



Получена: 07.05.2021 г.

Приета: 01.06.2021 г.

ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ВЕТРОВТО ВЪЗДЕЙСТВИЕ ВЪРХУ ПОКРИВИ НА СТАДИОНИ – КРАТЪК ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР

Ст. Райков¹, Цв. Георгиев², Д. Динев³

Ключови думи: ветрово въздействие, козирки над трибуни, ветрови тунел, стадиони

РЕЗЮМЕ

Спортните стадиони са съоръжения с много разнообразни архитектурни форми и конструктивни системи, които отговарят на редица специфични изисквания. Едно от основните в последните години е осигуряването на комфорт за публиката, което предполага наличие на покриви над трибуните им.

Ветровото въздействие обикновено се явява доминиращо за покривната конструкция на големите спортни стадиони. Натоварването от вятър за подобни конструкции се характеризира с някои съществени различия спрямо това върху покривите на помалогабаритни и ниски сгради. Обикновено стандартите за проектиране не дават релевантна информация за определяне на ветровото натоварване за покриви над стадиони и това предполага по-различен подход при определянето му.

В настоящия доклад авторите правят обзор на национален и световен опит при определяне на ветрово натоварване върху покриви над стадиони. Представени са редица примери и са анализирани подходите, прилагани при проектирането на редица големи спортни съоръжения. Направени са обобщения и заключения, които могат да бъдат полезни при бъдещи сходни проекти.

¹ 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

² 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

³ Добромир Динев, доц. д-р инж., кат. „Строителна механика“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: ddinev_fce@uacg.bg

1. Въведение

Основната цел на настоящото изследване е оценка на ветровото въздействие върху покрива на стадион „Христо Ботев“ в град Пловдив. За целта са дефинирани няколко основни задачи, които следва да бъдат решени. От една страна, разгледани са редица нормативни източници – норми и стандарти за проектиране на страни, които са водещи в областта на изследванията, свързани с ветровото въздействие и имат значителен опит и натрупване на информация и експертиза по темата. На тази база е направено обобщение, което е представено в отделна публикация. Също така, извършена е компютърна числова симулация на геометрията на стадиона и компютърна симулация за определяне на ефектите от ветровото натоварване върху стоманените козирки чрез числена динамика на флуидите. Накрая, направен е кратък, но задълбочен обзор на различни литературни източници по темата, който е представен тук. На базата на тези три основни направления на изследването са изведени препоръки за определяне на ветровото въздействие върху покривната козирка на разглеждания стадион. Основните резултати са представени в серия от три статии по темата, първата от които е настоящата.

2. Основна информация за изследвания стадион

2.1 Общи данни



Фиг. 1. Общ изглед на стадион „Христо Ботев“ – проект

Стадион „Христо Ботев“ се намира в град Пловдив. Построен е в периода 1959 – 1961 година. През 2012 година е започната мащабна реконструкция, която е спряна временно през 2014 година. Понастоящем реконструкцията на стадиона и превръщането му в модерно спортно съоръжение отново е в процес на реализация.

2.2 Причина за провеждане на изследването

При проектирането на стадиона е взето решение да бъдат използвани българските национални норми за проектиране [1]. На практика в тях липсват данни за ветровото въздействие върху козирки на стадиони и е възможно да се използва единствено апроксимация с подобни съоръжения – хангар или навес. Настоящото изследване има за цел да направи анализ на различни източници и да даде реалистична оценка на натоварването, определено съгласно [1].

3. Кратък литературен обзор

В настоящата точка е обобщен резултатът от направения преглед на литературни източници, свързани с тематиката на настоящото изследване. Направен е обзор на статии, части от проекти за стадиони, дисертации, доклади и други. Основен критерий при подбора на литературните източници е сходството между изследваните обекти и обекта стадион „Христо Ботев“ в град Пловдив. Акцент в направеното проучване са използваните методи за изследване на ефектите от ветровото натоварване и характерни резултати, имащи отношение към предмета на настоящото изследване.

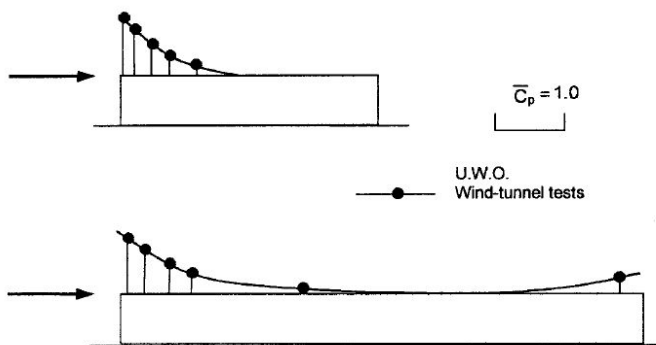
3.1. Общи положения

Ветровото въздействие обикновено се явява доминиращо за покривната конструкция на големи съоръжения, каквито са спортните стадиони. Натоварването от вятър за подобни конструкции се характеризира с някои съществени различия спрямо това върху покривите на по-малогобаритни и ниски сгради, което оправдава по-различен подход при определянето му, който е свързан с изследване в аеродинамичен тунел и последваща обработка на получените данни при използването на съвременни методи във ветровото инженерство [5, 6].

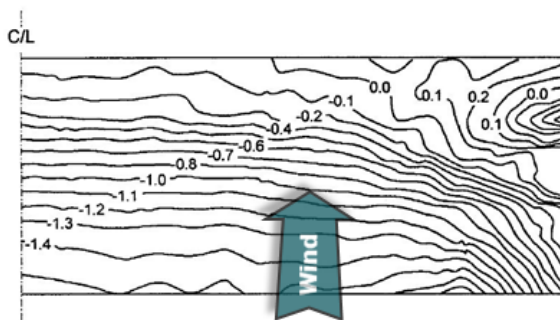
В своята пленарна лекция [5], изнесена на Световния конгрес за напредъка в областта на строителството, екологията и знанието за материалите през 2012 г. (АСЕМ '12) в Сеул, *John D. Holmes* дискутира спецификата на определянето на ветровото въздействие върху големи покриви на стадиони и други покрити спортни съоръжения. Той споделя част от своя богат опит в областта на големите отворени покриви (над трибуни или цели стадиони) и акцентира, че ветровото въздействие обикновено е доминиращо за покривната им конструкция. Също така, очертава съществените различия спрямо покривите на по-малогобаритни и ниски сгради. В крайна сметка, заключението на лекцията е, че проектирането следва да е обвързано с изследване в аеродинамичен тунел и последваща обработка на получените данни.

От инженерна гледна точка ветровото въздействие обикновено се описва чрез три основни компоненти, а именно – средна (или статична) компонента, пулсационна компонента (отчитаща поривите на вятъра) и резонансна компонента, която е свързана с динамичното взаимодействие между вятъра и конструкцията. В основата на повечето норми и стандарти за проектиране е залегнал т. нар. квази-стационарен подход. При него се приема, че налягането върху конструкцията, дължащо се на пулсациите на вятъра, следва конфигурацията на статичната компонента на вятъра в надлъжна посока. Пиковите налягания върху повърхността се намират като се използват коефициенти за средно налягане, получени за скорост на вятъра при върхови пориви. Този подход работи много добре за повечето „стандартни“ сгради и съоръжения. При покривите на спортни съоръ-

жения влияние върху разпределението на ветровото налягане оказват голямата площ на покрива, сравнително малките наклони, както и фактът, че те обикновено имат известна кривина [7]. По-голямата площ на покривите води до два ефекта – от една страна, често се наблюдава „небалансирано“ налягане, което не е еднакво по цялата повърхност и, от друга, обикновено голяма част от покрива е под влиянието на „закачен“ флуиден поток, вж. фиг. 2. Флуидният поток се „отделя“ от повърхността при срещата си с ръба на покрива и се „закачва“ по дължина на покрива, образувайки „балон“. При по-малки покриви е напълно възможно „закачването“ да не се реализира, докато при едроплощните голяма част от покрива попада в такава зона, което води до различни стойности на налягането върху повърхността. Най-големите стойности на налягането се получават в региона на аеродинамичния „балон“. Когато покривът е конзолен, се получава сумиране на налягането от двете му страни (отдолу и отгоре на повърхността), при което се реализира т. нар. „нетно“ налягане с екстремум на смученето при челния ръб и постепенно затихване по дължина, илюстрирано на фиг. 3.



Фиг. 2. Разпределение на средното налягане върху едроплощни плоски покриви съгласно [8]

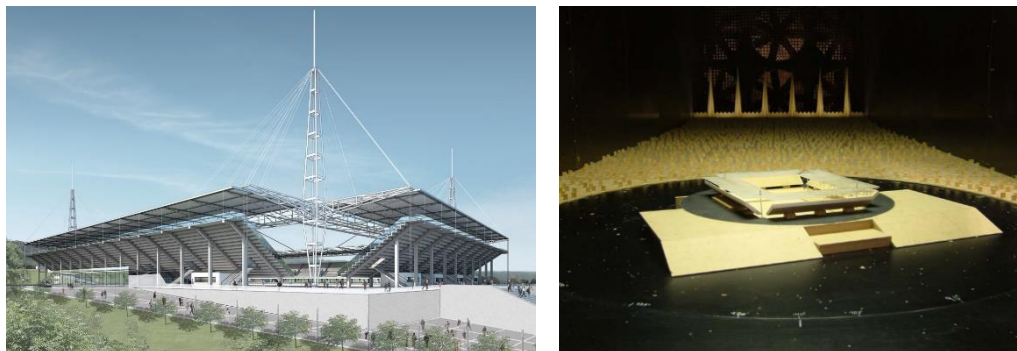


Фиг. 3. Разпределение на средното нетно налягане върху конзолен покрив на стадион съгласно [9]

Допълнително, голямо влияние върху разпределението на налягането върху покривите на стадиони оказва наличието на трибуни. От съществено значение е липсата или наличието на разстояние (отвор) между горния край на трибуните и покрива в най-ниската му част. Това е описано подробно при параметрично изследване, проведено в последната година [10], което е разгледано подробно по-нататък в текста.

3.2. Резултати от изследвания, при които е използван ветрови тунел

В българската практика има проект на сходно съоръжение – нов, модерен стадион в град Варна, който е разработен в периода 2007 – 2008 година (фиг. 4) и включва изследване във ветрови тунел. Като следствие от натрупания в този проект опит, в доклада [11] е публикувано много полезно сравнение между резултатите, получени след изследване във ветрови тунел [12] и аналитично изследване, основано на указанията на Наредба 3 [1]. Прави се изводът, че използването на схема № 11 (навес) е подходяща за конкретната конфигурация на стадиона във Варна, като резултатите, получени съгласно нормите [1], и моделното изследване при мащаб 1:300 във ветрови тунел [12] са с разлика от 4% до 10%, като нормите дават по-консервативните резултати.



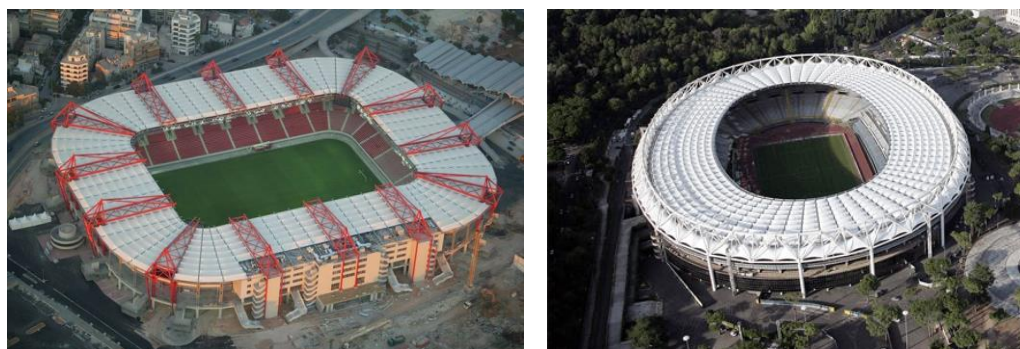
Фиг. 4. Стадион в гр. Варна – общ вид и изследване във ветрови тунел [12]

Внимателният прочит на доклада [12] показва, че ветровите инженери препоръчват използване на амплифициращ коефициент $R = 1,15$ за отчитане на динамичния ефект от взаимодействието на вятъра с конструкцията. Важно е да се подчертае, че също така препоръчват прилагане на хоризонтален товар на около 1 метър под повърхността на покрива, чрез който да се отчете челният натиск от вятър. Този товар е със стойности $0,80 \text{ kN/m}^2$ и $0,90 \text{ kN/m}^2$, в зависимост от посоката на вятъра.

Друг интересен източник е [13], в който авторите *S. Morley* и *J. D. Holmes* споделят богатия си опит от изследването на ветровото натоварване на редица стадиони и сгради с големи покриви. Тук се включват Олимпийският стадион в Сидни, Стадион Уембли в Лондон, главната трибуна на хиподрума Аскът, в град Бъркшър, Англия, терминал “Midfield” на летище Абу Даби, централният корт в Уимбълдън. Ветровото натоварване върху всички покриви на така изброените конструкции е определено чрез моделно изследване във ветрови тунели. Авторите на публикацията акцентират върху необходимостта от колаборация между строителния инженер, който проектира стоманения покрив и ветрови инженер. Чрез подобно сътрудничество могат да се дефинират критичните за стоманената конструкция конфигурации на товари и по този начин да се постигне по-малко по мащаб изследване, което води до оптимален резултат.

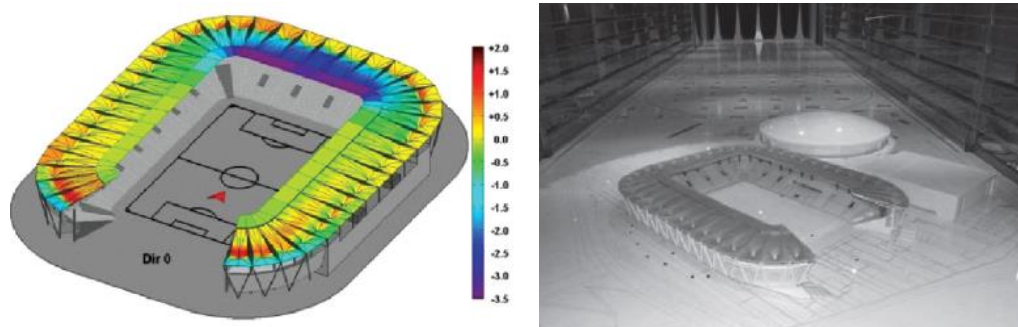
Резултати от изследвания чрез ветрови тунел в лабораторията CRIACIV (Inter-University Research Centre on Building Aerodynamics and Wind Engineering) на редица голямо-размерни стадиони са систематизирани в [14] от *Biagini* и колектив. Предоставена е информация за изследвания на покривите на стадион „Караискакис“, (зона Нео Фалиро в Пирея, Гърция), покрива на спортния център в Манфредония, покривите на „Стадио деле Алпи“ в Торино и „Стадио Олимпико“ в Рим, вж. фиг. 5. Според професор *Клаудио Бори* и неговите сътрудници, единственият надежден метод за получаване на реалистич-

на картина на ветровото натоварване върху покриви на стадиони е чрез моделно изследване във ветрови тунел. Това е така, както защото всеки стадион и заобикалящата го среда са уникални, така и поради факта, че покривите са тип отворен навес, при който се явяват както смучене така и натиск. Наред с това, предвид факта, че покривите на стадионите са мащабни конструкции, при които се наблюдава липса на корелация между максималните стойности на коефициентите на вътрешното и външното ветрово налягане C_e и C_i , за да се получи икономично проектиране и да се определи резонна и не прекомерно консервативна стойност на нетното налягане C_{net} , отново следва да се прибегне до изследване чрез ветрови тунел.



Фиг. 5. Стадион „Карайскакис“ – Пирей (вляво). Олимпийски стадион в Рим (вдясно)

Моделно изследване във ветрови тунел на вариант за разширение на стадион ŁKS Лодз в Полша е докладвано в [15] – фиг. 6. Изследването е направено чрез модел в мащаб 1:200 в лабораторията по ветрово инженерство в Краковския технологичен университет. Характерно за този проект е, че по архитектурни съображения формата на стадиона е „П-образна“, като отворената страна съвпада и с посоката на най-силните ветрове. Втори характерен момент в този проект е наличието в съседство на сградата на Атлас Арена, която е зала със съизмерими размери.



Фиг. 6. Стадион ŁKS Лодз, Полша – диаграма на ветровото налягане върху повърхности (вляво) и моделно изследване във ветрови тунел (вдясно) [15]

Според автора на статията тестовите недвусмислено доказват, че наличието на отворена форма на стадиона води до значително увеличаване на налягането върху покрива, като най-неблагоприятно смучене се получава при посока на вятъра срещу отворената страна и най-голям натиск – при противоположната посока на вятъра. Коефициентите на

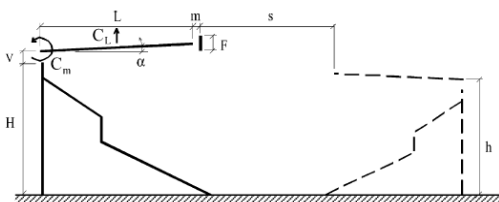
местно налагане, които са измерени, имат стойности +2,0 и -3,5 (т. нар. „краеви ефект“). Наличието на сграда със съизмерими размери в съседство влияе върху разпределението на налягането по повърхнините на покрива.

3.3. Отчитане на влиянието на отсрещна трибуна и козирка

Предвид конфигурацията на новия стадион „Христо Ботев“ в Пловдив специално внимание в настоящото изследване е отделено на влиянието на наличието на отсрещна трибуна и козирка. Разгледани са две много интересни публикации по темата, работата по които е довела и до промяна в препоръките на нормативни източници.

В източник [16] авторите правят много полезен от практическа гледна точка обзор за използването на т. нар. еквивалентно статично натоварване при проектиране в концептуална фаза на покриви тип козирка над трибуни от стадион. Авторите подчертават, че надеждният метод за анализ на ефектите от вятър са тестовете във ветрови тунел. Въпреки това, при ранната фаза на съставянето и прецизирането на конструктивната композиция е необходимо да се работи именно с еквивалентното статично натоварване.

Първообразът, на който се основава изследването, е многофункционалният стадион в Бризбейн, Куинсланд, Австралия, който е с капацитет 52 500 зрители, вж. фиг. 7. Изследванията, които се цитират и анализират в статията, доказват резултати във вреда на сигурността на австралийския стандарт [3], който по това време използва триъгълна диаграма на еквивалентния статичен товар от вятър – фиг. 8 (вляво). При следващото издание на стандарта се преминава към трапецовидна диаграма, така както е показано на фиг. 8 (вдясно).



Фиг. 7. Стадион Бризбейн, Австралия – общ изглед (вляво), схема на стадиона (вдясно)

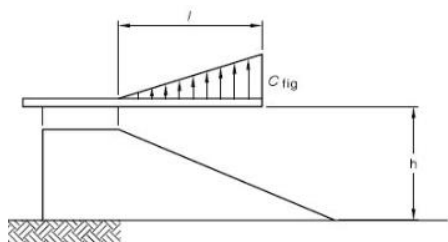
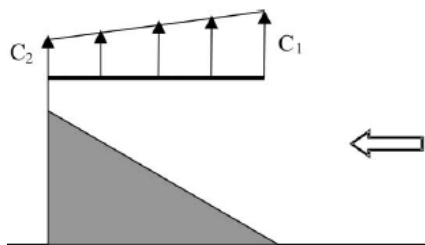


FIGURE D7 CANTILEVERED ROOF AND CANOPY



Фиг. 8. Схема на разпределение на еквивалентното ветрово натоварване в [3] (вляво).
Схема на натоварването, предложена в [16] и възприета в [4] (вдясно)

Друг интересен аспект от тази публикация е изследването на влиянието на другите трибуни от стадиона, когато са по пътя на вятъра. Разгледани са три случая на отношение на височините на трибуната, за която се определя ветровото натоварване, и отсрещната трибуна, съответно 2:1, 1:1 и 1:0,58. За трите случая са определени стойностите на аеродинамичните коефициенти C_1 и C_2 от фиг. 8 (вдясно). Получените резултати са сравнени с тези за свободно стояща трибуна, като са съпоставени опорните реакции за покривната козирка, съответно огъващ момент и срязваща сила от ветрово въздействие. Тези интересни резултати са обобщени таблично и са показани на фиг. 9.

Worst case upward peak pressure coefficients for roof internal bays, excluding dynamic effects

Configuration	Equivalent static peak pressure coefficient for trapezoidal distribution ^a		Proportion of BASE load effect coefficients		Proportion of AS1170.2 load effect coefficients	
	C_2^b	C_1^b	Moment (%)	Uplift (%)	Moment (%)	Uplift (%)
BASE: Isolated grandstand pitch, $\alpha \pm 7^\circ$ (maximum at $\phi=0^\circ$, $H/L < 1.4$)	3.6	6.0	100	100	156	192
For $H/L > 1.4$	4.6	4.5	87	95	136	182
Any fascia on leading edge $F/L=0.1^c$	3.8	4.2	78	83	122	160
Maximum effects on shielded grandstands at $\phi=0^\circ$ and $s/L=6$, only						
Maximum uplift with half height grandstand upstream $H/h=2$	2.6	5.8	91	88	142	168
Maximum uplift with same height grandstand upstream $H/h=1$	1.7	2.9	48	48	75	92
Maximum uplift with approx. double height grandstand upstream $H/h=0.58$	1.0	2.6	40	38	62	72

^a For a grandstand with a sub-roof vent of $>1\%$ of the total elevation area of the structures, a further reduction of load resulting in a 10% reduction of the total roof moment at the support is allowed [2].

^b C_1 is at the leading edge and C_2 the trailing edge of the cantilever, respectively.

^c The loads from the fascia itself must be added to the roof system to establish the total wind load effect.

Фиг. 9. Влияние на срещулежаща трибуна върху налягането от вятър според [16] – смучене, за средно (вътрешно) поле от козирката

Worst case upward peak pressure coefficients for roof end bays, excluding dynamic effects

Configuration	Equivalent static peak pressure coefficient for trapezoidal distribution ^a		Proportion of BASE load effect coefficients		Proportion of AS1170.2 load effect coefficients	
	C_2	C_1	Moment (%)	Uplift (%)	Moment (%)	Uplift (%)
BASE: Isolated grandstand pitch, $\alpha \pm 7^\circ$ (maximum at $\phi=30^\circ$, $H/L < 1.4$)	3.4	4.4	100	100	122	156
For $H/L > 1.4$	3.7	6.3	134	128	163	200
Any fascia on leading edge $F/L=0.1$ and $m/L=0.03^b$	3.5	5.7	122	118	149	184
Maximum effects on shielded grandstands at $\phi=0^\circ$ and $s/L=6$, only						
Maximum uplift with half height grandstand upstream $H/h=2$	1.5	3.7	73	67	89	104
Maximum uplift with same height grandstand upstream $H/h=1$	1.2	4.5	84	73	102	114
Maximum uplift with approx. double height grandstand upstream $H/h=0.58$	1.9	2.9	63	62	77	96

^a No reduction in load for a grandstand with sub-roof venting is permitted for end bays [2].

^b The loads from the fascia itself must be added to the roof system to establish the total wind load effect.

Фиг. 10. Влияние на срещулежаща трибуна върху налягането от вятър според [16] – смучене, за крайно поле от козирката

В източник [16] се указва, че при наличие на отвори по фасадата на стадиона и съотношение „площ на отвори / площ на фасадата“ по-голямо от 1%, може да се допусне редуция на натоварването от вятър така, че да се достигне до 10% по-малък момент в основата на конзолата на козирката. Стойностите, оградени в син и червен правоъгълник,

са интересни за коментар. В синьо са показани стойностите на C_1 и C_2 при наличие на засенчваща трибуна по пътя на вятъра, съответно два пъти по-ниска, със съизмерима височина и два пъти по-висока от разглежданата. Засенчващата трибуна е на разстояние до шест пъти височината на изследваната трибуна. В червено е показана в проценти редукцията на огъващия момент и сръзващата сила от ветрово въздействие при наличие на засенчваща трибуна за средно поле от козирката.

На фиг. 10 са показани резултатите за стойностите на C_1 и C_2 при смучене за крайно поле на същата трибуна. Следва да се отбележи, че при крайно поле не се разрешава редукция на товара от вятър, дори и да има отвори по фасадата. Това се обяснява с наличието на цяла отворена странична стена.

Интересни са и резултатите при нетен натиск върху козирката. В този случай разликите с налягането върху свободно стояща трибуна са дори по-големи. На следващите фиг. 11 и фиг. 12 са показани резултатите за стойностите на C_1 и C_2 при нетен натиск върху козирката за средно и крайно поле на същата трибуна.

Worst case downward peak pressure coefficients for roof internal bays, excluding dynamic effects

Configuration	Equivalent static peak pressure coefficient for trapezoidal distribution		Proportion of BASE load effect coefficients		Proportion of corresponding configuration upward load effect coefficients	
	C_2	C_1	Moment (%)	Uplift (%)	Moment (%)	Uplift (%)
BASE: isolated grandstand pitch, $\alpha \pm 7^\circ$ (maximum at $\phi = 90^\circ$)	-0.5	-0.8	100	100	13	14
Maximum download with half height grandstand upstream $H/h=2$, $s/L=6$, $\phi=0^\circ$	0.5	-0.6	33	8	5	2
Maximum download with same height grandstand upstream $H/h=1$, $s/L=6$, $\phi=0^\circ$	0.0	-1.4	133	108	37	56
Maximum download with approx. double height grandstand upstream $H/h=0.58$, $s/L=6$, $\phi=0^\circ$	0	-2.6	248	200	84	126

Фиг. 11. Влияние на срещулежаша трибуна върху налягането от вятър според [16] – натиск, за средно поле от козирката

Worst case downward peak pressure coefficients for roof end bays, excluding dynamic effects

Configuration	Equivalent static peak pressure coefficient for trapezoidal distribution		Proportion of BASE load effect coefficients		Proportion of corresponding configuration upward load effect coefficients	
	C_2	C_1	Moment (%)	Uplift (%)	Moment (%)	Uplift (%)
BASE: isolated grandstand pitch, $\alpha \pm 7^\circ$ (maximum at $\phi = 90^\circ$)	-2.2	-1.8	100	100	48	51
Maximum download with half height grandstand upstream $H/h=2$, $s/L=6$, $\phi=0^\circ$	0.1	-0.7	22	15	15	20
Maximum download with same height grandstand upstream $H/h=1$, $s/L=6$, $\phi=0^\circ$	0.5	-1.8	53	33	30	38
Maximum download with approx. double height grandstand upstream $H/h=0.58$, $s/L=6$, $\phi=0^\circ$	0	-2.4	83	60	62	94

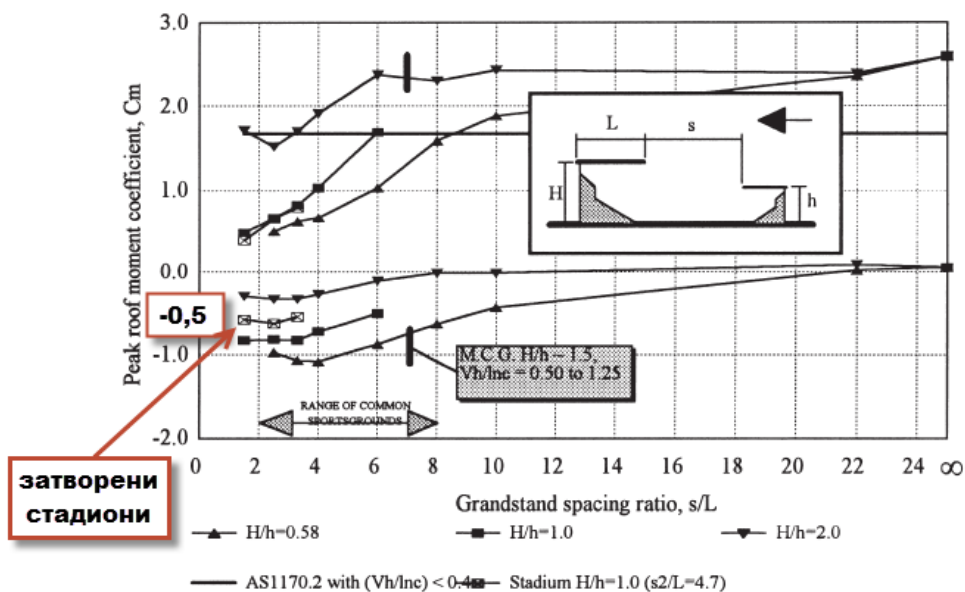
Фиг. 12. Влияние на срещулежаша трибуна върху налягането от вятър според [16] – натиск, за крайно поле от козирката

Въз основа на изложеното, основните изводи, които могат да бъдат изведени на базата на изследванията, публикувани в [16], са следните:

- еквивалентното статично натоварване от вятър върху козирки над трибуни на стадиони винаги има трапецовидна или триъгълникова форма, като трапецовидната е по-често срещаната;

- смученето доминира по своите абсолютни стойности, но има варианти на посоки на вятъра, при които се появява натиск;
- наличието на „засенчваща“ трибуна по пътя на вятъра (посока от игрището към трибуната) редуцира товара от вятър, но това не е така, когато посоката на вятъра е успоредна на трибуната.

Допълнително изследване на въпроса от същите автори е публикувано в [17]. Струва си да се акцентира върху частта, дискутираща взаимодействието на две срещуположни трибуни, разположени по пътя на вятъра. На фиг. 13 е показана диаграмата, обобщаваща взаимодействието между срещуположните трибуни. Авторите докладват, че максималният натиск от вятър е регистриран в случая, когато „засенчващата“ трибуна е два пъти по висока от разглежданата. Тогава стойността на натиск достига до около 65% от стойността на смучене.

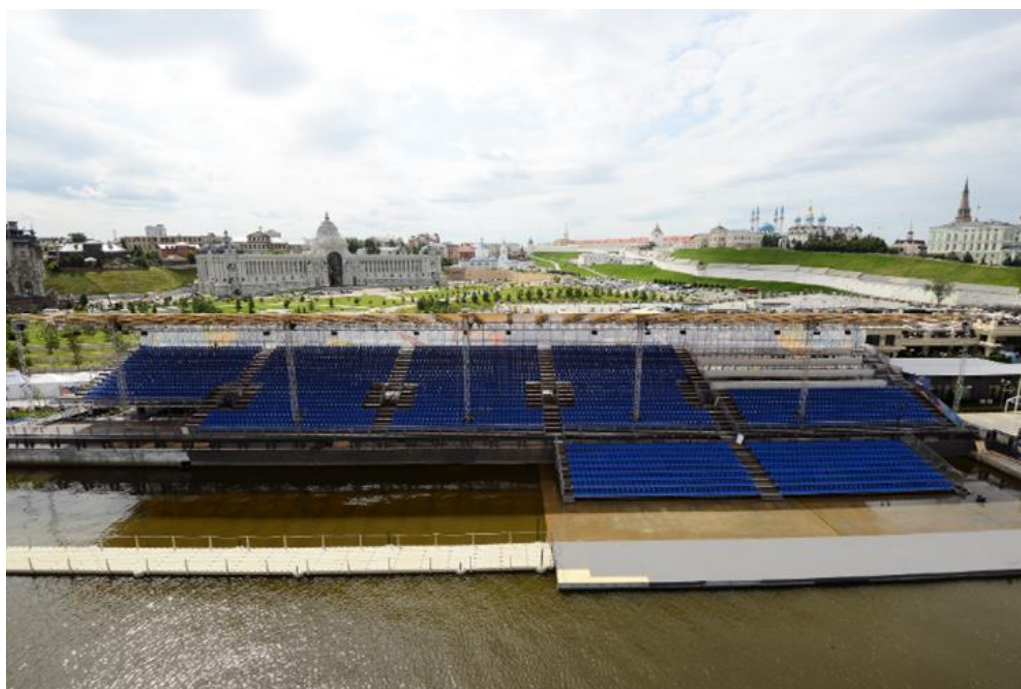


Фиг. 13. Влияние на срещуположна трибуна върху налягането от вятър според [17]

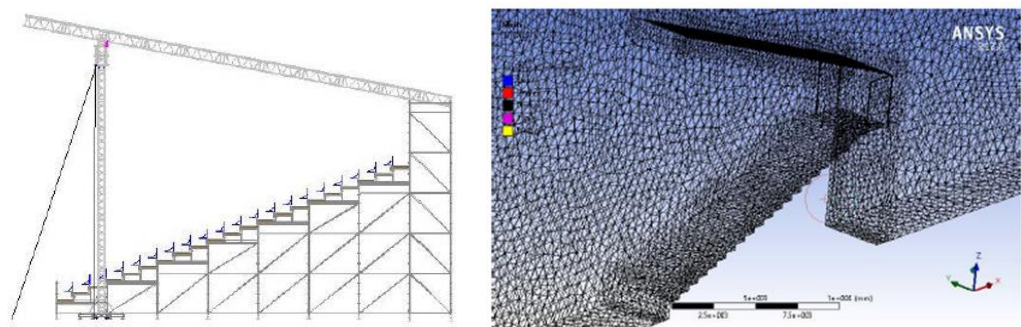
Авторите докладват и за изследване на стадион от затворен тип, при наклон на козирката в диапазона $\pm 7^\circ$. При затворен стадион максималната стойност на коефициентите за налягане е 0,5 както при смучене, така и при натиск.

3.4. Изследвания чрез числови модели

В публикацията [10] Галимулин и колектив представят едно много интересно изследване, което е базирано на използване на Computational Fluid Dynamics (CFD) в среда на ANSYS CFX. Предмет на анализа са самостоятелни трибуни с навес – фиг. 14 и фиг. 15, като авторите провеждат редица решения с промяна на различни параметри и разглеждат как те се отразяват на коефициентите за налягане по покрива.



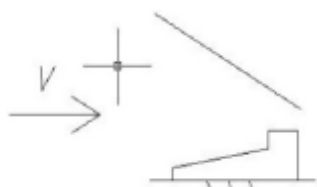
Фиг. 14. Главна трибуна, построена на брега на река Казан, предмет на анализа в [10]



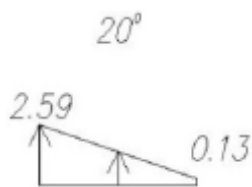
Фиг. 15. Вид на трибуната с навес и изчислителен модел в ANSYS съгласно [10]

Някои основни параметри от козирката, разгледана в [10], съвпадат с тези на стадион „Христо Ботев“ в град Пловдив. По тази причина тук са показани част от получените резултати. В същото време, трябва да се отбележи, че резултатите в [10] не са сравнени с резултати от ветрови тунел или натурни измервания и, в този смисъл, към тях следва да се подхожда предпазливо.

На фиг. 16 и фиг. 17 са показани резултатите при скорост на вятъра 20 m/s, наклон на покривната козирка 20° и посока на въздействието, съответно, от страна на откритата част (срещу трибуната) и към задната фасада. Интересно е и трябва да се отбележи същественото влияние върху големината на ветровото налягане върху покрива при наличие и липса на отвор между покрива и трибуната.



а) трибуната с отвор в задния край



б) коефициенти на налягане – с отвор



в) трибуната без отвор в задния край

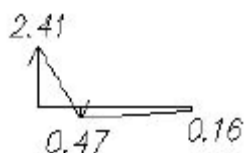


г) коефициенти на налягане – без отвор

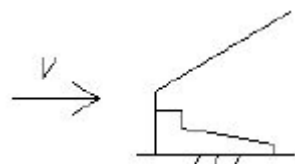
Фиг. 16. Резултати от анализ при посока на вятъра от страната на откритата част [10]



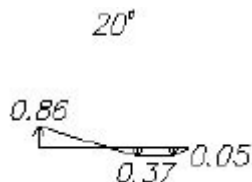
а) трибуната с отвор в задния край



б) коефициенти на налягане – с отвор



в) трибуната без отвор в задния край

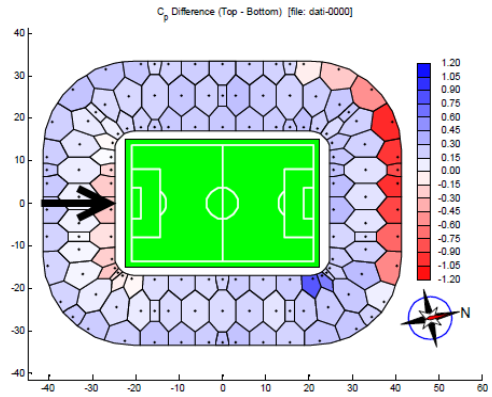


г) коефициенти на налягане – без отвор

Фиг. 17. Резултати от анализ при посока на вятъра от страната на фасадата [10]

От анализа на резултатите, показани на фиг. 16, можем да заключим, че когато вятърът духа от страната на игрището, козирката се повдига, а налягането по покрива е неравномерно. Наличието на отвори във фасадата облекчава ефекта от повдигането. От фиг. 17 можем да заключим, че когато вятърът духа от страната на фасадата, козирката се повдига само в краевата зона, след това се появява натиск. Налягането по покрива е силно неравномерно. Наличието на отвори във фасадата увеличава смученето в краевата зона.

Друго проучване, при което е проведено изследване чрез метода на крайните елементи (МКЕ), е това на *Bartoli* и колектив [18]. Представена е информация за резултати от провеждане на тестове във ветрови тунел в лабораторията CRIACIV във Флоренция за стадион „Караискакис“ в Пирея. В същото време, проведен е и динамичен анализ чрез изчислителния модел на конструкцията, базиран на МКЕ и използването на записите за изменение на налягането в отделните зони на покрива като динамичен товар. Общ вид на модела на стадиона в мащаб 1:250 и схема за нетното налягане по покрива при условна посока на вятъра $\theta = 0^\circ$ са представени на фиг. 18.

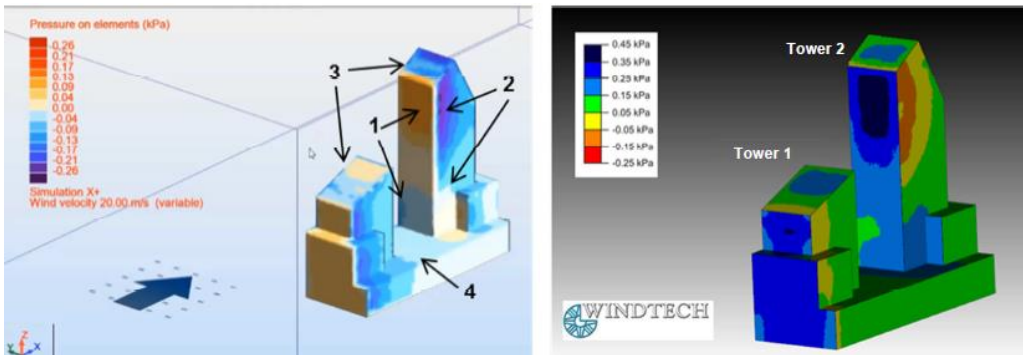


Фиг. 18. Стадион „Караискакис“ в Пирея. Модел, използван във ветрови тунел и схема на измерените средни стойности на нетните налагания от вятър [18]

Доклад за валидация на резултатите от използването на модула Autodesk Robot Structural Analysis Professional wind simulator е представен в [19] от Autodesk. Направено е сравнение с резултати, получени от тест, който е проведен от *Windtech Consultant* във ветрови тунел. Използван е модел в мащаб 1:200 на две офис сгради, като едната се явява преграда за другата сграда. На фиг. 19 е показан общият вид на теста във ветрови тунел. Сравнение на резултатите, получени чрез CFD, и тези от теста е показано на фиг. 20.



Фиг. 19. Общ изглед от теста във ветрови тунел www.windtech.com.au [19]



Фиг. 20. Сравнение на резултатите, получени чрез числова симулация посредством CFD и тест във ветрови тунел [19]

Направена е числова симулация на геометрията на сградата и ефектите от вятър чрез методите на CFD. Представено е сравнение на резултати, което показва добро съвпадение, но и известни разлики, които са коментирани от авторите.

Анализът на резултатите, които са докладвани в [19], води до следните заключения:

- Използването на числови симулации чрез методите на CFD е мощно средство, което позволява да се получи картина на наляганията по различните повърхности на конструкции или сгради и съоръжения със сложна форма при различни посоки на действие на вятъра;
- Следва да се има предвид, че колкото по-сложна става формата на обекта на изследване, толкова рискът от отклоняване на резултатите в една или друга посока се увеличава.

Във връзка с гореизложеното, в настоящото изследване е направен подробен анализ чрез компютърни симулации. Полезно е да изтъкнем, че резултатите от CFD винаги следва да бъдат калибрирани чрез резултати от ветрови тунел.

4. Заключение

Във връзка с определянето на ветровото въздействие върху покривната козирка на стадион „Христо Ботев“ в град Пловдив е направен кратък литературен обзор на източници, които третираат подобна тематика. На базата на този обзор могат да се направят няколко съществени извода. На първо място, при подобни съоръжения, които като цяло не са подробно разгледани в нормативните източници и са с индивидуална форма и размери, най-удачно и целесъобразно е определянето на ветровото въздействие да стане въз основа на провеждането на изпитване във ветрови тунел. При това се получават резултати, които се основават на реалистично моделиране както на самия разглеждан обект, така и на околните сгради, съоръжения и други теренни особености, които влияят на големината и характера на ветровото въздействие върху козирките на даден стадион. Възможно е също така да се направи детайлно изследване чрез МКЕ и, по-специално, Computational Fluid Dynamics (CFD). Този инструмент също е мощно средство за получаване на подробни и реалистични резултати за натоварването от вятър. Те са най-достовърни обаче когато има основа от изследване във ветрови тунел, чрез който да бъдат валидирани, след което численото изследване може да послужи за изследване на различни параметри и допълване на резултатите. Определянето на натоварването от вятър е възможно да се извърши и на базата на норми и стандарти за проектиране, но тогава обикновено се налага да се прибегне до апроксимация с други съоръжения и конструктивни форми. Направеният обзор, заедно с другите две статии, посветени на разглеждания въпрос [21, 22], могат да бъдат полезна основа за българските строителни инженери, на които в бъдеще ще се наложи да определят ветровото въздействие върху козирки на трибуни на модерни стадиони и други спортни съоръжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ordinance № 3: 2004, On the basic provisions for the design of structures and for the loads and actions on them.

2. BDS EN 1991-1-4:2008, Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions.
3. AS 1170.2:1989 – Minimum design loads on structures – Wind loads.
4. AS/NZS 1170.2:2002 – Structural design actions. Part 2: Wind actions.
5. *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).
6. *Morley, S & Holmes, J.* Wind Loading of Large Roofs on Sports Facilities. 18th Australasian Wind Engineering Society Workshop, McLaren Vale, Australia, (2016).
7. *Holmes, J.* Wind Loading of Structures. 1st Ed., New York, USA, (2001).
8. *Davenport, A. & Surry, D.* The Pressures on Low-rise Structures in Turbulent Wind. Canadian Structural Engineering Conference, Toronto, Canada, (1974).
9. *Lam, K. M., To, A. P.* Generation of Wind Loads on a Horizontal Grandstand Roof of Larde Aspect Ratio. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 54/55: pp. 345-357, (1995).
10. *Gallimulin et al.* Investigation on the Influence of Wind Flow Over the Grandstand with a Canopy. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, (2020).
11. *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.
12. *A. Bitzer, M. Bulsemeier, J. Wacker.* Stadium in Varna, Bulgaria: Determination of quasi-steady and dynamic wind loads for the structural design of the stadium roof and the corresponding cladding by means of wind tunnel tests. Wacker Ingenieure, (2008).
13. *S. Morley, J. D. Holmes.* Wind loading of large roofs on sport facilities. 18th Australian Wind Engineering Society Worksop, (2016).
14. *P. Biagini, Cl. Borri, L. Facchini.* Wind response of large roofs of stadiums and arena. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 95, Issues 9–11, pp. 871-887, (2007).
15. *Grz. Bosak.* Wind tunnel tests of the effects of aerodynamic interference on a stadium roof. Technical Transactions, Civil Engineering, (2014).
16. *C. W. Letchford, G. P. Killen.* Equivalent static wind loads for cantilevered grandstand roofs. Engineering Structures 24, pp. 207-217, (2002).
17. *G. P. Killen, C. W. Letchford.* A parametric study of wind loads on grandstand roofs. Engineering Structures 23, pp. 725-735, (2001).
18. *Bartoli, P. et al.* Wind-Tunnel Tests and Design Loads of the Roof of the New Karaiskaki Olympic Stadium in Piraeus. IASS Symposium, Montpellier, (2004).
19. Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2015: Autodesk Robot Structural Analysis Professional wind simulator validation brief, (2015).
20. *Georgiev, Tzv., Raykov, St., Dinev, D., Petrov, B.* Expert assessment of the wind load on the steel canopies of Hristo Botev Stadium in Plovdiv. UACEG-CNIP, 2021.

21. *Georgiev, Tzv., Raykov, St., Dinev, D.* Comparison of Wind Load for Grandstand Cantilever Roofs Determined According to Different Design Codes. // ANNUAL of the University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, 2021, (in print).

22. *D. Dinev, St. Raykov, Tzv. Georgiev.* CFD estimation of wind loading on a stadium roof. // ANNUAL of the University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, 2021, (in print).

WIND LOADING ON STADIUM ROOFS: AN OVERVIEW

St. Raykov¹, Tzv. Georgiev², D. Dinev³

Keywords: *wind actions, roofs on stadium grandstands, wind tunnel, stadiums*

ABSTRACT

Modern sports stadiums are facilities with wide range of architectural forms and structural systems, designed to comply with several different requirements. In recent years, one of the most important demands is to ensure the comfort of the audience, which in turn leads to the need to design large canopy roofs over the grandstands.

In most cases the wind action is the leading load for the roof structure of large sports stadiums. The wind load for such structures is characterized with several important differences compared to the case of smaller and lower-rised buildings. Generally, the normative references do not give relevant and specific information for the wind load on stadium roofs. A different approach, which includes wind tunnel testing, computational fluid dynamics and other methods is then considered in such cases.

The paper presents a short literature review of both national and worldwide experience in the determination of wind actions on large stadium roofs. Several examples of design approaches are presented and analysed. On that basis some general conclusions and recommendations are given, which could be useful in future projects.

¹ 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

² Tzv. Georgiev, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. "Steel, Timber and Plastic Structures", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: cvgeorgiev_fce@uacg.bg

³ Dobromir Dinev, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. "Structural Mechanics", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: ddinev_fce@uacg.bg