НА АЕРОДИНАМИЧНИ КОЕФИЦИЕНТИ ЗА НАЛЯГАНЕ ОТ ВЕТРОВО ВЪЗДЕЙСТВИЕ ВЪРХУ ПОКРИВ НА СТАДИОН ЧРЕЗ КОМПЮТЪРНИ МОДЕЛИ И CFD

Д. Динев¹, Ст. Райков², Цв. Георгиев³

Ключови думи: компютърни симулации, Computational Fluid Dynamics, ветрово въздействие, покриви на стадиони, аеродинамично заслоняване

РЕЗЮМЕ

Ефектите от ветрово въздействие върху сгради и съоръжения със сложна форма, която не попада в препоръките на стандартите за проектиране, както и за по-отговорни съоръжения, обикновено се изследват експериментално във ветрови тунели. Тези изследвания са свързани със създаване на умален модел на обекта, мащабиран по сложен начин, за да пресъздаде реалистично взаимодействието между строежа и флуида. Като цяло, тези изследвания са скъпи, тъй като изискват специализирана лаборатория, а също така и времеемки, поради значителната обработка на резултатите.

През последните три десетилетия, с развитието на компютърната техника, започна интензивното прилагане на компютърни симулации във ветровото инженерство за предвиждане на взаимодействието между вятъра, околната среда и строежите. Тези компютърни симулации се основават на основните принципи и закони на динамиката на флуидите, които описват движението на флуида във времето.

В доклада се представя изследване на ветровото въздействие върху стоманените козирки на стадион „Христо Ботев“ в град Пловдив, основано на компютърни модели и числови методи за прилагане на законите на динамиката на флуидите.

¹ Добромир Динев, доц. д-р инж., кат. „Строителна механика“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: ddinev_fce@uacg.bg

² Станислав Райков, гл. ас. д-р инж., кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: raykov_fce@uacg.bg

³ Цветан Георгиев, доц. д-р инж., кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: cvgeorgiev_fce@uacg.bg

Посредством това изследване, включващо петдесет отделни анализа, са определени коефициентите на налягане върху козирките над трибуните при различни конфигурации на етапно построяване на трибуните и при различни посоки на вятъра. Направено е сравнение на резултатите от компютърните симулации чрез *Computational Fluid Dynamics* (CFD) и препоръките на стандарта на Австралия и Нова Зеландия за изолирана трибуна с козирка. Изследван е ефектът от аеродинамично заслоняване от срещуположна стоманобетонова трибуна и е направено сравнение със сходна конструкция на стадион, изследвана във ветрови тунел. В доклада са формулирани редица практически изводи и заключения.

1. Въведение

Вятърът е една от най-важните климатични характеристики, които определят условията на околната среда. В градски условия сградите и съоръженията могат да бъдат разгледани като препятствия за ветровия поток или по-точно, като нарушаване на ламинарния въздушен поток, което води до значителна промяна на скоростта на вятъра и пулсации на налягането по повърхностите на сградите.

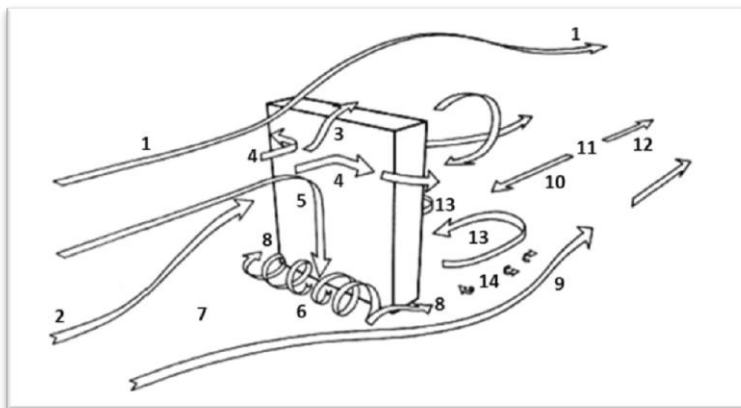
Един от начините за представяне и сравняване на разпределението на ветровия товар върху обветрените повърхнини и обеми е използването на бездимензионния параметър на налягането. Параметърът на налягането C_p се изчислява чрез уравнението на *Bernoulli* като отношение на действителното налягане върху модела и динамичното налягане

$$C_p = \frac{P - P_{ref}}{\frac{1}{2}\rho U_H^2}, \quad (1)$$

където P е статичното налягане, измерено на повърхността на модела;

P_{ref} е статичното относително налягане на свободния въздушен поток;

U_H е средната скорост на вятъра, измерена на относителна височина H и ρ е плътността на въздуха при стайна температура.



Фиг. 1. Разпределение на потока и турбулентните вихри около сграда [1]

Изследването на разпределението на ветровия поток е важна част от оценката на аеродинамичното поведение на сградата или съоръжението. Движението на потока създава ветрови микроклимат около и вътре в конструкцията и определя не само сигурността на конструкцията, но и комфорта на посетителите на съоръжението. На фиг. 1 са показани основните характеристики на разпределението на ветровия поток около високо и широко препятствие без отвори.

След като ветровият поток приближи до сградата, постепенно се разделя. Част от него се отклонява над сградата (1), а друга част – около нея (2). Върху наветрената фасада максималното налягане с нулева скорост на потока се формира на около 70% от височината на сградата. От тази точка потокът се отклонява към зоните с по-ниско налягане: нагоре (3), встрани (4) и надолу (5). Значително количество от въздушния поток отива надолу и създава завихряне в основата на сградата (6). Тези вихри преминават встрани, заобикалят ъглите на сградата и се ускоряват. Там те се вливат в общия поток, който преминава около сградата. В подветрената страна на сградата се създава зона с ниско налягане. В резултат на това се формират обратни въздушни потоци (10, 13). Зоната с нулева скорост се формира на нивото на терена, където потокът е в обратна посока (11). След тази зона потокът продължава нормалната си посока, но скоростта остава ниска на значително разстояние след сградата (12). Обратният въздушен поток е причината за създаването на завихряне по подветрената страна на сградата [1].

В миналото, а и в наши дни, ветровото инженерство е разчитало на резултати, получени само от експерименти във ветрови тунел за изследване на поведението на сгради и съоръжения в условия на силен вятър. Тези изследвания са свързани със създаване на умален модел на сградата, мащабиран по сложен начин, за да пресъздаде реалистично взаимодействието с флуида [2]. Обикновено тези изследвания са скъпи и изискват време и усилия за получаване на резултатите [3 ÷ 8]. Напоследък резултатите от тези изследвания се използват за тарирание и калибриране на компютърните модели за числени симулации във ветровото инженерство.

През последните три десетилетия, с развитието на компютърната техника, започва интензивното прилагане на компютърни симулации във ветровото инженерство за предвиждане на взаимодействието между вятъра, околната среда и сградите [9 ÷ 13]. Тези компютърни симулации се основават на основните принципи и закони на динамиката на флуидите, които описват движението на флуида във времето. Основният закон за динамично равновесие на флуида, известен като уравнения на *Navier-Stokes*, води до сложни нелинейни частни диференциални уравнения, които имат аналитични решения само за много малък набор от прости задачи. Това налага числени методи за решаването им, основно базирани на метода на крайните обеми. Числената динамика на флуидите се използва в хидродинамиката от десетилетия, но през последните години намира приложение при изследване на комфорта на пешеходци в градската среда или зрители и спортисти по стадиони под действие на вятър и/или дъжд, разпространение на въздушното замърсяване и пожари, изследване на проблеми, свързани с отоплението, вентилацията и климатизацията на сгради, топлопренасяне и др. [14 ÷ 16].

Ветровото инженерство използва числената динамика на флуидите за решаване на няколко основни задачи:

- разпределение на ветровото налягане върху фасадни конструкции [17];
- аеродинамично изследване на сгради и съоръжения в действителен мащаб [18, 19];
- изследване на резонансни и самовъзбуждащи се аеродинамични явления при съоръжения и техните елементи.

2. Изчислителни модели и параметри на симулацията

Цел на изследването е да се симулира ветрово въздействие върху козирките на новостроящия се стадион „Христо Ботев“ в град Пловдив и да се оцени тяхното аеродинамично поведение. Разработени са изчислителни модели и са извършени симулации на ветрово въздействие с методите на числената динамика на флуидите (Computational Fluid Dynamics – CFD).

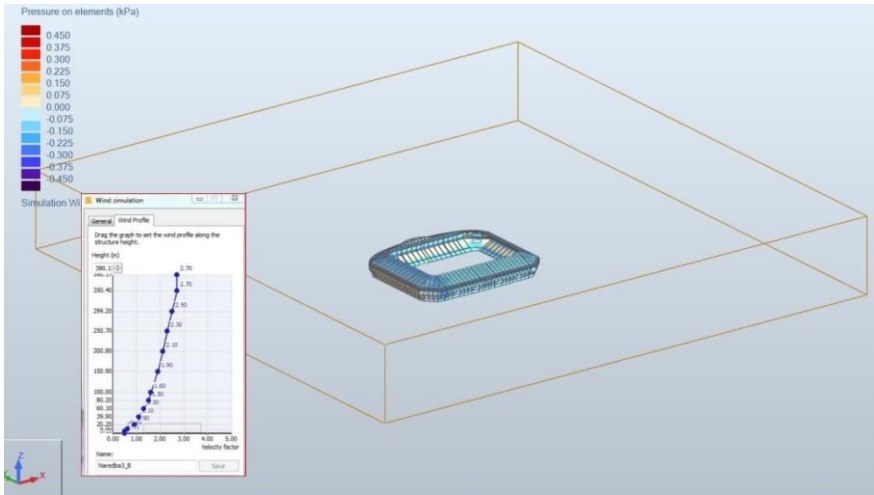
Разпределението на налягането зависи основно от геометричните характеристики на съоръжението. Размерите, геометрията, формата на трибуните и козирките, острите или заоблени ъгли и ръбове на повърхностите, наличието на отвори в стените, присъствието на съседни сгради са само някои от параметрите, които влияят върху разпределението на налягането върху конструкцията на стадиона (фиг. 2).



Фиг. 2. Общ изглед на стадион „Христо Ботев“ – проект

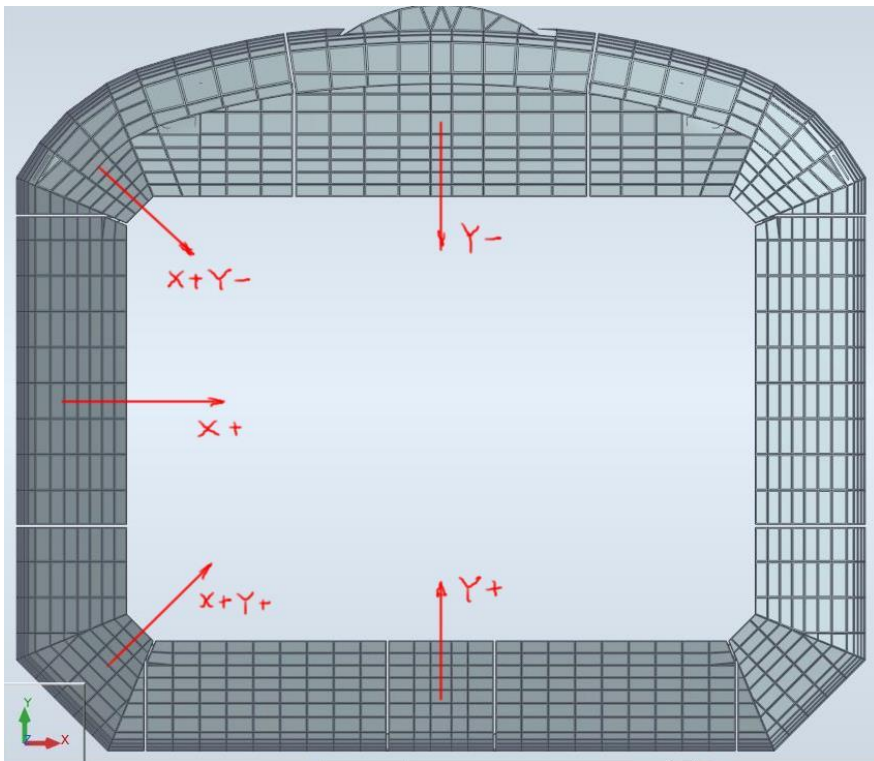
За построяването на изчислителните модели са използвани предоставената архитектурна и конструктивна документация. Създадени са поредица изчислителни модели (10 варианта) съгласно възможните сценарии и етапи на изпълнение на строежа. В симулациите не са моделирани околните сгради и терен в явен вид. Проведените анализи са 50 на брой (по пет за всеки вариант), с посоки на вятъра съответно 0° , 45° , 90° , 135° и 180° .

За числената симулация е избран виртуален ветрови тунел с размери – височина 300 m, ширина 700 m и дължина 1000 m. Изчислителният модел е разположен в центъра на тунела (фиг. 3). Избрано е логаритмично изменение на скоростта на вятъра по височина като входно гранично условие (фиг. 3). Симулациите са извършени с програмите *Autodesk Robot Structural Analysis* и *Autodesk CFD*.



Фиг. 3. Виртуален ветрови тунел и профил на изменението на скоростта на вятъра при входа на тунела

За симулациите е приета нормативна стойност на налягането на вятъра на височина 10 m над нивото на терена, равна на 0,41 kPa. Изследванията са извършени за времеви период около 50 s до достигане на сходимост на решението.



Фиг. 4. Посоки и направления на ветровото въздействие при числените симулации

Разгледани са пет товарни състояния с различна посока и направление на ветровото въздействие (фиг. 4):

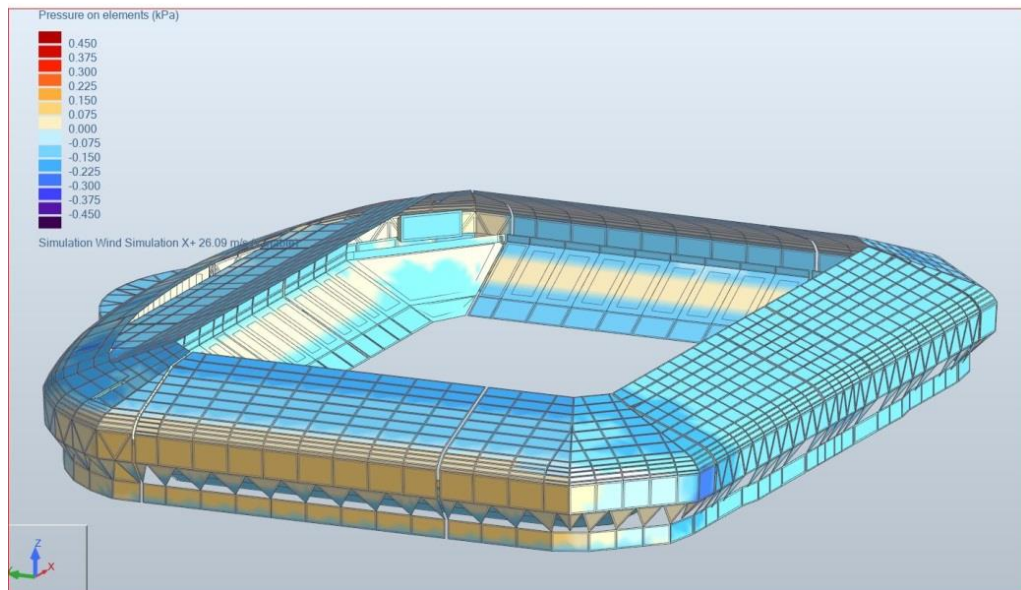
- вятър по направление $Y+$
- вятър по направление $X+Y+$
- вятър по направление $X+$
- вятър по направление $X+Y-$
- вятър по направление $Y-$

На базата на полученото налягане от движещия се въздух върху повърхнините на конструкцията е изчислено еквивалентното площно натоварване.

3. Методика на изследването

За целите на изследването са разгледани общо десет варианта, които съответстват на различни възможни етапи и конфигурации на изпълнение на строителството на стадиона. При всички разглеждани реални ситуации се предполага цялостно изпълнение на стоманобетонната част на трибуните. Отделно, разгледани са три варианта на свободно стоящи трибуни (А, Б и В) за сравнение с резултатите, които са получени от нормативните източници [20 ÷ 24].

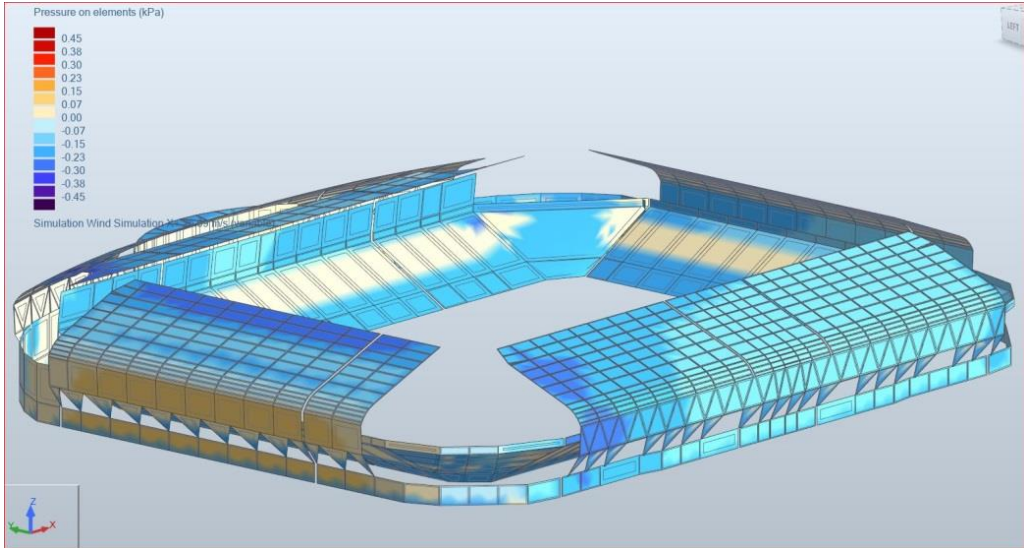
- Вариант 1 – напълно построен стадион (фиг. 5) – вариантът е изследван с цел да се получат резултати за пълното взаимодействие на отделните сектори и взаимното влияние на съседните и срещулежащите сектори. Допълнително, това е състоянието на стадиона, което се предполага да бъде междоуременно за основната част от експлоатационния срок на съоръжението.



Фиг. 5. Разпределение на налягането на вятъра по посока $+X$ за вариант 1

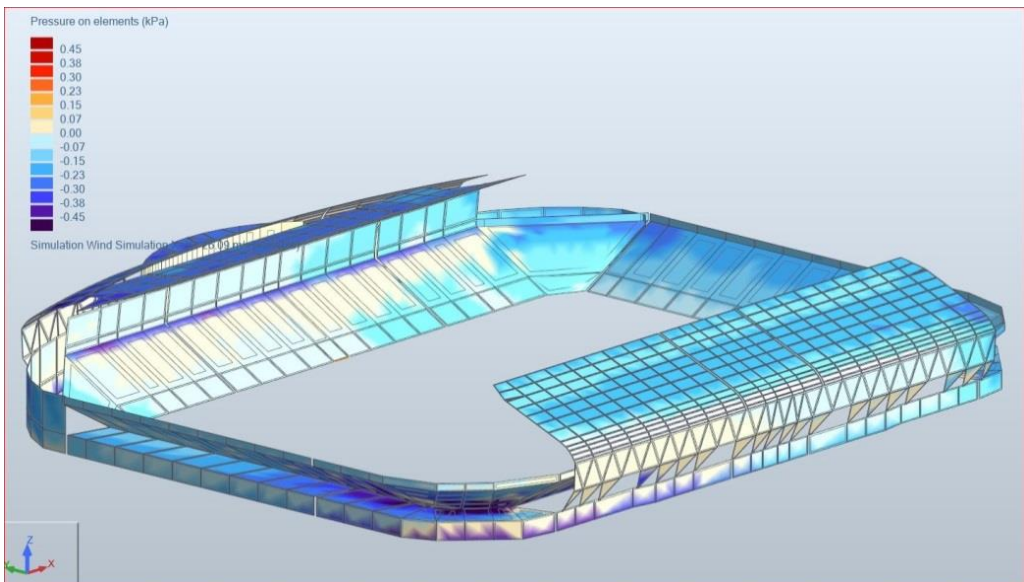
Допълнително са разгледани шест варианта на частично изпълнение на строителството. Това е продиктувано от възможността не всички козирки да се изпълнят едновременно. При това е необходимо да се изследва взаимното влияние на козирки от срещуположни сектори.

- Вариант 2 (фиг. 6) – стадион с монтирани козирки върху праволинейни части на секторите.



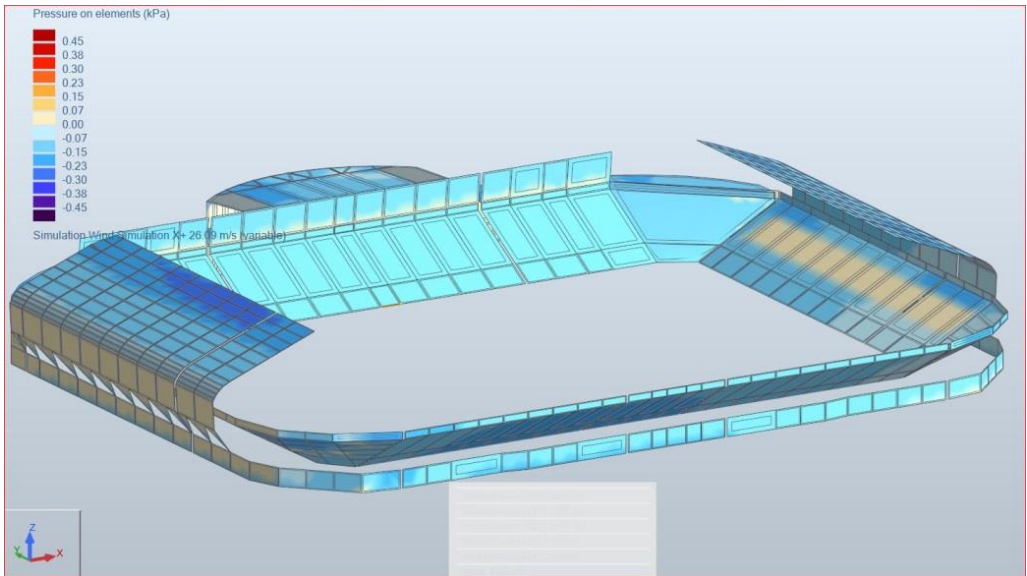
Фиг. 6. Разпределение на налягането на вятъра по посока +X за вариант 2

- Вариант 3 (фиг. 7) – стадион с монтирани козирки върху срещуположни сектори А и В.



Фиг. 7. Разпределение на налягането на вятъра по посока +X+Y за вариант 3

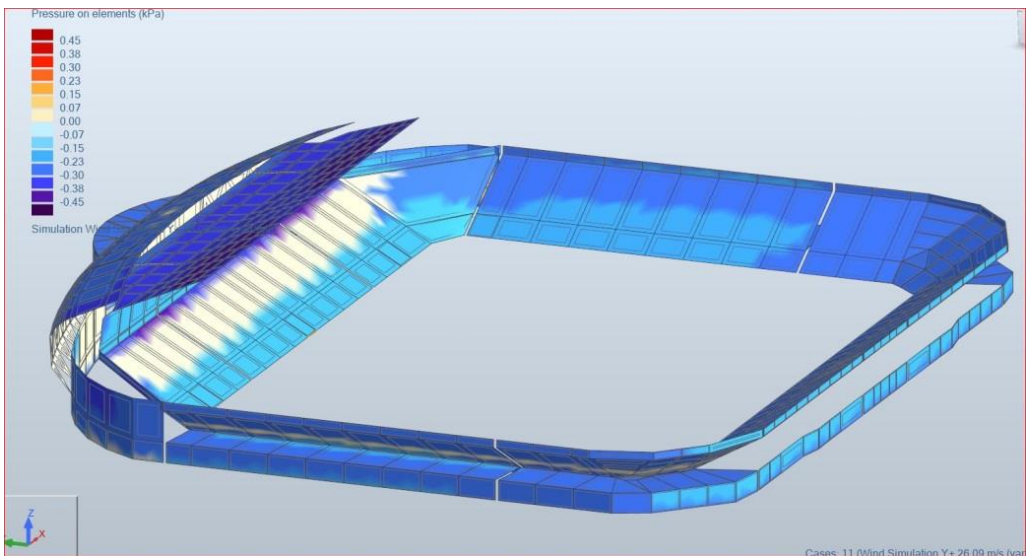
- Вариант 4 (фиг. 8) – стадион с монтирани козирки върху срещулежащи сектори Б и Г.



Фиг. 8. Разпределение на налягането на вятъра по посока +X за вариант 4

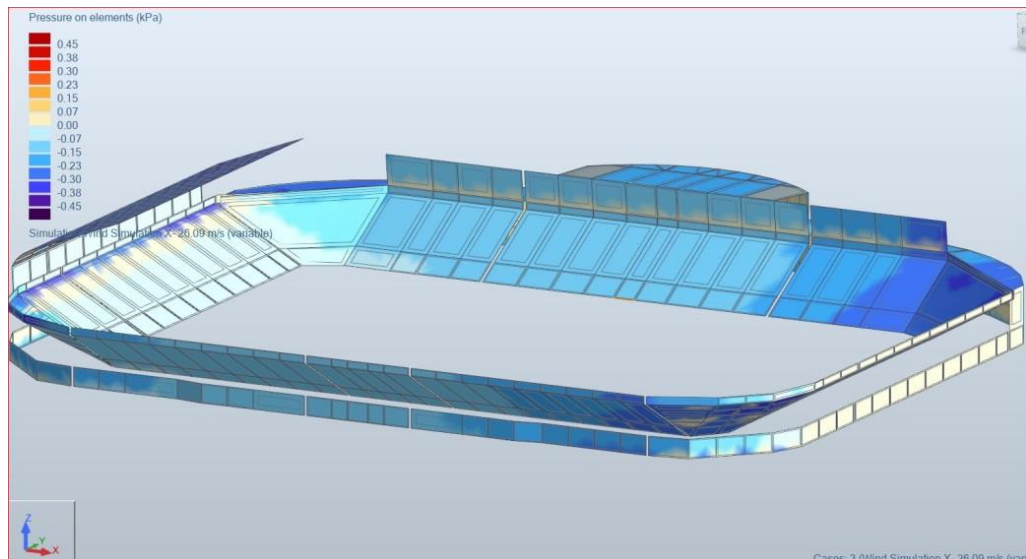
Изследвани са и варианти на самостоятелни козирки върху различните сектори – съответно А, Б и В.

- Вариант 5 (фиг. 9) – стадион с монтирана козирка върху сектор А.



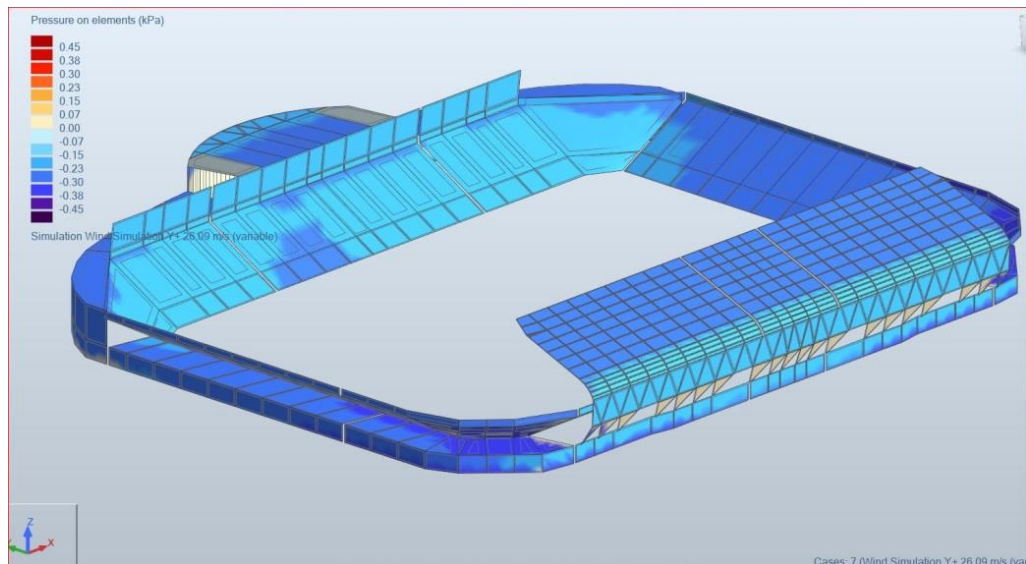
Фиг. 9. Разпределение на налягането на вятъра по посока +Y за вариант 5

- Вариант 6 (фиг. 10) – стадион с монтирана козирка върху сектор Б.



Фиг. 10. Разпределение на налягането на вятъра по посока $-X$ за вариант 6

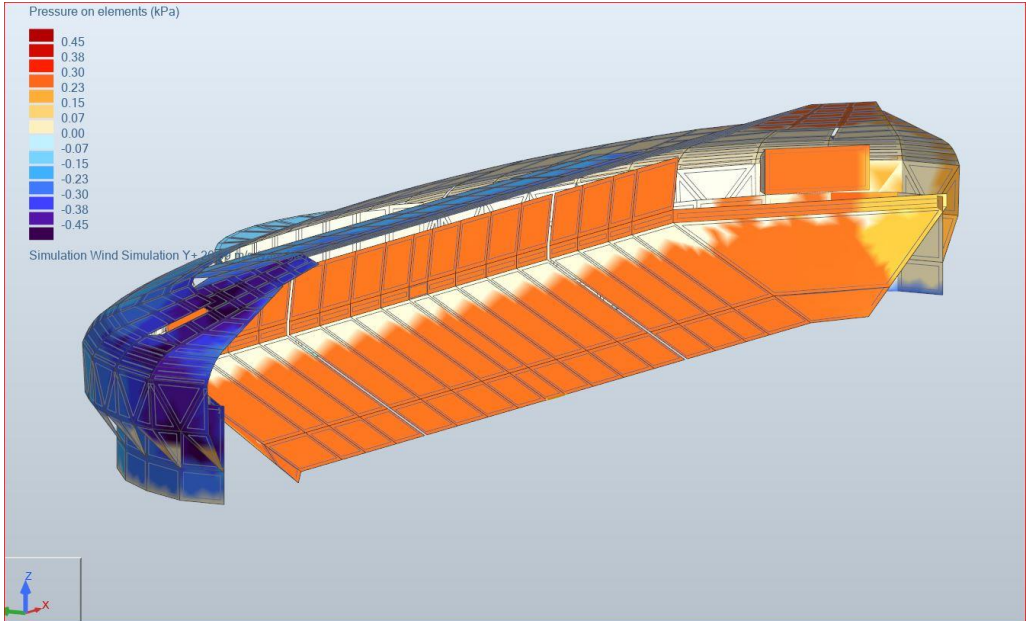
- Вариант 7 (фиг. 11) – стадион с монтирана козирка върху сектор В.



Фиг. 11. Разпределение на налягането на вятъра по посока $+Y$ за вариант 7

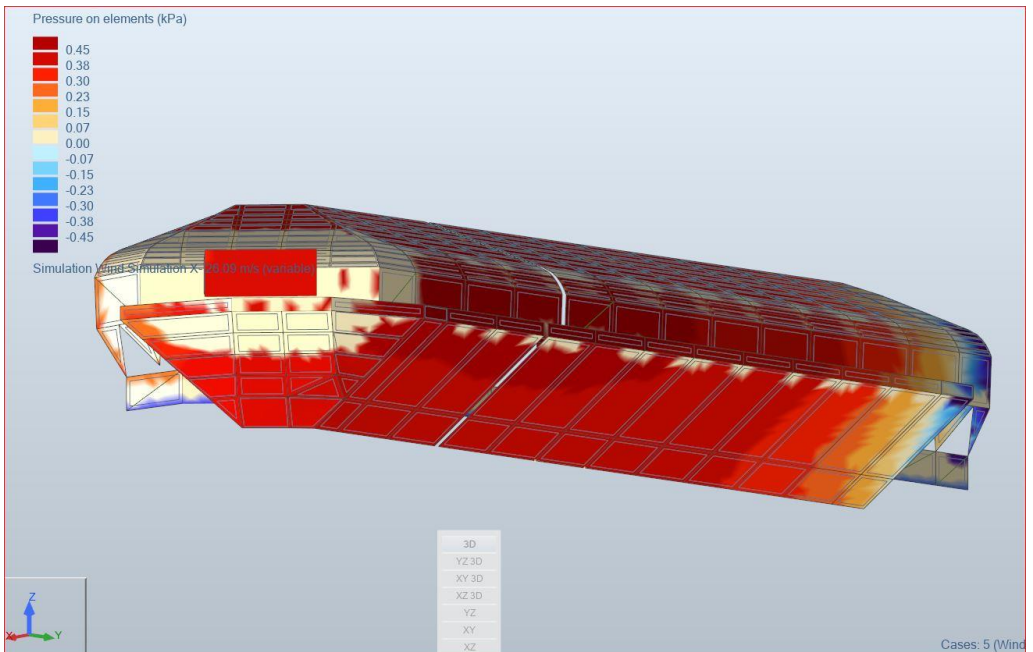
Накрая, последните три варианта служат за анализ и сравнение на получените резултати с тези, изчислени според препоръки на нормативни документи. Правилата за определяне на ветровото въздействие, дадени в нормативните източници, са формулирани за определяне на налягането върху конструкцията на самостоятелни трибуни с козирки. По тази причина са дефинирани подобни схеми и в компютърния анализ, въпреки че на практика не се очаква подобен вариант на изпълнение на стадиона.

- Вариант 8 (фиг. 12) – козирка на сектор А.



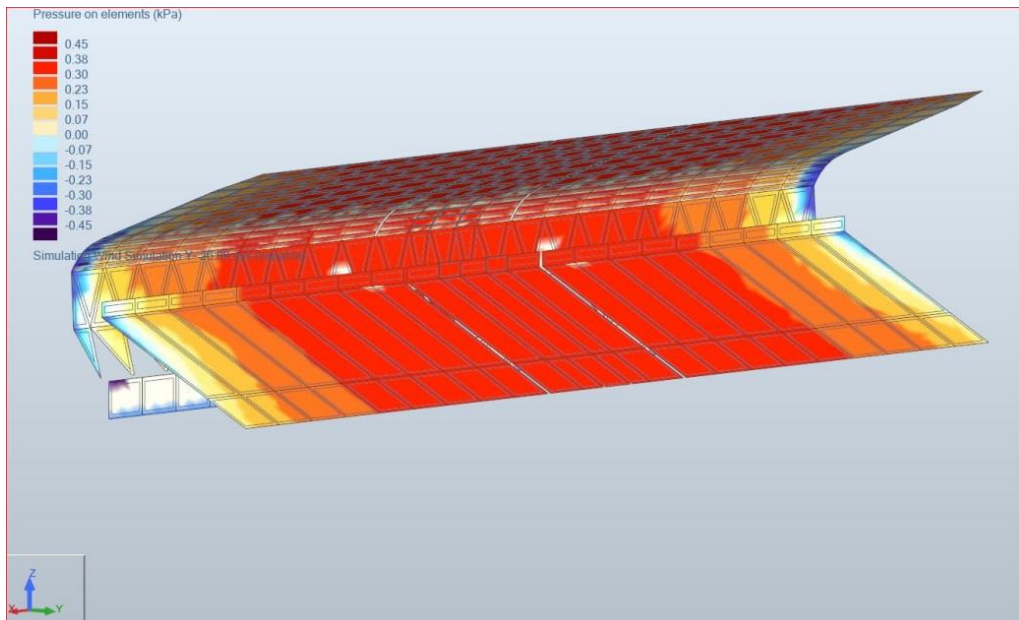
Фиг. 12. Разпределение на налягането на вятъра по посока +Y за вариант 8

- Вариант 9 (фиг. 13) – козирка на сектор Б.



Фиг. 13. Разпределение на налягането на вятъра по посока -X за вариант 9

- Вариант 10 (фиг. 14) – козирка на сектор В.



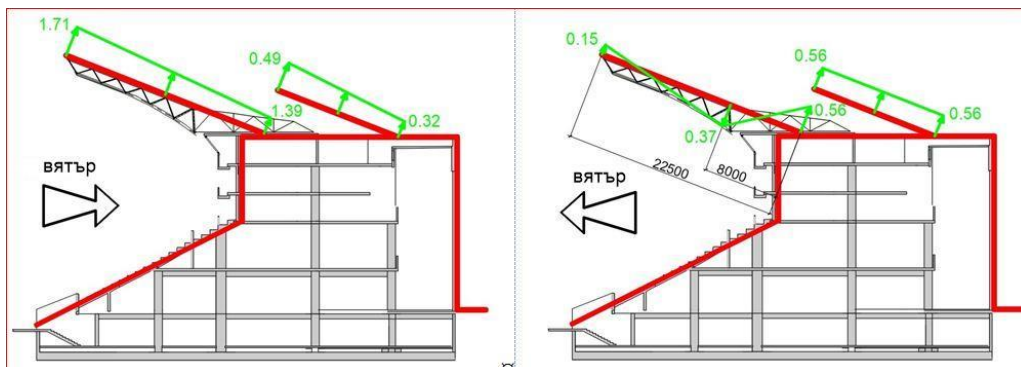
Фиг. 14. Разпределение на налягането на вятъра по посока $-Y$ за вариант 10

Въз основа на разпределението на налягането на вятъра върху повърхнините на конструкцията са изчислени обобщено аеродинамичните коефициенти.

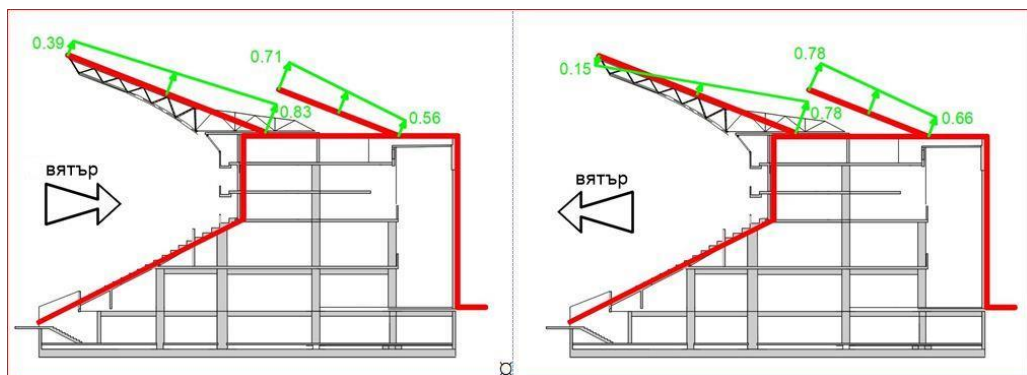
4. Схематично представяне на резултатите от числения анализ

За по-добро онагледяване на получените чрез числена динамика на флуидите резултати за аеродинамичните коефициенти и улесняване на анализа и изводите от тях те са представени по начин (от фиг. 15 до фиг. 19), който съответства на схеми, дадени при изследването на нормативните източници.

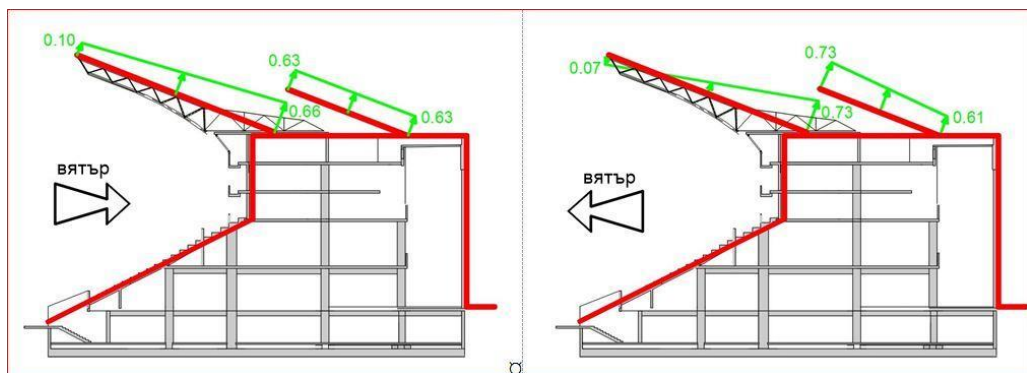
4.1. Резултати за сектор А



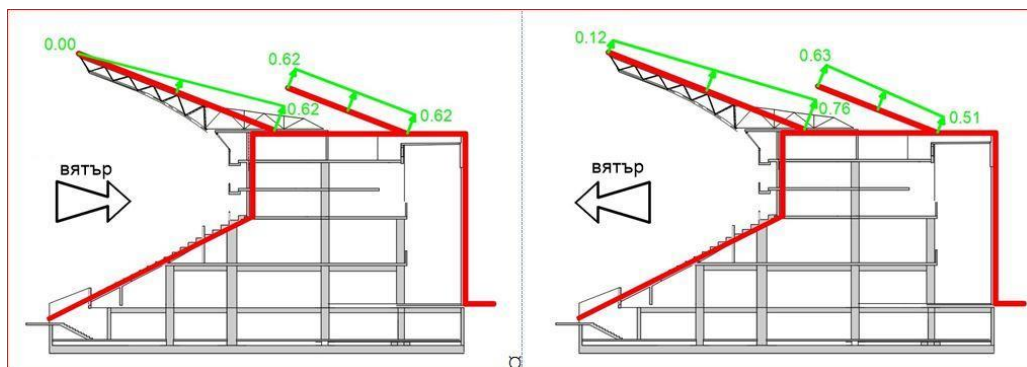
Фиг. 15. Самостоятелна трибуна с козирка – вариант 8



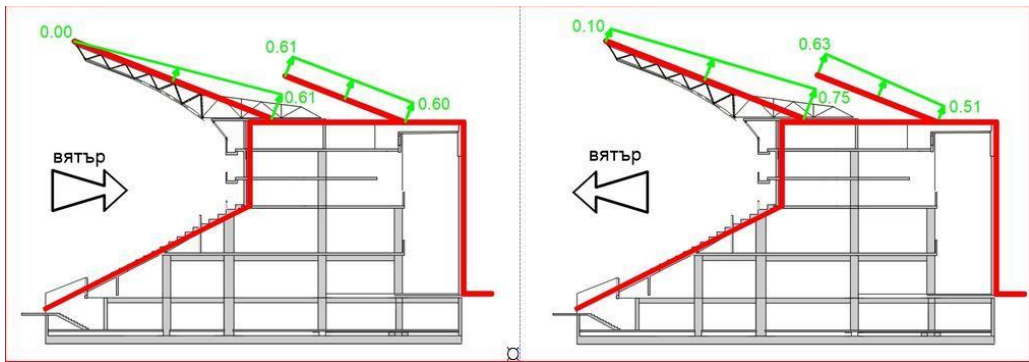
Фиг. 16. Наличие на стоманобетонни трибуни без козирки за останалите сектори – вариант 5



Фиг. 17. Наличие на стоманобетонни трибуни за останалите сектори и козирка над сектор В – вариант 3



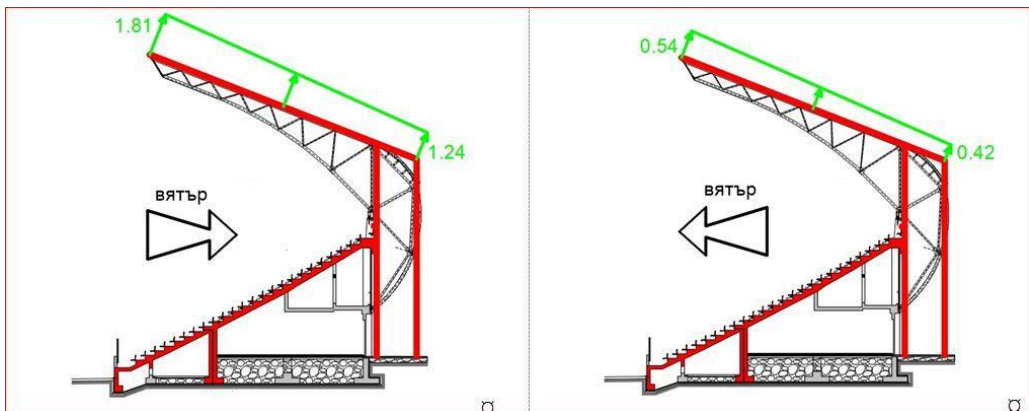
Фиг. 18. Наличие на стоманобетонни трибуни и козирки за останалите сектори, без ъгловите козирки – вариант 2



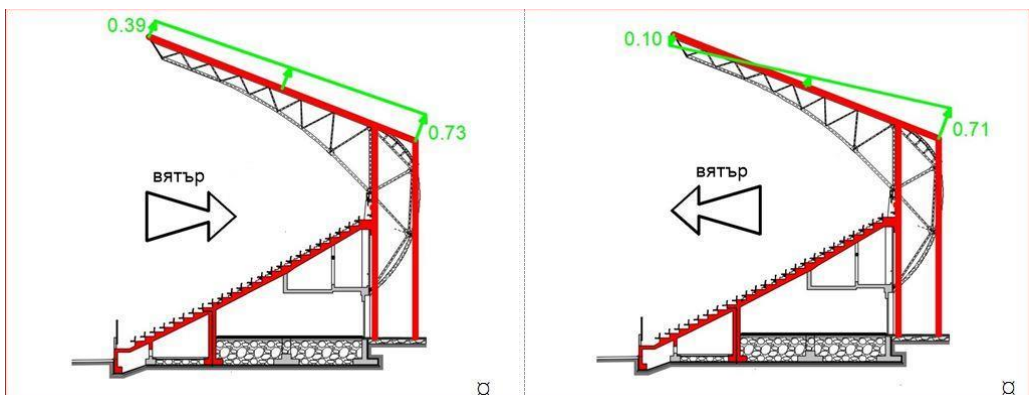
Фиг. 19. Напълно завършен стадион – вариант 1

4.2. Резултати за сектор В

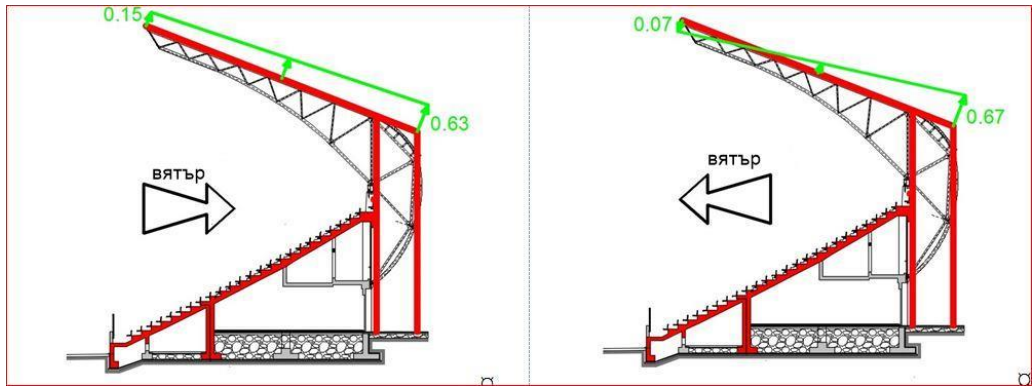
От особен интерес са резултатите, получени за сектор В (от фиг. 20 до фиг. 24). Това се дължи на два основни фактора.



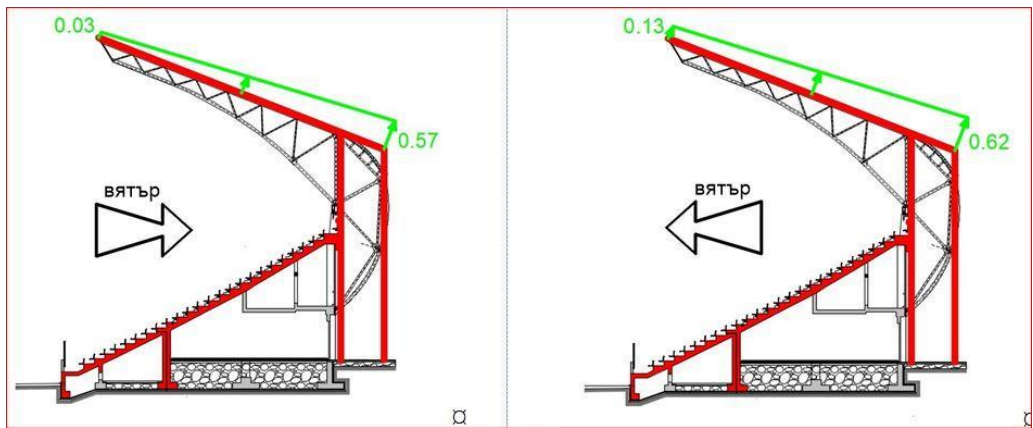
Фиг. 20. Самостоятелна трибуна с козирка – вариант 10



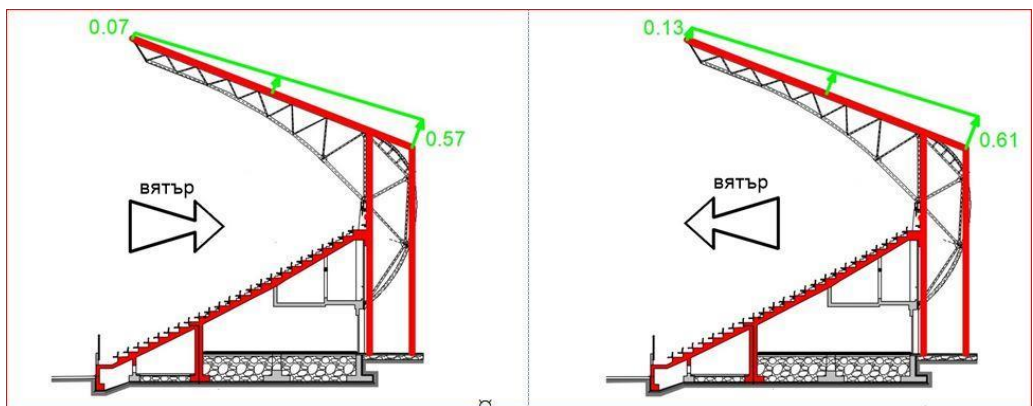
Фиг. 21. Наличие на стоманобетонни трибуни без козирки за останалите сектори – вариант 7



Фиг. 22. Наличие на стоманобетонни трибуни за останалите сектори и козирка над сектор А – вариант 3



Фиг. 23. Наличие на стоманобетонни трибуни и козирки за останалите сектори, без ъгловите козирки – вариант 2



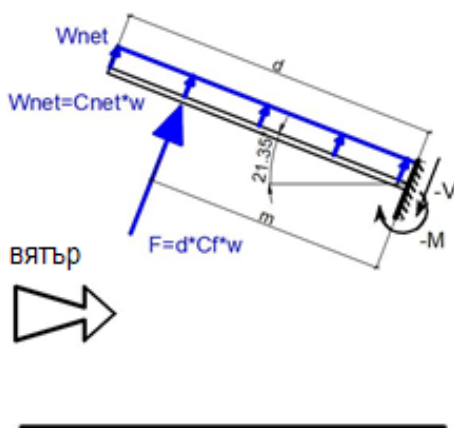
Фиг. 24. Напълно завършен стадион – вариант 1

От една страна, тази трибуна е с по-изчистена геометрия спрямо сектор А, което прави резултатите, получени от нормативните източници, по-правдоподобни. Това дава възможност да се направи пряк паралел между резултатите от CFD и тези от нормите и стандартите за проектиране и да се търси числово изражение на влиянието на наличието на други трибуни и козирки чрез подходящ преводен коефициент.

От друга страна, сходството между резултатите, получени при CFD, за самостоятелно разглеждана трибуна и козирка на сектор В и резултатите от нормативни източници се явява единствен индикатор за коректността на изследването чрез CFD при липса на резултати от ветрови тунел.

4.3. Сравнение на резултатите за сектор В при различна степен на завършеност на стадиона

За сравнение на резултатите, получени със CFD-анализ с методики, предложени в правилниците за проектиране, козирката е разглеждана като конзолно запъната към трибуната. Предмет на сравняване са огъващите моменти и срязващите сили в опорното сечение на условната конзола. Разглеждана е ивица от покрива с широчина 1 m, дължина на конзолата $d = 25,12$ m (фиг. 25).

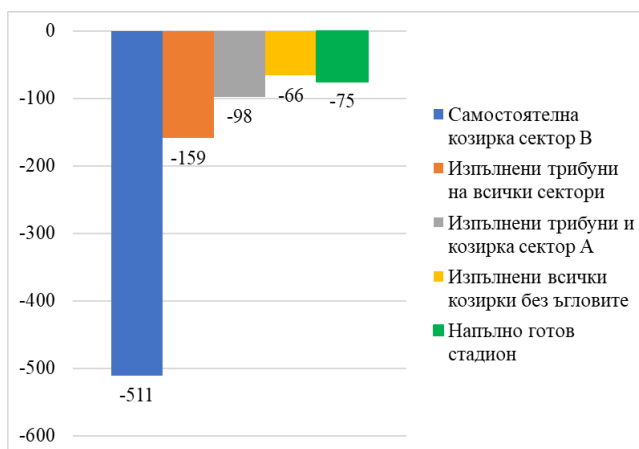


Фиг. 25. Условна конзола за сравнение на ефектите от ветрово въздействие по покрива на условно изолиран сектор В

В табл. 1 и на фиг. 26 е направено сравнение на опорните реакции за условната конзола от фиг. 25, получени за петте различни степени на завършеност на стадиона, които са описани в сравнителния анализ. Въведен е коефициент δ , който представлява отношението на получения огъващ момент в условната конзола от ветрово въздействие за съответната степен на завършеност на стадиона към момента, получен от ветрово въздействие върху самостоятелна трибуна. Прави впечатление значителната редукция на натоварването при наличие на трибуни и, най-вече, на козирки по останалите сектори на стадиона. Подобни резултати са докладвани и в [25]. Представените резултати трябва да се приемат за репрезентативни по отношение на глобалното влияние на наличието на козирки, но не и що се отнася за конкретните стойности, поради липсата на калибриране на CFD модела с изпитване във ветрови тунел.

Таблица 1. Реакции за условна конзола

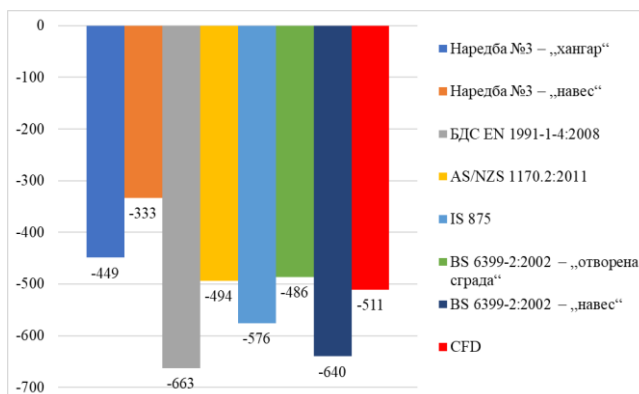
№	Степен на завършеност на стадиона	Усилия		δ	Коментар
		-M, kNm	-V, kN		
1	Самостоятелна козирка сектор В	-511	-38,3	1,0	фиг. 20
2	Изпълнени трибуни на всички сектори	-159	-14,1	0,31	фиг. 21
3	Изпълнени трибуни и козирка сектор А	-98	-9,8	0,19	фиг. 22
4	Изпълнени всички козирки без ъгловите	-66	-7,5	0,13	фиг. 23
5	Напълно готов стадион	-75	-8,0	0,15	фиг. 24



Фиг. 26. Графично сравнение на стойностите на огъващия момент в условна конзола за ефектите от ветрово въздействие при различна завършеност на стадиона – сектор В

4.4. Сравнение на резултатите за сектор В от изследването чрез CFD и от анализа на нормативните източници

На фиг. 27 е направено сравнение на резултатите от анализа на нормативни източници [20 ÷ 24] и получени от изследването чрез CFD. Подробен анализ и резултати от проучването, получено от анализ на нормативните документи, може да се намери в [26].



Фиг. 27. Графично сравнение на стойностите на огъващия момент в условна конзола за ефектите от ветрово въздействие по покрива на условно изолиран сектор В – сравнение с резултата от CFD

Сходството на резултатите е много добро, което може да се приеме за показател, че зададените параметри на числовото изследване са подходящи.

5. Изводи и заключения

Разработените изчислителни модели и проведените симулации, основани на методите на Computational Fluid Dynamics (CFD), както и анализът на резултатите, водят до следните изводи:

- Направеното сравнение на коефициентите за налягане (аеродинамични коефициенти), получени чрез CFD за изолирана козирка, показва доста добро съвпадение с препоръките на стандарта на Австралия и Нова Зеландия [22]. Това дава известна увереност на работния колектив относно получените резултати за цялостното компютърно изследване.
- Симулациите посредством CFD са единственото средство, чрез което може да се проследи какъв е ефектът от ветровото натоварване върху козирките при изграждането на покривите над трибуните сектор по сектор. Основният извод, до който достигнахме с тези изследвания, е, че колкото повече се „затваря“ чашата на стадиона, толкова повече намалява ефектът от вятър върху покривите. Тук трябва да бъде подчертано, че изграждането на покривите трябва да стане по план, като се изпълняват два по два срещуположни покриви и категорично се избягват конфигурации на покривите тип „Г-образна“ и „П-образна“. Завишените локални ефекти от вятър в крайните полета на правите участъци на козирките трябва да бъдат взети предвид.
- Симулациите посредством CFD са и единственото средство, чрез което може да се направи анализ на ефекта от аеродинамична сянка за стоманените козирки от срещуположно изградените стоманобетонни трибуни. Тези резултати показват редукция на ветровото натоварване при наличие на насрещна стоманобетонна трибуна. Регистрира се аеродинамична сянка, водеща до намаляване на вятъра върху покривите, както при посока на вятъра от игрището навън, така и отвън към игрището. Тук следва да се направят следните уговорки за получените резултати:
 - Ослабянето на компютърни симулации и CFD е мощно и съвременно средство, но то винаги трябва да е съпроводено с паралелно изследване във ветрови тунел.
 - Околните препятствия около стадиона, които са по пътя на вятъра, би следвало да се отчитат и моделират, както това би се направило в едно моделно изследване във ветрови тунел. Поради липса на информация и поради липса на ресурс, моделиране на околното пространство и препятствията около стадиона не е направено, а наличието на препятствие е отчетено чрез използването на профил на вятъра, отговарящ на местност тип В, съгласно [20]. Единственото препятствие, което е моделирано, е наличието на стоманобетонни трибуни по цялата периферия на стадиона. В този смисъл се получава известно дублиране на ефектите на „заслоняването“ и появата на турбулентност във флуидния поток, а това в крайна сметка води до резултат на страната на несигурността.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Blocken, B., Carmeliet, J.* Pedestrian wind environment around buildings: literature review and practical examples. // Journal of Thermal Env. and Bldg. Sci. Vol. 28, № 2, October 2004.
2. *Raykov, St., Georgiev, Tzv., Dinev, D.* Wind loading on stadium roofs: an overview. // Annual of the UACEG, Vol. 54, issue № 3, 2021 (in Bulgarian).
3. *Bosak, G.* Wind tunnel tests of the effect of aerodynamic interference on a stadium roof. Technical transactions, Civil engineering, 6-B/2014.
4. *Biagini, P., Borri, C., Facchini, L.* Wind response of large roofs of stadiums and arena. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 95 (2007) 871-887.
5. *Fu, J., Gao, Y, Wu, J., Xu, A.* Wind effect on a long span steel roof structure: numerical simulation and equivalent static wind loads. // Journal of vibroengineering, vol. 17, No. 5, 2015.
6. *Holmes, J.* Modern techniques for effective wind load distribution on large roofs. World Congress on Advances in Civil, Environmental and Materials Research, Seoul, Korea, 2012.
7. *Tzankov, M., Georgiev, Tzv., Yotsov, Iv.* Wind load on roof structure studied through wind tunnel and conventional design code method. Sofia, October 9-10, Second National Symposium on Steel, Wooden and Composite Structures, UACEG, 2008 (in Bulgarian).
8. *Reid, W., Travers, J.* Wind tunnel testing of sport stadiums. // Journal of Construction and building materials, Vol. 5, No. 3, 1991.
9. *Blocken, B.* 50 years of Computational Wind Engineering: Past, present and future. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 129 (2014) 69-102.
10. *Tamura, Y., Van Phuc, P.* Development of CFD and applications: Monologue by a non-CFD-expert. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 144 (2015) 3-13.
11. *Zhai, Zh.* Computational Fluid Dynamics for Built and Natural Environments. Springer, 2020.
12. *Blocken, B., Stathopoulos, T., Carmeliet, J., Hensen, J.* Application of computational fluid dynamics in building performance simulation for the outdoor environment: an overview. // Journal of Building Performance Simulation, 4:2, (2011) 157-184.
13. *Blocken, B.* Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. J. of Building and Environment XXX (2015) 1-27.
14. *Gosman, A.* Developments in CFD for industrial and environmental applications in wind engineering. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 81 (1999) 21-39.
15. *Kubilya, A., Derome, D., Blocken, B., Carmeliet, J.* Wind-driven rain on two parallel wide buildings: Field measurements and CFD simulations. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 146 (2015) 11-28.
16. *Tamura, T., Nozawa, K., Kondo, K.* AIJ guide for numerical prediction of wind loads on buildings. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 96 (2008) 1974-1984.

17. Huang, S., Li, Q., Xu, S. Numerical evaluation of wind effects on a tall steel building by CFD. // Journal of Constructional Steel Research 63 (2007) 612–627.
18. Szafran, J., Nowakowski, A. Structural analysis of long-span trusses of a speedway stadium roof. Proc. of XXI LSCE-2015, Rzeszow, Poland 4 Dec 2015.
19. Zdravkov, L. Wind loads on roofs on circular base. // Annual of the UACEG, Vol. 54, issue № 3, 2021 (in Bulgarian).
20. Naredba № 3 za osnovnite polozhenia za proektirane na konstruktivite na stroezhite i za vazdeystviyata varhu tyah, 2004.
21. BDS EN 1991-1-4:2008 – Actions on structures, General actions, Wind action.
22. AS/NZS 1170.2:2011 – Structural design actions. Part 2: Wind actions, 2011.
23. IS 875:2015 – Design Loads (Other than Earthquakes) for Buildings and Structures – Code of Practice. Part 3 Wind actions, ICS 91.100.10, BIS April 2015.
24. BS 6399-2:2002 – Loading for buildings. Code of practice for wind load, BSI 31 July 2002.
25. Letchford, C., Killen, G. Equivalent static wind loads for cantilevered grandstand roofs. Engineering Structures 24 (2002) 207-217.
26. Georgiev, Tzv., Raykov, St., Dinev, D. Comparison of wind load for grandstand cantilever roofs determined according to different design codes. Annual of the UACEG, Vol. 54, issue № 3, 2021 (in Bulgarian).

CFD ESTIMATION OF WIND LOADING ON A STADIUM ROOF

D. Dinev¹, St. Raykov², Tzv. Georgiev³

Keywords: computer simulations, CFD, wind load, stadium roofs, aerodynamic lee effect

ABSTRACT

The wind effects on buildings or large facilities with a complex shape cannot be recognized within the recommendations of the design codes and usually are studied experimentally in wind tunnels. These studies require a scale model of the building to be built. The scaling process is a very complex because it is necessary to represent the interaction between the moving fluid and the structure. In general, these tests are expensive because of the

¹ Dobromir Dinev, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. “Structural Mechanics”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: ddinev_fce@uacg.bg

² Stanislav Raykov, Chief Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. “Steel, Timber and Plastic Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: raykov_fce@uacg.bg

³ Tzvetan Georgiev, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. “Steel, Timber and Plastic Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: cvgeorgiev_fce@uacg.bg

need of a specialized laboratory, and they are also time consuming due to the significant work for the model preparation and the deriving of the results.

In the last three decades, due to the development of the computer technology, a lot of computer simulations have been applied in wind engineering. These simulations are based on the basic principles and laws of Computational Fluid Dynamics (CFD) which describe the fluid's motion and predict the interaction between the wind, environment, and building.

The paper presents a study of the wind action on the steel roof of the Hristo Botev stadium in Plovdiv. This study is based on the computer models and numerical methods for application of the CFD technics.

The study presents results for pressure coefficients obtained by the solutions of fifty computational models which correspond to different configurations of the construction stages of the stadium's grandstands and different wind directions. The authors compare the results obtained by the CFD's computer simulations and the recommendations of the wind code of Australia and New Zealand for a single grandstand covered by a roof. The aerodynamic effect of the opposite grandstand is studied, and the results are compared with the wind tunnel test of a similar stadium. The paper ends with several practical conclusions and recommendations.