



DOI: [10.71167/uaceg.2026.590202](https://doi.org/10.71167/uaceg.2026.590202)

Получена: 20.10.2025 г.

Приета: 12.03.2026 г.

ОСОБЕНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРАНЕ ЗА СЕИЗМИЧНИ ВЪЗДЕЙСТВИЯ НА ХИБРИДНИ КОНСТРУКЦИИ СЪС СМЯНА НА КОНСТРУКТИВНАТА СИСТЕМА ПО ВИСОЧИНА

Ст. Мандев¹

Ключови думи: комбиниране на конструктивни системи по височина, хибридни конструкции, сеизмично реагиране, динамично поведение, Еврокод 8

РЕЗЮМЕ

Съвременната архитектура и сградостроителството често налагат на инженерите прилагането на нетрадиционни конструктивни решения, особено при сгради със смесено функционално предназначение, спортни зали или в условията на реконструкция и надстрояване на съществуващи строежи. Подходящо решение при изброените случаи е смяна на конструктивната система и конструктивния материал по височина, като горните етажи се изграждат от по-лек материал, какъвто е стоманата. В техническата литература комбинирането на конструктивни системи по височина се нарича „хибридни конструкции“. От друга страна, стандартите за проектиране в сеизмични райони, в това число Еврокод 8, слабо засягат особеностите на този вид конструкции и не успяват да срещнат нарастващите нужди на инженерната практика.

В тази статия се предлага анализ на видовете строежи, при които се прилага смяна на конструктивната система и материала по височина, както и обзор на залежалите указания за сеизмично проектиране в редица водещи световни стандарти. Успоредно с това е направен кратък преглед и обзор на научни публикации, засягащи динамичното поведение и сеизмичното реагиране на хибридните конструкции. Споделени са някои изводи на автора за нерешени въпроси и насоки за бъдещи изследвания по темата.

¹ Стефан Мандев, инж., докторант, кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: mandev_fce@uacg.bg

1. Въведение

В последните десетилетия се увеличава борят на строежите, при които се прилага смяна на конструктивната система и конструктивния материал по височина, съчетавайки различна функционалност, ефективност и икономия на материал. Различните архитектурни изисквания за предназначението на пространствата, както и различното натоварване по етажите, са от често срещаните причини за появата на този вид конструкции. Като цяло, диапазонът на тези решения е доста широк, но може да бъде ограничен до няколко вида архитектурни идеи, прераснали в конструктивни решения. Най-често срещаният случай е комбинация от няколко основни етажа стоманобетонна конструкция, която притежава голяма коравина и може да издържи голямо вертикално и хоризонтално натоварване, и няколко етажа конструкция от по-лек конструктивен материал, например стомана или дърво. Това може да са търговски обекти, шоуруми или големи паркинги, при които се изискват по-големи подпорни разстояния, и служат за основа (подиум) на офис или жилищни площи. Този подход комбинира редица предимства: икономия на материал, оптимизиране на строителните разходи и срокове, по-голяма свобода при архитектурното планиране и приспособяване към различни функционални изисквания, свързани с предназначението на сградите и съоръженията. Подобни решения се срещат и при стари конструкции със зидани горни етажи върху стоманобетонни долни или при съвременните високи сгради с масивен стоманобетонен подиум и по-лека стоманена или дървена надстройка. С нарастващата урбанизация и недостиг на свободни площи в големите градове, поради застрояване, надстрояването на съществуващи сгради се оказва доста иновативно решение, разбира се, ако конструкцията го позволява. Класическото решение за метална покривна конструкция при сгради и съоръжения с големи отвори също не бива да се пропуска. Търсенето на по-лека и създаваща големи свободни пространства конструкция довежда до прилагането на стоманата като основен конструктивен материал за покривни конструкции при сгради с големи отвори (в т.ч. стадиони, спортни зали, хангари, експозиционни зали и др.). Поради голямото подпорно разстояние, което трябва да се премости, покривните конструкции често се получават с голяма конструктивна височина, която може да бъде съизмерима с цели етажи от долното строене.

В англоезичната литература конструкции, при които имаме наличие и съвместна работа на две конструктивни системи и/или два конструктивни материала, най-често се наричат „смесени или хибридни стоманобетонни-стоманени конструкции“ [16, 17, 23]. Други по-рядко срещани термини са “vertical combination of structural framing systems” [5, 26] и “podium structures” [27, 31]. Макар и част от наименованията да са близки по значение, смесени или също дуални (букв. превод от английски език – mixed/dual) се отнасят по-скоро за случаите на съвместна работа в едно и също хоризонтално направление, когато срязващата сила в основата се разпределя между две системи. Това е и официално използваната терминология в стандартите за сеизмично проектиране на сгради в различните части на света, както и в инженерната практика. В същото време „хибридни“ обхваща по-широк спектър от случаи на съвместна работа на две конструктивни системи и/или материали, независимо от разположението им и посоката на натоварване.

Поради различния подход, нужен за изследването на съвместната работа по височина на различни конструктивни системи и/или материали, се налага добавянето на пояснение, за да се подчертае комбинирането им във вертикално направление. Настоящата статия предлага въвеждането на термина „Вертикално Хибридни Конструкции“ (ВХК) или за по-кратко „Хибридни Конструкции“ (ХК) като под двете наименования се разбира едно и също. По този начин се отразява най-точно фокусът на настоящото изследване, без да създава дълги и трудни за запомняне словосъчетания.

Не бива и да се пропуска ролята на свързващия елемент при ВХК, който изпълнява важните функции на предаване на усилията и запазване на интегритета на цялата конструкция. Тази роля обикновено се изпълнява от етажна плоча, а терминът, използван в англоезичната литература е *“transfer level”* [21, 22]. Етажното ниво не е просто мислена линия, а представлява етажна подова конструкция с физически размери и конструктивна функция да разпределя различни разрезни усилия към вертикалните носещи елементи. Там в действителност се случва преходът между двете конструктивни подсистеми и затова свързващият елемент е от критично значение за цялостното поведение на този тип конструкции. За кратко тази зона на преход ще бъде наричана *„преходно ниво“* или *„преходна подова конструкция“*.

Целта на настоящата статия е да се разгледат в дълбочина ВХК, да се анализират предимствата и недостатъците на това инженерно решение. За тази цел ще бъде направен преглед на указанията и правилата, дадени в стандартите за проектиране в сеизмични райони, както и ще бъдат представени примери от практиката, които илюстрират успешното приложение на комбинирането на конструктивни системи по височина. Като допълнение статията засяга няколко аспекта около взаимодействието между конструктивни системи от различен конструктивен материал, поведението им при сеизмични въздействия, и задава важни въпроси, които следва да бъдат обект на бъдещи изследвания в областта.

2. Конструктивни системи и приложението им

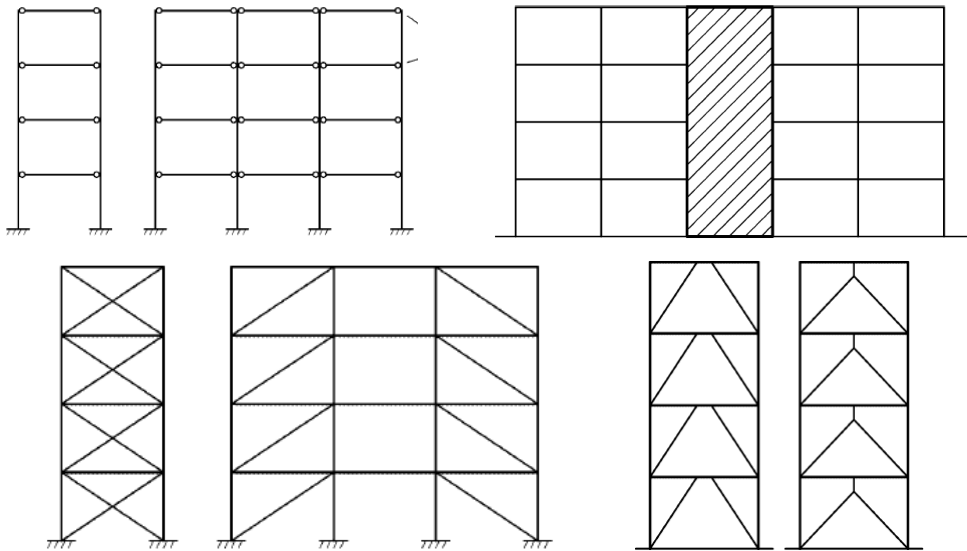
2.1. Конструктивни системи за поемане на сеизмични въздействия

Конструктивната система на една сграда определя начина, по който се поемат и предават основните вертикални и хоризонтални натоварвания от собственото тегло, полезен товар, сняг, вятър, земетръс и др. Сред основните критерии за избор на конструктивна система са изискванията за поведение при сеизмични въздействия, степента на сеизмична опасност, подборът на материали, архитектурните изисквания за функционалност на сградата и др. Основните системи за осигуряване на сградите и съоръженията в сеизмични райони, които се прилагат в инженерната практика и са застъпени в Еврокод 8 [1] са:

- 1) *Рамка с корави възли* – ансамбъл от греди и колони, кораво свързани помежду си, който поема хоризонталните товари чрез работа на елементите на огъване. Принципът за *„силни колони – слаби греди“* гарантира образуването на пластични стави в гредите близо до рамковия възел, където се случва разсейването на сеизмична енергия чрез циклично пластифициране при огъване.
- 2) *Дуктилна стенна система* – конструктивна система, при която вертикалните и хоризонталните товари се поемат основно от вертикални конструктивни стени, свързани или самостоятелни. Съответно дисипирането на сеизмична енергия се извършва чрез пластифициране при огъване в долната част на стените непосредствено над сутерена, като се пренебрегва приносът на колоните и гредите.
- 3) *Рамка с централно включени диагонали* – скелетна система с диагонали, центрирани в рамковия възел, която дисипира сеизмична енергия чрез циклична

работа на опън/натиск на диагоналите. Вертикалните товари се поемат от коравия рамков контур, което осигурява принципа на работа на този вид системи „силен контур – слаби диагонали“.

- 4) *Рамка с нецентрично включени диагонали* – рамкова система с диагонали, нецентрирани в етажната греда, при която диагоналите работят на опън/натиск, а дисипирането на сеизмична енергия се случва в зони от гредите чрез циклично пластифициране при огъване и срязване. Вертикалните товари отново се поемат от рамковия контур.
- 5) *Смесена (дуална) конструктивна система* – комбинация от две различни по поведение конструктивни системи, които работят в успоредни равнини и си поделят поемането на хоризонтални сили. Всяка система поема не повече от 60 – 65 % от срязващата сила в основата, а под комбинирание обикновено се разбира в хоризонтално направление, а не по височина.
- 6) *Обърнато махало* – система, при която над 50 % от масата е съсредоточена в горната част на конструкцията, а дисипирането на енергия се осъществява в основата на колоните.



Фиг. 1. Основни видове конструктивни системи за сеизмични въздействия

Стенните конструктивни системи и рамките с центрично включени диагонали притежават голяма хоризонтална коравина. Затова са подходящи за ниски строежи и такива чувствителни към големи премествания, въпреки че възпрепятстват до определена степен архитектурното планиране. От друга страна рамките с корави възли позволяват по-свободно планиране и предоставят нужната при високи строежи дуктилност, но за сметка на повишена деформативност. Основните видове конструктивни системи, които се срещат най-често в практиката, са добре изследвани от теоретична и практическа гледна точка. Белев [14] и Милев [15] описват подробно работата и поведението на различните видове конструктивни системи, както и механизмите им на разрушение. Допълнителна информация и изискванията на стандартите за проектиране [1 – 9] се срещат в редица книги и публикации като FEMA P-749, ANSI/AISC 341-22, ACI 318-19(22), ECCS Eurocode Design Manuals и др.

2.2. Примери за реализация

При средно- и високоетажните сгради е целесъобразно комбиниране на предимствата на коравите и дуктилните системи за постигане на оптимален резултат в противодействието на хоризонталните сеизмични сили и овладяването на междуетажните премествания. Това може да се осъществи чрез комбиниране в хоризонтално или вертикално направление. По-рядко срещаното комбиниране по височина се използва с цел адаптиране на сградата към различните натоварвания и функционални изисквания на отделните етажи. В инженерната практика се срещат най-различни видове хибридни конструкции, при които е на лице смесването на конструктивни системи по височина:

- 1) „Подиумни“ сгради, фиг. 2. При тях долната основна част е предназначена за помещаване на магазини, шоуруми, паркинги и др. Долната подсистема притежава голяма коравина и служи за подиум на горната подсистема, където обикновено се помещават офис или жилищни площи. Подиумните сгради са най-широко разпространение в САЩ и Канада още от втората половина на миналия век [27].



Фиг. 2. Офис сграда (вляво) и сграда на държавната администрация (вдясно) – Texas, USA

- 2) Мултифункционални етажни сгради, фиг. 3. Те се срещат често в инженерната практика и при тях се помещават както административни и офис помещения, така и заведения, тренировъчни и изложбени зали и други. Последните обикновено намират място в горните етажи и се нуждаят от по-широки пространства, осигурени от по-големи подпорни разстояния. Това налага изчистване на композицията в план и редуциране на вертикалните конструктивни елементи, което води до увеличаване на подпорното разстояние, където стоманата намира подходящо приложение.



Фиг. 3. Зала за катерене “Balkan Climbing” – София, България

- 3) Сгради с големи отвори, фиг. 4 и фиг. 5. Такива са например спортни зали, стадиони и хангари и др. В този случай е необходима покривна конструкция, която чрез ефективно използване на материала и минимални провисвания да отведе товарите до трибуните. Поради тази причина покривните конструкции се получават с голяма конструктивна височина, съизмерима с тази на долното строене, често изпълнено от стоманобетон [29]. Този вид строежи се срещат и намират приложение по цял свят.



Фиг. 4. Арена София (вляво) [29] и склад за инертни материали (вдясно) – България



Фиг. 5. Арена Шумен – България

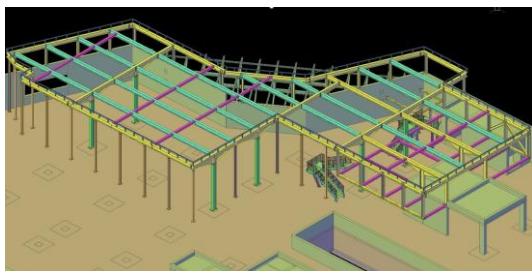
- 4) Сгради, подложени на надстрояване, фиг. 6. Поради презастрояването и все по-ограничените свободни площи в големите градове нова възможност се оказва разрастването на сградния фонд във височина. Както знаем, конструкциите могат да имат известен запас на носимоспособност или да бъдат усилены, което позволява надстрояването на съществуващи сгради с един или дори няколко етажа. В България монолитният стоманобетон доминира в сектора на строителството, а надстройките се изпълняват от по-лек конструктивен материал, което не претоварва елементите на съществуващата конструкция. Макар че обикновено този тип строежи се срещат в региони на света с ниска сеизмична опасност (Западна и Северна Европа, Северна Африка, някои части на Австралия), подобни решения могат да се срещнат и у нас. Типичен пример е надстройката на административната сграда на Интер Експо Център в град София [30], където горните 5 етажа са изпълнени със стоманен носещ скелет и

поводни плочи от олекотен бетон. Авторите на проекта са предпочели да не направят смяна на конструктивната система за поемане на сеизмичните сили. Конструкцията е реализирана изцяло със стоманобетонни стени, които започват от фундамента и достигат до последните етажи [30]. В този смисъл, в този строеж е приложено смесване на конструктивни системи за поемане на вертикален товар с цел олекотяване, но е запазена конструктивната система за поемане на хоризонтални сили – фиг. 6 (вляво).



Фиг. 6. Интер Експо Център, София, България (вляво) и 1 Triton Square, London, UK (вдясно)

- 5) Покривните надстройки са на фиг. 7. Те са често срещани в българската строителна практика, тъй като плоските покриви се явяват подходящо място за изграждане на допълнителни конструкции като мансардни надстройки, спортни съоръжения и помещения за различно технологично оборудване, което е част от сградата. Както в останалите случаи, горната конструкция се изгражда от полек конструктивен материал и тук вече, поради размерите ѝ, можем да я наречем второстепенна конструкция.



Фиг. 7. Площадка за спортни активности (вляво) и склад за минерални торове (вдясно) – България

2.3. Обобщение от практическите примери

Изложените до тук строежи, заедно с техните функционални и конструктивни решения, както и причините, довели до тези решения, може да са най-различни, но общото между тях е смяната на конструктивния материал и конструктивната система по височина на сградата. Този тип проектни решения съчетават предимствата на различни конструктивни системи, едни се справят с голямата срязващата сила в основата, докато други овладяват междуетажните премествания. Така се увеличава ефективната работа и поведението на сградата при сеизмично въздействие, а в доста случаи се стига и до редуция на

строителните разходи и сроковете за изпълнение. Налице е също и разнообразието от архитектурни възможности за обособяване на обеми с различно предназначение, по-големи свободни пространства, както и широк спектър от фасадни решения.

От друга страна смяната на конструктивна система и материал по височина поражда нерегулярност по височина, което влошава поведението на конструкцията при сеизмично въздействие. Затова следва внимателно да се подхожда към проектирането на ВХК за сеизмични въздействия.

3. Стандарти за проектиране на сгради в земетръсни райони

Вертикално хибридните конструкции са засегнати в различна степен от стандартите за проектиране на сгради и съоръжения в сеизмични райони. Еврокод [1] и стандартите на различни европейски държави [2 – 4] дават много малко информация, без дори да ги споменават директно. Засегнат е основно случаят на комбиниране в хоризонтално направление, било то едно и също или две взаимно перпендикулярни. Единственият вариант за подходящ конструктивен анализ остава чрез тълкуване на правилата и методите за анализ при случай на нерегулярни по височина конструкции.

Австралийският стандарт за определяне на въздействията от земетръс [8] за проектиране на стоманобетонни AS 3600 [10] и стоманени конструкции AS 4100 [11] също разпознават комбинирането на системи, въпреки че не се прави ясно разграничение между комбинирането във вертикално и хоризонтално направление, а този вид конструкции са наречени просто смесени системи. Малко повече информация можем да намерим в новозеландския стандарт за определяне на въздействията от земетръс [9], където са дадени няколко допълнителни правила за по-прецизно изследване и изграждане на подходящ изчислителен модел. Стандартът изисква по подходящ начин да се отрази разликата в коравините и капацитета на всяка подсистема да развива пластични деформации.

Стандартите, използвани в Северна Америка [5 – 7] (в т.ч. САЩ, Канада и Мексико), определящи натоварванията на територията на различните държави, дефинират двата случая на комбиниране на конструктивни системи, но дават минимални правила и указания относно конструктивния им анализ. Засегнат е основно случаят, когато двете подсистеми имат голяма разлика в коравините, което повече очертава случая на главна и второстепенна конструкция. Но за сметка на това тези документи са най-богати на информация и правила за проектиране на ВХК.

Много важна количествена и качествена характеристика при динамични въздействия е регулярността на сградите, особено тази по височина. Тази характеристика е силно засегната от всички стандарти за проектиране в сеизмични райони. Нерегулярните сгради имат по-сложно и трудно предвидимо поведение при сеизмични въздействия поради неравномерното разпределение на маса и коравина във височина, като особено уязвими са етажите с рязката смяна на тези параметри. Това води до засилване на ефекта на по-висшите форми на трептене, което силно ограничава използването на опростени методи за анализ и налага използването на модален анализ или други по-прецизни методи за анализ.

Други документи като индийският стандарт IS 1893-1:2016 [12] и южноафриканският SANS 10160-4:2017 [13] слабо отразяват хибридните конструкции, давайки минимални указания за проектирането им.

3.1. Европа и единен европейски стандарт

Еврокод [1] разпознава хибридни конструкции, позволявайки използването на различни конструктивни системи и коефициенти на поведение в две хоризонтални направления, както и разпределянето на хоризонталните товари между две конструктивни системи в едно и също направление като ги нарича „смесена система от две подсистеми“ или „дуална система“, фиг. 8. Същите понятия са дефинирани в немския стандарт за строежи в земетръсни райони DIN 4149:2005 [3] и в швейцарския стандарт за въздействия върху конструкциите SIA 261 [4], както и възможни комбинации от подсистеми. Не се коментира обаче дали смесването на системите по височина е позволено и какъв коефициент на поведение q следва да бъде използван. Това е упоменато единствено в глава 16 на SIA 261, където задължава използването на по-малкия коефициент на поведение q при смесени системи. Ако се съди по формулировката на смесените системи в Еврокод 8 и DIN 4149, става въпрос за комбиниране на системите в хоризонтално направление, тъй като се говори за разпределение на срязващата сила в основата.

смесена система от две подсистеми

конструктивна система, в която поемането на вертикалните товари се осигурява основно от пространствена рамка, а носимоспособността за хоризонтални товари се разпределя между рамковата система и конструктивните стени (шайбите), които са самостоятелни или свързани

Фиг. 8. Определение за смесена система съгласно БДС EN 1998-1/5.1.2

Относно регулярността на конструкциите, правилата в европейските стандарти [1 – 4] са почти идентични на тези в останалите стандарти [5 – 9] с разликата, че дават качествени, но не и подробни количествени критерии за регулярност. При нерегулярните по височина конструкции, каквито често са вертикално хибридни конструкции, следва да бъде използван модален анализ за отчитане на влиянието на по-висшите форми на трептене, а коефициентът им на поведение q да бъде намален с 20 %. Европейските стандарти и документи не засягат достатъчно случаите на комбиниране на конструктивни системи по височина и не дават достатъчно указания за използване на подходящ коефициент на поведение. Може косвено да се направи тълкуване на критериите за регулярност по височина и правилата за прилагане на методите на анализ, за да могат да се съставят правила за изчисляване на хибридни конструкции.

3.2. Австралия и Нова Зеландия

Австралийският стандарт за сеизмични въздействия върху конструкциите AS 1170.4 [8] е много близък до европейските текстове. Той дефинира същите понятия и дава аналогични правила. Разпознати са смесените или дуални системи за поемане на хоризонтални товари (понятията са дефинирани в AS 3600 [10] и AS 4100 [11]), определени са коефициенти на поведение. Дадени са и правила за използване на подходящ метод за анализ на конструкцията, които са обвързани с критериите за регулярност. Не се споменават вертикално хибридни конструкции.

От друга страна новозеландският стандарт NZS 1170.5 [9] надгражда досега споменатите термини, определения и правила като препоръчва по-задълбоченото изследване на смесените системи. Трябва да се вземе под внимание разпределението на масата и коравината, капацитетът на отделните елементи и зони да пластифицират и дисипират сеизмична енергия, както и преразпределението на усилия между отделните зони. Само така може да се установи ясен пластичен механизъм на разрушение. Това, разбира се, е непряко свързано с използването на по-сложни методи за анализ, каквато е

и следващата стъпка, препоръчана в текста на стандарта. Специално внимание е обърнато и на етажните диафрагми (преходните нива), които осигуряват интегрирането между различните системи и могат да бъдат подложени на завишени усилия, което ни подсказва за комбиниране в хоризонтално направление, а не по височина.

3.3. Северна Америка (САЩ, Канада и Мексико)

Основни правила и указания за комбиниране във вертикално направление могат да се намерят в Глава 12 на ASCE/SEI 7-22 [5], където е споменат случаят на комбиниране на конструктивни системи във вертикално направление. Точка 12.2.3.1 насочва към използването на подходящ коефициент на поведение при анализирането на всяка една от подсистемите, който зависи от отношението на коравините им. Предлага се и опростена двуетапна процедура в т. 12.2.3.2 на [5], при определени критерии, за анализирането на такъв тип конструкции. Тази процедура позволява анализирането на двете конструктивни системи с отделни модели и прехвърлянето на усилия от едната на другата [26, 27, 31]. Подобни указания ни дава и канадският стандарт NBCC [6] в раздел В, част 4, точка 4.1.8.15, ал. (6). Допълнителни разяснения относно основните клаузи, например какви коефициенти на реагиране (*response modification coefficient*) следва да се използват на различните етапи от анализа, могат да се намерят в коментарната част на двата стандарта.

Критериите за регулярност в стандартите [5, 6] са подробни и съдържат в себе си не само качествен, но и добър количествен измерител. В коментарната част към документите може дори да се намерят допълнителни пояснения, схеми, илюстриращи видовете нерегулярности, и нагледни примери. Съгласно критериите, залегнали в различните стандарти, които не се различават особено, повечето от строежите с вертикално комбиниране на конструктивни системи се класифицират като нерегулярни.

Друг важен аспект, който е слабо засегнат в стандартите [1 – 9], е взаимодействието между двете конструктивни подсистеми. Не са редки случаите, когато долната и горната част от подсистеми имат съизмерима хоризонтална коравина. В този случай хипотезата, че долната подсистема действа като корава опора на горната подсистема е строго невярна. При тези случаи се наблюдава увеличаване на ускоренията на горните етажи в резултат на динамичното взаимодействие между условно разделените горна и долна част. Ето защо посредством, подходящо моделиране, този ефект следва да бъде отчетен и оценен.

3.4. Общ анализ на стандартите за проектиране

Таблица 1. Сравнение на стандарти за проектиране в сеизмични райони

Стандарт	Комбиниране на конструктивни системи	Нерегулярност по височина	Методи за анализ	Коефициент на поведение/ Коефициент на реагиране	Изисквания за преходно ниво
EN 1998-1	В хоризонтално направление (dual systems)	Промяна на етажната коравина/маса по височина & Прекъсване на вертикални носещи елементи	Модален спектрален анализ & Нелинейни методи	Коеф. на поведение q намален с 20 %	Оразмеряване с капацитивно завишени усилия
НПСЗР	В хоризонтално направление (смесени системи)	Промяна на етажната коравина/маса по височина & Прекъсване на вертикални носещи елементи	Модален спектрален анализ & Нелинейни методи	Коеф. на реагиране завишен с 25 %, но не по-голям от 0,67 ^[7]	–

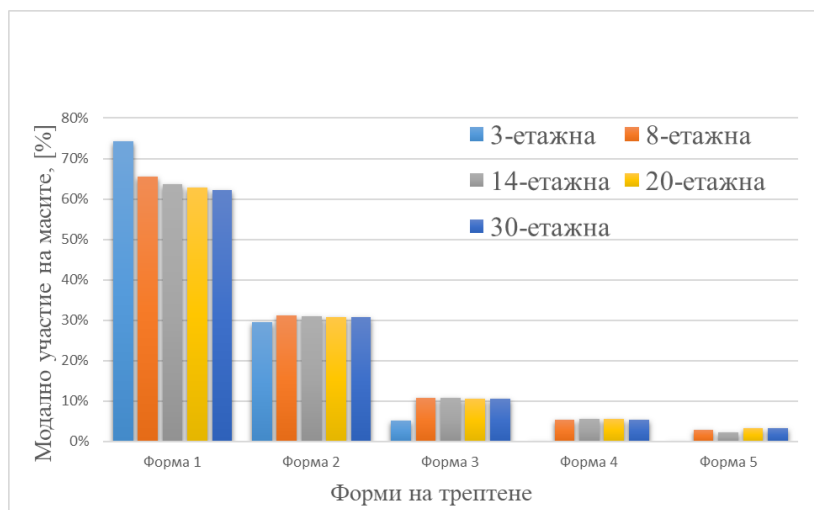
DIN 4149	В хоризонтално направление (Mischsystem)	Промяна на етажната коравина/маса по височина & Прекъсване на вертикални носещи елементи	Модален спектрален анализ	Коеф. на поведение q намален с 20 %	–
SIA 261	В хоризонтално направление (mixed system)	Промяна на етажната коравина/маса по височина	Модален спектрален анализ & Нелинейни методи	Коеф. на поведение q намален с 20 %	–
ASCE /SEI 7	В хоризонтално (dual system) и вертикално (vertical combination of SFRS ^[11]) направление	Промяна на етажната коравина/маса по височина & Прекъсване на вертикални носещи елементи	Еквивалентна статична процедура ^[4] , Модален спектрален анализ & Нелинейни методи	Всяка от подсистемите със съответните R_d, R_0 ^[8]	Оразмеряване с капацитивно завишени усилия
NBCC	В хоризонтално ^[2] и вертикално (vertical variation of R ^[3]) направление	Смяна на конструктивната система по височина	Модален спектрален анализ & Нелинейни методи	Всяка от подсистемите със съответните R_d, R_0 ^[9]	Оразмеряване с капацитивно завишени усилия
NTC-Sismo	В хоризонтално направление (sistema dual)	Промяна на етажната коравина/маса по височина & Прекъсване на вертикални носещи елементи	Модален спектрален анализ & Нелинейни методи	Коеф. на поведение Q намален с 20 %	–
AS 1170.4	В хоризонтално направление (mixed system)	Промяна на етажната коравина/маса по височина & Прекъсване на вертикални носещи елементи	Модален спектрален анализ & Нелинейни методи ^[5]	Без редукция на коеф. на дуктилен μ и конструктивен коеф. S_p ^[10]	Коректно моделиране & Оразмеряване с капацитивно завишени усилия
NZS 1170.5	В хоризонтално направление (mixed system)	Промяна на етажната коравина/маса по височина & Прекъсване на вертикални носещи елементи	Модален спектрален анализ & Нелинейни методи ^[6]	Без редукция на коеф. на дуктилен μ и конструктивен коеф. S_p ^[11]	Коректно моделиране & Оразмеряване с капацитивно завишени усилия
<p>1. Комбиниране на конструктивни системи във вертикално направление. Глава 12/12.2.3.1.</p> <p>2. Комбиниране на конструктивни системи в хоризонтално направление. Част В/Глава 4/4.1.8.9 (3).</p> <p>3. Комбиниране на конструктивни системи във вертикално направление. Част В/Глава 4/4.1.8.15 (6).</p> <p>4. Еквивалентна статична процедура може да се приложи само в ограничени случаи.</p> <p>5. Препоръчват се нелинейни методи (нелинеен статичен/динамичен анализ във времето) при нерегулярни смесени системи.</p> <p>6. Препоръчват се нелинейни методи (нелинеен статичен/динамичен анализ във времето) при нерегулярни смесени системи.</p> <p>7. При сгради с гъвкав междинен етаж, чиято хоризонтална коравина е поне 2 пъти по-малка от тази на съседните, коеф. на реагиране R се умножава с 2. Тази стойност е само за определяне на усилията в гъвкавия етаж.</p> <p>8. Големината на предаваните усилия между двете подсистеми зависи от отношението между коефициентите им на поведение.</p> <p>9. Долната подсистема трябва да бъде оразмерена за сили равни на носимоспособността на горната.</p> <p>10. Индиректно се насочва към намаляване на коефициента на дуктиленост, тъй като нерегулярността влошава локалната дуктиленост на елементите и зони от конструкцията.</p> <p>11. Индиректно се насочва към намаляване на коефициента на дуктиленост, тъй като нерегулярността влошава локалната дуктиленост на елементите и зони от конструкцията.</p>					

4. Кратък преглед на научните изследвания по темата

Простота на конструктивната система, симетрия, еднообразие, носимоспособност и коравина в две взаимноперпендикулярни направления, носимоспособност на усукване и подходящо фундиране са от водещите принципи при проектиране на една конструкция [1]. Спазването на тези концепции гарантира регулярност, която води до сравнително просто и предвидимо поведение при сеизмични въздействия. Когато една конструкция е невисока, регулярна, и масата и коравината ѝ са разпределени равномерно в план и по височина, тя реагира доминантно по първа форма на свободните трептения, която по тази причина се нарича фундаментална (основна). Това позволява с достатъчна точност да се предвиди разпределението на сеизмичните сили и да се изчислят хоризонталните етажни премествания, чрез използване само на тази основна форма на трептене. Стандартите за проектиране на сгради в земетръсни райони в т.ч. ASCE/SEI 7, NBCC, Еврокод 8, NZS 1170.5 и др., [1 – 9] предлагат опростена процедура за изчисляване на основния период на трептене и използването му при еквивалентна статична процедура за анализ на конструкцията.

4.1. Особенности при прилагане на опростен и модален анализ за ВХК

Комбинирането на два конструктивни материала с различни физико-механични свойства води до потенциално опасна преходна зона, в която могат да се натрупат големи пластични деформации и междуетажни премествания, както можем да видим в изследванията на Askouni & Papagiannopoulos [16, 17]. Горната и долната подсистема също могат да притежават различен капацитет на дисипиране на енергия, резултат от което е нерегулярна конструкция, чието поведение е по-трудно предвидимо посредством анализ.



Фиг. 9. Сравнение на приноса на формите на трептене към модалното участие на масите при многоетажни сгради

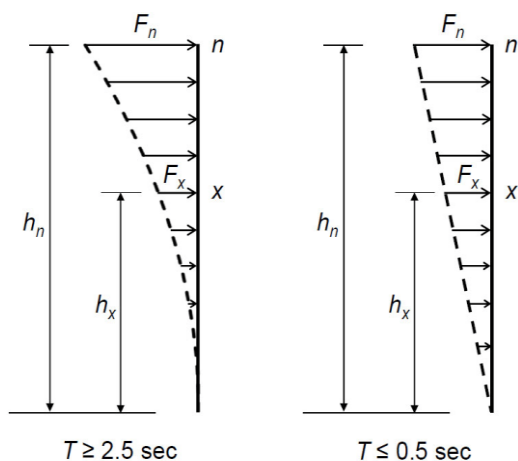
Както става ясно, вертикално хибридни конструкции почти винаги са нерегулярни конструкции по височина, а когато е налична и значителна разлика в масите и коравините

на двете съставляващи ги подсистеми, може да се окаже, че няма доминираща форма на трептене, която да активира по-голямата част от масата. Общото сеизмично реагиране е резултат от суперпонирането на ефектите от няколко форми на трептене. От друга страна, при средно- и високоетажни сгради, каквито често са изложените по-горе примери за реализация, сеизмичното поведение не винаги може да бъде определено като се вземе под внимание само първия период на трептене. Графиката на фиг. 9 е създадена на базата на изследване на сгради с различна етажност [19] и затвърждава заключенията на други изследователи по темата [18, 20, 24, 25]. Може да се проследи как с увеличаване на етажността, приносът на първата форма на трептене може да намалее до 60 %, а този на следващите форми да достигне 30 – 40 %.

Известен факт е [20], че по-висшите форми на трептене имат по-къс период на трептене и предизвикват по-малки премествания, но генерират по-големи ускорения по нивата на масите. Тези форми могат да имат голямо локално влияние върху определени зони или етажи и най-често са от особена важност за преходното ниво между двете подконструкции.

Поради изброените по-горе причини, прилагането на еквивалентна статична процедура се ограничава, не само от регулярността на конструкцията, но и от големината на първия период, с цел предотвратяване на голяма грешка при неотчитането на висшите форми на трептене. Критерий, ограничаващ тези възможни проблеми, е залегнал и в прилагането на метода на хоризонталните сили в Еврокод 8 [1]. През годините приносът на висшите форми е бил обект на изследвания в областта на сеизмичното инженерство, а още пред 50-те години на 20-и век R. W. Clough [20] подчертават нуждата от въвеждане на мерки, отчитащи ефектите, причинени от висши форми на трептене. Това от своя страна води до редица изследвания в края на миналия век сред канадските и американските инженери [18, 19, 25] с цел подобряване на вече установените в стандартите опростени процедури:

- 1) Срязващата сила в основата при дългопериодни конструкции, получена на база първия период на трептене, може да се окаже по-малка от реалната ѝ стойност. Стъпвайки върху изследванията на Humar, Rahgozar, Mahgoub [18, 25] и други канадски изследователи, NBCC [6] въвежда допълнителен коефициент (M_v), отчитащ висшите форми на трептене, който завишава срязващата сила в основата.
- 2) Висшите форми на трептене се отразяват и върху разпределението на хоризонталните сеизмични сили по височина на сградата. Триъгълното разпределение по линеен закон подценява хоризонталните сили на горните и особено на последния етаж, както отбелязват Lopez & Cruz [15]. Въведена е допълнителна хоризонтална сила (F_{top}) [6, 9] на последния етаж, която е обвързана с големината на фундаменталния период.
- 3) ASCE 7 [5] подобрява формулата за разпределение на сеизмичните сили по височина на конструкцията, като така отчита приноса на висшите форми. С увеличаване на периода, законът за разпределение преминава от линеен към параболичен. По този начин се вземат под внимание по-големите ускорения, резултат от висшите форми и в резултат на тях по-големите сеизмични сили. Разликата в разпределението на силите е илюстрирана на фиг. 10.



Фиг. 10. Разпределение на хоризонталните сеизмични сили по височина съгласно ASCE 7

4.2. Взаимодействие между подсистемите при ВХК

При вертикално смесени конструкции преходното ниво между двете конструктивни системи е критичната зона, която играе важна роля за осигуряване на ясен път за предаване на вътрешните сили и интегритета на конструкцията като цяло. Типичен такъв пример са поддъмните конструкции, при които тази функция се изпълнява от дебела етажна плоча, играеща едновременно ролята на подова диафрагма и преходна зона между двете подсистеми. Освен разпределяне на натоварването между вертикалните елементи, преходното ниво трябва да отведе хоризонталните сили от горната към долната подсистема. Както отбелязват El-Mahdy [21] и Abdelbasset [22], доброто поведение на конструкция от този тип при сеизмични въздействия често зависи от способността на преходното ниво да изпълнява тези две ключови функции.

В зависимост от разпределението на масата, коравината и геометрията по височина, разрезните усилия преминаващи през преходното ниво могат да бъдат различни. Съгласно изискванията на стандартите и добрата инженерна практика, етажните диафрагми трябва да реагират еластично при сеизмичното въздействие. Затова те се проектират с капацитивно коригирани усилия от земетръс. При хибридните конструкции обаче е установена повишена опасност от изключително големи сеизмични усилия в етажната диафрагма, свързваща двете подсистеми. За това NZS 1170.5 [9] предупреждава, но без да влиза в конкретика на какво допълнително напрегнато и деформирано състояние могат да бъдат подложени етажните диафрагми. От друга страна, El-Mahdy и Abdelbasset [21, 22], на базата на изследвания, разделят товарите и усилията, предизвикани от тях на следните видове:

- 1) Хоризонтални срязващи сили от горната подсистема, които най-често във вид на концентрирана сила, трябва да преминат в долната подсистема.
- 2) Допълнителни осови сили във вертикалните елементи на долната подсистема в следствие на промяна на геометрията и разпределението на вертикалните носещи елементи (Случай на стъстени вертикални елементи в горната подсистема, които се насаждат в греди от преходното ниво).
- 3) Усукващи моменти, породени от ексцентрицитети между центровете на маса и коравина под и над преходното ниво.

- 4) Породените от хоризонталните сили на горната част на конструкцията преобръщащи моменти, които са най-големи в преходното ниво, не могат да преминат плавно в долната част заради разлика в коравините между подсистемите. Това поражда големи огъващи моменти и в елементите на преходното ниво (плоча, греди или ферма).

Рязката смяна на коравината по височина, породена от различния конструктивен материал, конструктивна система или промяна на геометрията на вертикалните елементи, често води до появата на слаб етаж в зоната непосредствено над преходното ниво. Заедно с вече споменатия принос на висшите форми на трептене, при нерегулярни по височина конструкции може да се очаква завишаване на сеизмичните инерционни сили, действащи върху частта от конструкцията над преходното ниво. Наблюдават се локални максимуми на хоризонталните етажни сили или относителните междуетажни премествания [16, 17, 21 – 23, 28], което може да бъде причина за развиване на нежелани форми на разрушение, често недуктилни, в елементите от етажното преходно ниво. Това води до увеличаване на срязващата сила в основата на горната подсистема, а нейна основа се явява точно преходното ниво. Така преходната етажна конструкция трябва да притежава по-голяма локална дуктилност и необходим запас на носимоспособност, за да предаде усилия на долната подсистема. Подобен ефект на концентриране на усилия и премествания, който води до появата на слаб етаж, е наблюдаван при някои силни земетресения (напр. Мексико Сити 1985 и Кобе 1995) и може да се забележи също при резултатите от изследванията на Askouni и Papagiannopoulos [16, 17], макар там голяма роля да играе различната етажна височина на двете подсистеми.

Преходното ниво може да бъде най-чувствителната част от ВХК. За да се оцени по подходящ начин дуктилният капацитет на този вид конструкции и да се избегнат тези нежелани механизми на разрушение, следва да се използват по-прецизни и задълбочени методи на анализ, които препоръчват някои стандарти за проектиране [1, 5, 6, 9] и са използвани от някои автори [16, 17, 21 – 23].

5. Заключение

Вертикално смесените конструкции предлагат редица предимства в строителството на жилищни и обществени сгради и така намират все по-широко приложение в инженерната практика. Зад себе си обаче те крият редица въпросителни относно поведението им при сеизмични въздействия. Големите изменения на коравина и маса по височина, както и различни физико-механични характеристики на материалите водят до създаването на нерегулярна конструкция. А когато една конструкция не покрива критериите за регулярност, тя излиза извън обхвата на приложение на еквивалентната статична процедура (прекалено дълъг първи период или малко участие на масите, активирани при първия период на трептене). Опростените процедури, колкото и задълбочено да са изследвани и подобрени през годините, имат граница на приложение. Това налага използването на по-точни методи, за да се симулира достоверно реагирането при сеизмични въздействия, както ни насочват редица документи и автори [16, 17, 21 – 23]. Някои стандарти за проектиране [5, 6, 9] дори ограничават използването на нерегулярни по височина конструкции в райони с висок сеизмичен hazard. Също така в почти всички случаи на нерегулярност по височина се намалява и коефициентът на поведение q [1 – 4] или коефициентът на реагиране [5 – 7], независимо от използвания метод за анализ.

Модалният анализ намира широко приложение в стандартите за проектиране [1 – 9] и инженерната практика. Той успява да предвиди до голяма степен поведението на една конструкция при сеизмични въздействия, отчитайки достатъчно участие на сеизмичната маса. При вертикално хибридни конструкции, обаче, се оказва, че приложението на модалния анализ също може да бъде ограничено. Разбира се, модалният анализ е достатъчно достоверен метод за изготвяне на предварителна оценка на поведението на конструкцията на идеен етап [23]. Комбинирането на конструктивни системи с различен капацитет на дисипиране на сеизмична енергия води до труднопредвидимо поведение. Необходими са по-сложни нелинейни методи за анализ [16, 17, 21 – 23], за да се оцени дуктилността на хибридни конструкции и по какъв начин тя ще образува добър глобален пластичен механизъм [5, 6, 9]. По този начин може да се определи и подходящ коефициент на поведение [21 – 23].

Също така е важно да се отбележи, че част от опростяващите предпоставки, свързани с моделирането с крайни елементи на преходното ниво, се оказват недостатъчно достоверни. Затова е важно съставянето на изчислителен модел, който да отрази по подходящ начин прехода между подсистемите [21 – 23], различните механични характеристики на двата конструктивни материала и така да симулира по достоверен начин поведението на конструкцията.

Като цяло сложното поведение на ВХК (вертикално хибридни конструкции), подложени на сеизмични въздействия, води до по-консервативни приемания и спазването на допълнителни правила, свързани с дуктилността. Стандартите за проектиране [1 – 9] често отразяват това чрез намаляване на коефициента на поведение като така на практика се елиминират голяма част от изброените вече предимства. Най-важните неизследвани проблеми, които трябва да бъдат обект на бъдещи изследвания, са намиране на подходящ метод за анализ, адекватно моделиране на конструкцията с крайни елементи, изследване на преходното ниво, както и подбиране на подходящи коефициент на поведение и коефициент на вискозно затихване.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. BDS EN 1998-1:2005, Evrokod 8: Proektirane na konstruktsiite za seizmichni vazdeystvia. Chast 1: Obshti pravila, seizmichni vazdeystvia i pravila za sgradi.
2. Naredba № RD-02-20-2 от 2012 г. за проектиране на сгради и саоразhenia в земетрасни rayoni.
3. DIN 4149:2005. Bauten in deutschen Erdbebengebieten – Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten.
4. SIA 261:2013, Actions on structures.
5. ASCE/SEI 7-22, Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures.
6. NBC:2020, National building code of Canada.
7. Norma técnica complementaria para diseño por sismo. 2017.
8. AS 1170.4:2007, Structural design actions. Part 4: Earthquake actions in Australia.
9. NZS 1170.5:2004, Structural design actions. Part 5: Earthquake actions – New Zealand.
10. AS 3600:2018, Concrete structures.
11. AS 4100:2020, Steel structures.
12. IS 1893-1:2016, Criteria for earthquake resistant design of structures. Part 1: General provisions and buildings.

13. SANS 10160-4:2017, Basis of structural design and actions for buildings and industrial structures. Part 4: Seismic actions and general requirements for buildings.
14. *Belev, B.* Design of steel structures for seismic action in accordance to Eurocode 8 (in Bulgarian), UASG, Sofia, 2012.
15. *Milev, J.* Eurocode 8 Seismic design of reinforced concrete structures Part 1: Practical guidance (in Bulgarian). KIIP RK Sofia-grad, 2012, ISBN 978-954-92274-3-11.
16. *Askouni, P. K., Papagiannopoulos, G. A.* Seismic Behavior of a Class of Mixed Reinforced Concrete-Steel Buildings Subjected to Near-Fault Motions. *Infrastructures* 2021, 6, 172.
17. *Askouni, P. K., Papagiannopoulos, G. A.* The Non-Linear Behavior of Mixed Reinforced Concrete – Steel Frames under Strong Earthquakes. *Eng. Proc.* 2023, 53, 15.
18. *Humar, J. L., Rahgozar, M. A.* Application of uniform hazard spectra in seismic design of multistorey buildings. *Canadian Journal of Civil Engineering* 2000, 27(4), 563 – 580.
19. *López, O. A., Cruz, M.* Number of modes for the seismic design of buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 1996, 25(8), 837 – 855.
20. *Clough, R. W.* On the importance of higher modes of vibration in the earthquake response of a tall building. *Bulletin of the Seismological Society of America* 1955, 45(4), 289 – 302.
21. *El-Mahdy, O., Refat, H. M., Abd El-Salam, A. M., El-Bayome, E. Z.* Towards seismic performance of tall buildings with transfer floors. *Engineering Research Journal (Shoubra)* 2022, 51(1), 56 – 72.
22. *Abdlebasset, Y. M., Sayed-Ahmed, E., Mourad, S. A.* Seismic analysis of high-rise buildings with transfer slabs: State-of-the-art review. *Electronic Journal of Structural Engineering* 2016, 16(1), 38 – 52.
23. *Maley, T. J., Sullivan, T. J., Pampanin, S.* Issues with the seismic design of mixed MRF systems. In *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon* 2012.
24. *Chopra, A. K.* Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering (4th ed.). Pearson, 2012, ISBN 9780132858038.
25. *Humar, J. M., Mahgoub, M. A.* Determination of seismic design forces by equivalent static load method. *Canadian Journal of Civil Engineering* 2003, 30(2), 287 – 307.
26. *Yuan, X., Xu, L.* An improved two-stage seismic analysis procedure for mid-rise buildings with vertical combination of cold-formed steel and concrete framing. In *Proceedings of the 23rd International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures* 2016 (Session 11, Paper 3). Missouri University of Science and Technology.
27. *McBain, M.* Evaluation of two-stage seismic analysis and design provisions for multi-story buildings. SEAONC University Research Program Spring 2023. Structural Engineers Association of Northern California.
28. *Chang, H., Cho, J., Kim, J.* Effects of vertical irregularity on transverse reinforcement spacing in reinforced concrete columns to avoid shear failure subjected to seismic behavior. *Buildings* 2025, 15(5).
29. *Tzankov, Michail., Georgiev, Tzvetan.* Steel structures of Arena “SOFIA”. In *proceedings of the 7th National conference of steel structures.* Greece 2011.
30. *Georgiev, T., Tsankov, M., Naydenov, V.* An example of an extension of an existing building using a light-weight steel superstructure. (in Bulgarian) // *Annual of UACEG*, 2005 – 2006, 48 (7a):157 – 166.
31. *Allen, M., Chung, N., Tran, A., Zepeda, D.* Two stage analysis: Implementation challenges. *Structures Congress* 2013. Pittsburgh 2013. Structural Engineering Institute of ASCE.

SPECIFICITIES IN SEISMIC DESIGN OF HYBRID STRUCTURES WITH VERTICAL COMBINATION OF SEISMIC FORCE RESISTING SYSTEMS

S. Mandev¹

Keywords: vertical combination of seismic force resisting systems, hybrid structures, seismic design, dynamic behavior, Eurocode 8

ABSTRACT

Modern architectural design and building practice often require engineers to adopt unconventional structural solutions, particularly in mixed-use buildings, large-span sports facilities, and projects involving the retrofit or vertical extension of existing buildings. A suitable solution in such cases is the change of the structural system and material along the height of the building, with the upper floors constructed of a lighter material, such as steel. In the engineering literature, the vertical combination of structural systems along the height is referred to as “hybrid structures”. However, current seismic design provisions, including Eurocode 8, give limited attention to the specific characteristics of such systems, leaving a gap between code provisions and the demands of engineering practice.

This paper presents an analysis of the types of buildings in which a change of structural system and material along the height is applied, as well as a review of the seismic design provisions found in a number of leading international standards. In parallel, a brief overview of scientific publications dealing with the dynamic behavior and seismic response of hybrid structures is conducted. The discussion highlights unresolved issues and identifies directions for future investigation in the field of seismic design of hybrid systems.

¹ Stefan Mandev, Eng., PhD student, Dept. “Steel, Timber and Plastic Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: mandev_fce@uacg.bg