

ЛИНИЯ НА НАТИСК И ЕЛАСТИЧНО РАВНОВЕСИЕ ПРИ ЗИДАНИ АРКИ

доц. д-р Нели Димитрова Тризлова

Варненски свободен университет „Черноризец Храбър“ – Варна

Абстракт: Статията изследва ролята на геометричната конфигурация като основен фактор за устойчивостта на масивните аркови конструкции. На основата на историко-теоретичен преглед на развитието на аналитичните методи и последващ параметричен анализ се оценява влиянието на основните съотношения стрела/отвор (f/L) и дебелина/отвор (t/L) върху положението на линията на натиск. Резултатите показват, че устойчивостта на арката зависи пряко от геометрично допустимото разположение на вътрешния натисков поток в рамките на ефективното напречно сечение. Анализът потвърждава, че геометрията представлява ключов критерий за носимоспособността и граничното поведение на зиданите аркови системи.

Ключови думи: аркови конструкции; линия на натиск; обърната верига; гранично равновесие; графоаналитичен метод; теория на еластичността; метод на силите; геометрична устойчивост; строителна механика; зидани конструкции

LINE OF THRUST AND ELASTIC EQUILIBRIUM IN MASONRY ARCHES

Assoc. Prof. Dr. Neli Dimitrova Trizlova

Varna Free University “Chernorizets Hrabar” – Varna

Abstract: This paper investigates the role of geometric configuration as the primary factor governing the stability of massive masonry arch structures. Based on a historical and theoretical review of the development of analytical methods, followed by a parametric analysis, the influence of the main geometric ratios—rise-to-span (f/L) and thickness-to-span (t/L)—on the position of the line of thrust is evaluated. The results demonstrate that the stability of the arch directly depends on the geometrically admissible position of the internal compressive force flow within the effective cross-section. The analysis confirms that geometry represents a key criterion for the load-bearing capacity and limit-state behavior of masonry arch systems.

Keywords: arched structures; line of thrust; inverted chain; limit equilibrium; graphical-analytical method; theory of elasticity; force method; geometric stability; structural mechanics; masonry structures

1. ВЪВЕДЕНИЕ

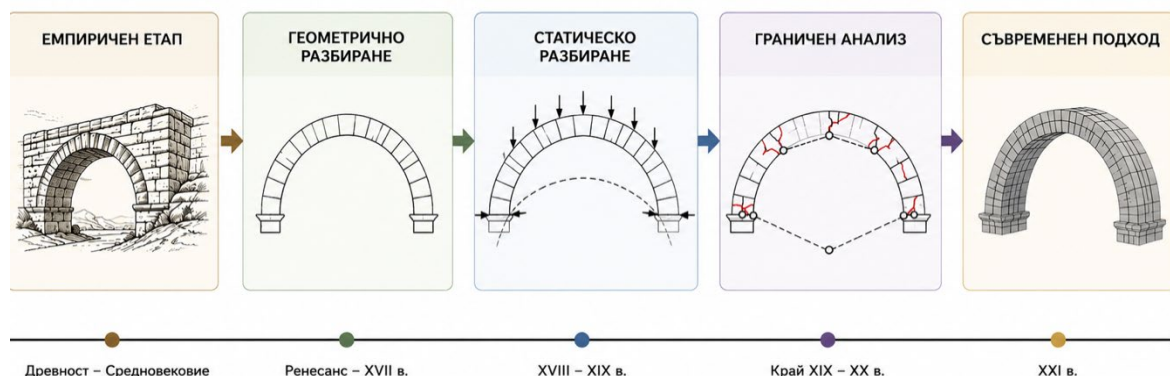
Проектирането и изграждането на сводови, аркови и куполни конструктивни системи представлява един от най-значимите етапи в развитието на строителната наука и архитектурната форма. В продължение на хилядолетия тези структури са били единственото инженерно решение за преодоляване на големи подпорни разстояния чрез използването на материали с висока якост на натиск и пренебрежимо малка якост на опън, каквито са естественият камък и печената тухла. Днес голяма част от тези съоръжения съставляват ядрото на световното архитектурно-историческо наследство, което поставя пред съвременния инженер сложната задача по оценка на тяхната носеща способност, автентичност и дълготрайна експлоатационна сигурност.

Еволюцията на научната мисъл в областта на строителната механика по отношение на сводовете извървява дълъг път — от чисто геометричните и емпирични правила на старите майстори, през фундаменталните математически формулировки на механиката на континуума през XVIII и XIX век, до съвременните кинематични теореми на пластичността. Изследването на този еволюционен процес позволява да се проследи как преходът от статически определими към сложни статически неопределими системи е решен по аналитичен път чрез въвеждането на понятия като „линия на натиск“, „ядро на сечението“ и „пасивни шарнири“.

Настоящата работа си поставя за цел да извърши систематизиран историко-теоретичен и критичен преглед на основните аналитични подходи за изследване на аркови конструкции. Чрез проследяване на методологическата еволюция — от емпиричните геометрични правила на старите строители, през развитието на класическата теория на еластичността, до аналитичното формулиране на линията на натиск — изследването цели да подчертае фундаменталното значение на класическото аналитично мислене за разбирането на устойчивостта на сводовите системи и неговата приемственост със съвременните нормативни изисквания (фиг.1).

Настоящото изследване е организирано в три взаимно свързани части, които изграждат последователна научна рамка за анализ на механичното поведение на арковите конструкции. Първата част проследява историческото развитие на арковите системи и еволюцията на теоретичните представи за тяхната устойчивост и носимоспособност. Втората част анализира процесите на декомпресия, локално напукване и вътрешно преразпределение на усилията при нарушаване на първоначалното равновесие. Третата част разглежда крайните гранични състояния, характеризиращи се със загуба на контакт между отделните зидани блокове и формиране

на механизъм на разрушение. По този начин трите части формират единна методологична линия за оценка на устойчивостта, еволюцията на повредите и граничната носимоспособност на зиданите аркови конструкции.



Фиг. 1. Концептуална схема на еволюцията на представите за механичната устойчивост на арковите конструкции.

В първата част се разглежда еластичният стадий на работа, при който линията на натиск остава в рамките на допустимото ядро на сечението. Във втората част се анализира началото на декомпресията и формирането на първите пукнатини като естествен адаптационен механизъм. В третата част се изследва граничното състояние, при което загубата на контакт между отделните блокове води до образуване на механизъм и потенциална загуба на устойчивост.

2. РАНЕН ПЕРИОД: ГЕОМЕТРИЧНИ И ЕМПИРИЧНИ ПОДХОДИ

Преди раждането на класическата математическа физика и аналитичната механика през XVII и XVIII век, изграждането на монументални сводови и куполни конструкции се е базирало изцяло на емпирични правила, пропорции и геометрични канони. Противно на съвременното разбиране за оразмеряване, което се основава на изчисляване на напреженията и сравняването им с якостните характеристики на материала, античните и средновековните строители са разглеждали стабилността като функция единствено на геометрията и формата. Тази концепция впоследствие се доказва като механично обоснована от модерната теория на пластичността: за конструкции от суха или слабо свързана зидария, мащабът и формата определят устойчивостта, тъй като реалните напрежения на натиск в тях рядко надвишават 10-15% от разрушаващата якост на камъка.

Геометрични правила за пропорциониране

Първите писмени опити за систематизиране на тези правила откриваме в трактатите на ренесансовите теоретици. Леон Батиста Алберти (1404–1472) в своя труд "De re aedificatoria" предлага конкретни пропорции за дебелината на сводовете във функция от техния светъл отвор. За полуциркулярен (полукръгъл) свод Алберти дефинира, че дебелината на сводовите камъни (ключовия блок) трябва да бъде не по-малка от $1/12$ от радиуса на дъгата.

За правилното разбиране на механичното поведение на арковите конструкции е необходимо първо да бъдат разграничени основните геометрични и конструктивни елементи на арката (фиг.2). Всеки от тези елементи има специфична роля при пренасянето на вътрешните усилия и формирането на линията на натиск.

Арката представлява една от най-древните и ефективни конструктивни системи, изградена от отделни клиновидни блокове, които работят основно на натиск. Нейната устойчивост се осигурява чрез правилното взаимодействие между отделните геометрични и конструктивни елементи, които формират цялостната носеща система.

Основният носещ контур на арката се изгражда от **клиновидни блокове** (вусоари), подредени радиално така, че да предават натоварванията към опорите чрез натисков поток. Формата на тези блокове е от съществено значение за правилното преразпределение на вътрешните усилия.

В най-високата точка на арката се намира **ключовият камък**, който изпълнява заключваща функция и осигурява геометричното затваряне на системата. Поставянето му завършва конструктивния цикъл и позволява прехвърлянето на натоварванията към останалите елементи.

Вътрешната крива повърхност на арката се нарича **интрадос**. Тя определя **светлия отвор** и служи като основна геометрична референтна линия за определяне на стрелата и пролетта. Външната повърхност се означава като **екстрадос** и определя общата външна геометрия и масивността на свода.

Преходът между опорните елементи и арковия контур се осъществява чрез импостните блокове (**пролетни камъни**), които представляват началната точка на арката и играят важна роля при концентрирането и предаването на хоризонталния разпор.

Под арковия свод са разположени **пиластрите** или устоите, които поемат както вертикалните натоварвания, така и хоризонталните компоненти на разпора. Тяхната геометрия и масивност са критични за общата устойчивост на конструкцията.

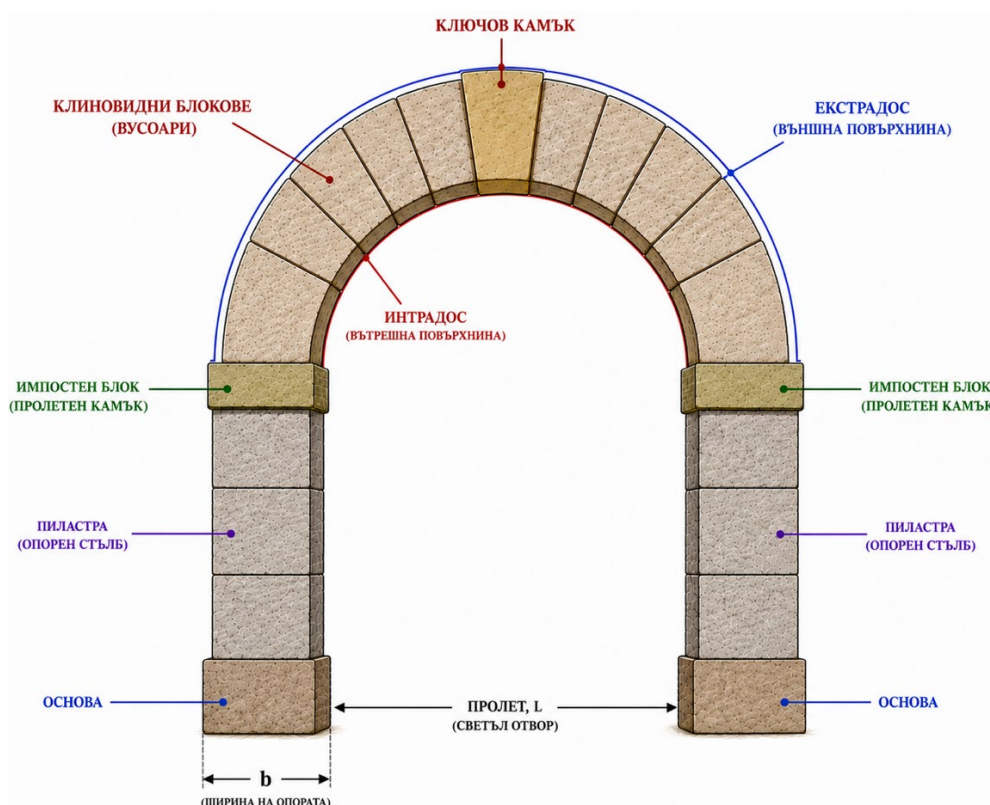
В основата на опорните елементи се намира фундаментът, който осигурява равномерното предаване на усилията към земната основа и предотвратява неравномерни слягания.

Съвместната работа на всички тези елементи определя механичното поведение на арката като система, в която натоварванията се преобразуват в натискови усилия и се предават последователно към опорите и фундамента. Нарушаването на равновесието или локалната цялост на който и да е от тези елементи може да доведе до преразпределение на вътрешните усилия, загуба на контакт между блоковете и развитие на механизъм на разрушение.

В историческата строителна практика правилното съотношение между основните конструктивни елементи е било определящ фактор за устойчивостта и носимоспособността на арката. Тези пропорции са формирани емпирично, на основата на натрупан практически опит, и по-късно се превръщат в основа за развитието на аналитичните методи в арковата механика. Основните емпирични съотношения са представени в Таблица 1.

Таблица 1 Основни емпирични пропорционални съотношения при зидани арки в античната и ренесансовата строителна практика

Конструктивен параметър	Емпирично съотношение	Практическо значение
Стрела / Отвор	$1/2 - 1/4$	Определя формата на арката и величината на хоризонталния разпор
Дебелина на свода / Отвор	$1/10 - 1/20$	Осигурява достатъчна масивност за запазване на натисковия поток
Ширина на опората / Отвор	$1/4 - 1/3$	Гарантира устойчивост срещу хоризонтален разпор
Височина на опората / Отвор	≈ 1.0	Осигурява геометрична стабилност и равномерно пренасяне на усилията



Фиг. 2. Основни конструктивни елементи на зиданата арка

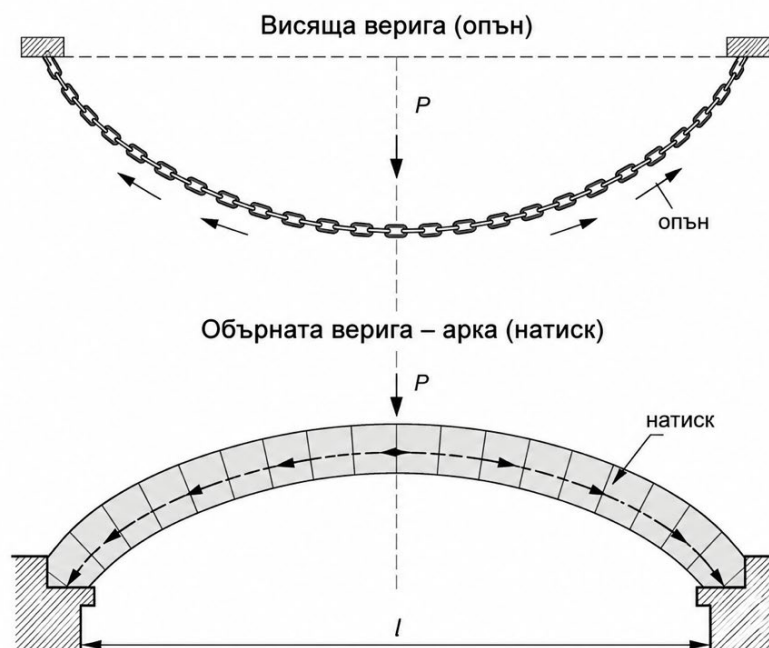
Именно геометричното съотношение между отвората, стрелата, дебелината на свода и размерите на опорните елементи е било основен предмет на емпиричното оразмеряване в античната и ренесансовата строителна практика.

По-късно, по време на късния ренесанс и барока, испански и френски майстори като Родриго Хил де Хонтаньон и Франсоа Блондел развиват графични и геометрични методи за определяне на дебелината на подпорите (контрафорсите), поемащи хоризонталния разпор на свода. Едно от най-популярните емпирични правила от този период изисква разделянето на полукръглата дъга на три равни части. Продълженията на хордите на тези дъги графично определят минималната широчина на фундамента и подпорните стени, за да се предотврати тяхното преобръщане под действие на хоризонталната опорна реакция.

Концепцията за обърнатата верига на Робърт Хук

Истинският концептуален преход от чиста емпирика към физически обоснован анализ се случва в края на XVII век благодарение на английския учен Робърт Хук (1635–1703). През 1675 г. Хук публикува своята знаменита анаграма, която в превод от

латински ("Ut pendet continuum flexile, sic stabit contiguum rigidum inversum") гласи (фиг.3): „Както виси гъвкавата нишка, така, обърната, стои твърдата арка“



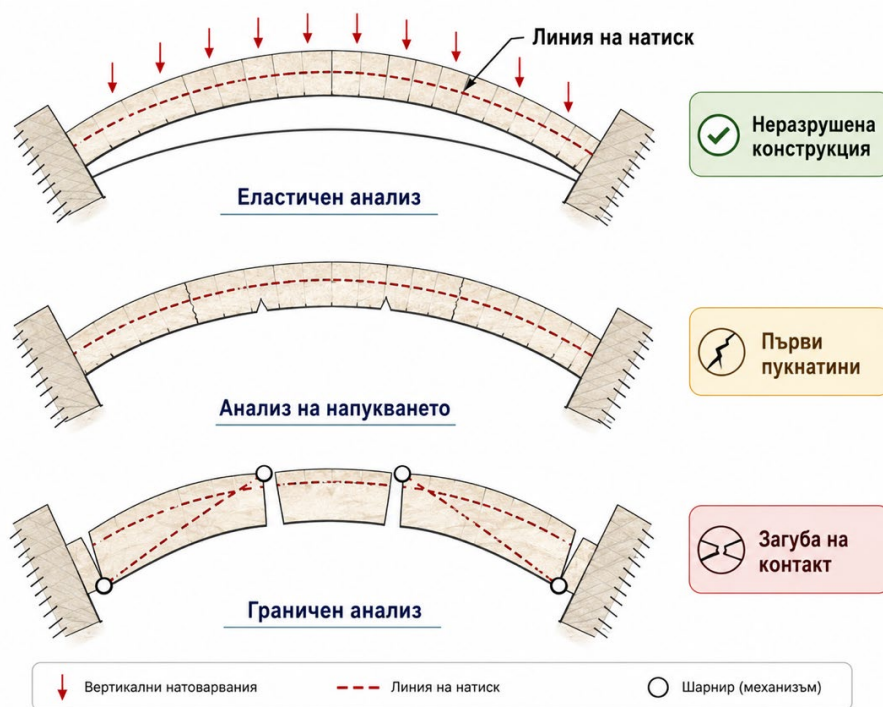
Фиг. 3. Концепция за обърнатата верига на Робърт Хук като геометричен модел на линията на натиск

Хук прави гениалното научно откритие, че идеалната геометрична форма за една арка, подложена на натоварване от собствено тегло, съвпада точно с формата на перфектно гъвкава верига, окачена в двата си края. Тъй като веригата може да работи единствено на чист опън, то при нейното перфектно вертикално обръщане (инверсия) получената арка ще работи на чист натиск, без в нея да се появяват огъващи моменти. Така за първи път се поставя физическата основа на понятието линия на натиск, което впоследствие се превръща в централен аналитичен инструмент при изследването на арковите конструкции.

Този принципен подход на Хук намира своето първо и епохално практическо приложение през 1743 г., когато италианският математик и инженер Джовани Полени (1698–1761) [3].

Първото аналитично приложение: Джовани Полени

Приносът на Джовани Полени се състои в ранното прилагане на функулярния принцип за анализ на зидани конструкции, чрез който устойчивостта се оценява спрямо положението на линията на натиск (фиг.4).



Фиг.4 Механична еволюция на арковата конструкция според принципа на линията на натиск: еластично състояние, напукване и граничен механизъм на разрушение

Макар неговият най-известен анализ да е свързан с купола на базиликата „Св. Петър“, принципът има пряко приложение и при аркови конструкции. Класически пример за това е римският акведукт Pont du Gard, при който стабилността се осигурява чрез поддържане на компресионния силов поток в рамките на арковото сечение (фиг.5).



Фиг.5 Pont du Gard като класически пример за римска аркова система, при която устойчивостта се осигурява чрез непрекъснат компресионен силов поток и благоприятно положение на линията на натиск.

Анализът на този ранен период показва, че макар и лишени от апарата на диференциалното смятане, емпиричните и ранноаналитичните методи успешно формулират основния принцип на строителната механика при сводове: устойчивостта е въпрос на геометрично допустимо равновесие и правилно разположение на вътрешните натискови сили. Именно този принцип впоследствие намира своето строго аналитично развитие в трудовете на Шарл Мери, който формализира линията на натиск като универсален критерий за устойчивост на арковите конструкции.

3. ФУНДАМЕНТЪТ НА АНАЛИТИЧНАТА МЕХАНИКА (XVIII – XIX ВЕК)

През XVIII и XIX век строителната механика претърпява фундаментална трансформация, преминавайки от геометрични пропорции към строго математическо моделиране, базирано на диференциалното и интегралното смятане. Периодът се характеризира с формулирането на първите аналитични теории за разрушението на масивни конструкции и разработването на класическите методи за изчисляване на статически неопределени системи на ръка.

Теорията на Шарл Кулон (1773 г.) и появата на ставите (шарнирите)

Истинският научен пробив в аналитичното изследване на сводовите конструкции е направен от френския военен инженер Шарл Огюстен Кулон (1736–1806) [1]. В своя фундаментален труд, представен пред Академията на науките в Париж през 1773 г., Кулон за първи път прилага законите на статиката и триенето за анализ на устойчивостта на зидани арки, поставяйки основите на това, което днес се определя като теория на граничното равновесие.

За разлика от предходните геометрични подходи, Кулон разглежда арката като система от отделни клиновидни блокове, взаимодействащи чрез контактни повърхности, по които могат да възникват приплъзване, отваряне на фуги и локални ротации. На тази основа той формулира трите основни механизма на разрушение:

- Разрушение чрез смачкване на материала – настъпва при превишаване на натисковата якост на зидарията;
- Разрушение чрез приплъзване – при преодоляване на силите на триене между отделните блокове;

- Разрушение чрез завъртане – при локално отваряне на фугите и концентриране на контакта в краен ръб.

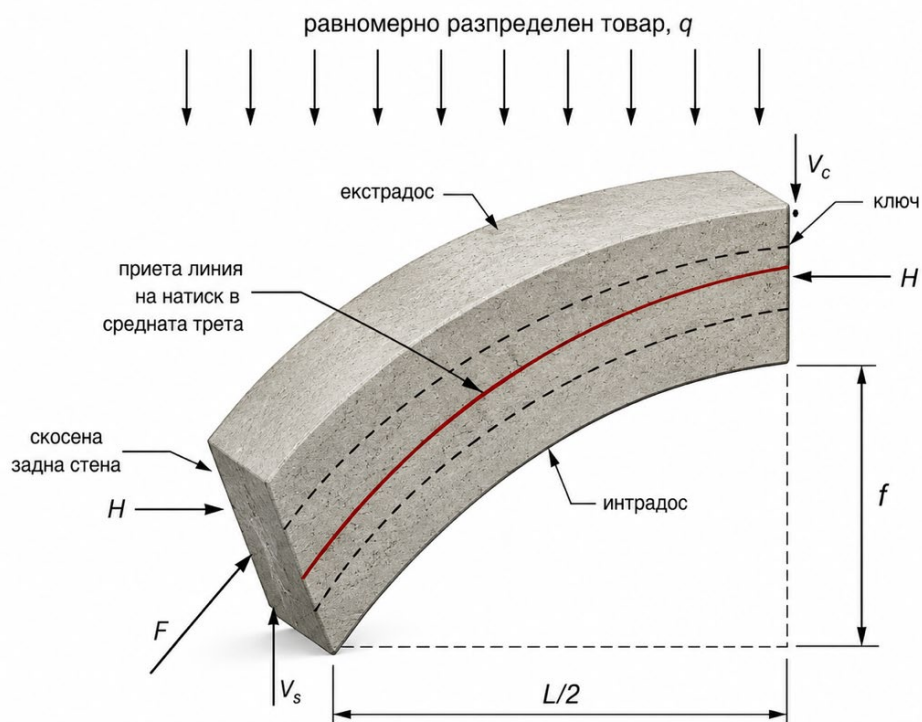
Особено важно е третото състояние, тъй като именно тук Кулон за първи път идентифицира механизма на формиране на стави в зиданата конструкция. В класическата теория на еластичността подобно състояние се описва чрез понятието *пластична става* – сечение, при което огъващият момент достига пределната носимоспособност и настъпва свободна ротация. При зиданите конструкции обаче този механизъм не е резултат от пластичност на материала, а от локална декомпресия и загуба на контакт между отделните блокове. Поради това в арковата теория е по-коректно да се използва терминът пасивен шарнир или геометрична става.

Кулон също така първи въвежда метода на сеченията за определяне на допустимите граници на хоризонталния разпор в петите на арката. Той доказва, че устойчивостта на свода зависи от съществуването на определен диапазон на хоризонталната реакция. При превишаване на горната граница ($H > H_{\max}$) настъпва повдигане на ключа, а при спадане под долната граница ($H < H_{\min}$) се наблюдава вътрешно пропадане на свода.

С това Кулон извежда фундаменталния принцип, че устойчивостта на арката е не просто въпрос на якост, а резултат от допустимото равновесие между геометрията, триенето и положението на вътрешните сили — принцип, който по-късно намира своето графоаналитично развитие в метода на Шарл Мери.

Приносът на Мери и дефинирането на „ядрото на сечението“

През 1840 г. френският инженер Шарл Мери (Charles Méry) [4] доразвива идеите на Кулон и въвежда в инженерната практика графично-аналитичния метод на линията на натиск. Мери формулира фундаменталното правило, според което за да не възникват опънни напрежения в зиданата конструкция, линията на натиск трябва да остава в рамките на средната третина на напречното сечение. Това условие по-късно става известно като **правилото за ядрото на сечението (фиг.6)**.



Фиг. 6. Пространствен модел на зидан свод с линия на натиск в рамките на средната третина

Линията на натиск представлява геометричното място на резултантите на вътрешните натискови сили по дължината на конструкцията (фиг.6). Нейното положение зависи пряко от съотношението между огъващия момент и нормалната сила във всяко сечение, като ексцентрицитетът се определя чрез отношението $e=M/N$. При идеален случай на симетрично натоварване и чист натиск линията на натиск преминава през центровете на сеченията, без да възникват опънни напрежения. При *промяна на натоварването, геометрията или опорните условия* в конструкцията се пораждат огъващи моменти, които водят до изместване на линията на натиск. Ако това изместване излезе извън границите на ядрото на сечението, в конструкцията възникват опънни напрежения, които зидарията не може да поеме.

Това позволява на инженерите за първи път аналитично да проверят сигурността на арките чрез класическата формула за ексцентричен натиск:

$$\sigma_{max,min} = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W}$$

Ако линията на натиск излезе извън средната третина, в сечението възникват опънни напрежения, които зидарията не може да поеме. Това води до локално отваряне на контактните фуги и редукция на ефективната натисната зона. Появата на такива зони не означава автоматично загуба на устойчивост, а представлява начало на механичен преход към ново статическо състояние. Именно този процес на декомпресия и последващата трансформация на статическата схема ще бъдат предмет на втората част на настоящото изследване.

При историческите паметници това разтваряне на зидарията е естествен начин конструкцията да се адаптира към слягане на почвата или трусове. Появата на пукнатина не означава срутване, а просто че сводът е намерил нов статически начин да пренесе товара си.

Анри Навие, Клапейрон и методът на силите на ръка

В началото на XIX век, благодарение на Луи Навие (1785–1836) [2], се ражда модерната теория на еластичността и линейната механика на деформируемото твърдо тяло. Навие извежда диференциалното уравнение на еластичната линия на огъната греда, което прави възможно изчисляването на статически неопределими системи.

За аркови и сводови конструкции, които са еднократно, двукратно или трикратно статически неопределими (като безшарнирните масивни арки), френските и немските школи развиват метода на силите (Клапейрон, Максвел, Мор). Преди появата на компютрите, изчисляването на разрезните усилия (огъващ момент (M), осова сила (N) и срязваща сила (Q) се е извършвало чрез решаване на каноничните уравнения на метода на силите на ръка:

$$\delta_{11} \cdot X_1 + \delta_{12} \cdot X_2 + \dots \Delta_{1P} \cdot X_P = 0$$

Инженерите са пресмятали коефициентите пред неизвестните δ_{ik} чрез аналитично интегриране по дължината на оста на арката с помощта на интеграла на Мор:

$$\delta_{ik} = \int \frac{M_i \cdot M_k}{EI} ds + \int \frac{N_i \cdot N_k}{EA} ds$$

За целта оста на арката се е апроксимираща математически (най-често като парабола или окръжност), за да могат интегралите да се решат в затворен вид или чрез таблично числено интегриране (правило на Симпсон). Този подход е изисквал изключителна математическа подготовка и прецизност, като е позволявал точното отчитане на деформациите от осовата сила (N), които при ниски и тежки сводове оказват съществено влияние върху крайното напрегнато състояние.

Следователно, в края на XIX век аналитичната строителна механика вече разполага с пълен апарат за изчисляване на всякакви аркови системи в еластичен стадий – постижение, което остава едно от най-елегантните математически постижения в класическата строителна механика [5], [6], [7], [8]

НАУЧНА ХИПОТЕЗА

Въз основа на историческия и теоретичен анализ на развитието на аналитичните модели за изследване на аркови конструкции се формулира следната научна хипотеза:

„Геометричната форма на арката представлява основният определящ фактор за нейното напрегнато състояние, носимоспособност и устойчивост. Предполага се, че изменението на основните геометрични параметри — отвор, стрела, дебелина на сечението и радиус на кривината — води до преразпределение на вътрешните усилия и до промяна в положението на линията на натиск. Следователно, устойчивостта на масивните аркови конструкции може да бъде надеждно оценена чрез проследяване на геометрично допустимото положение на линията на натиск в рамките на ефективното напречно сечение.“

Методика за проверка на хипотезата

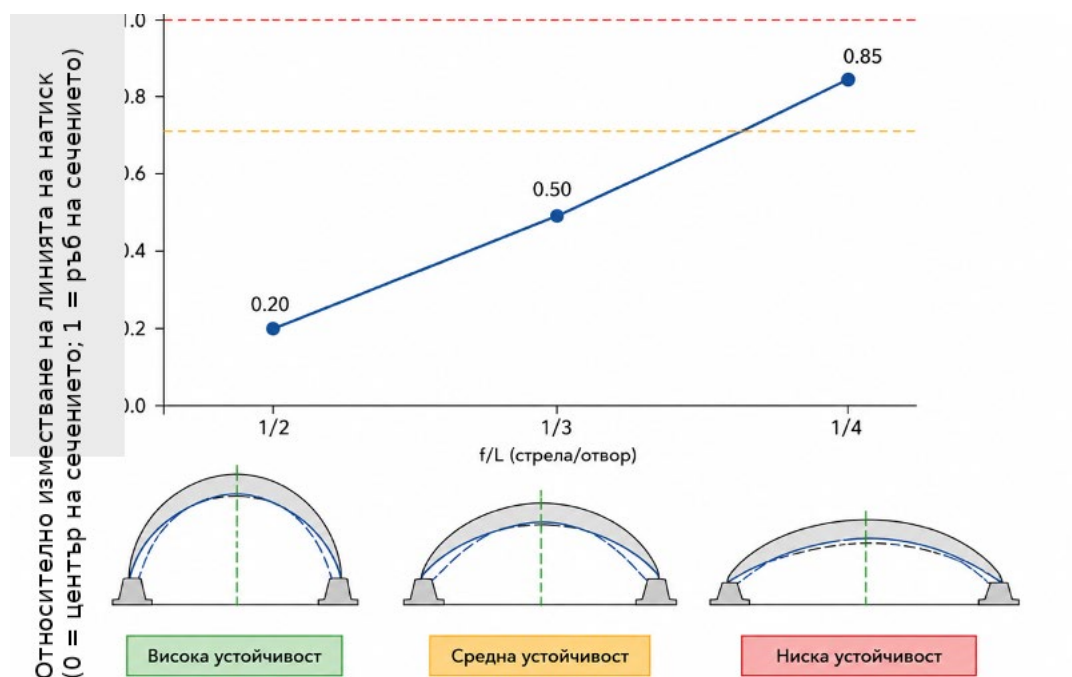
За проверка на поставената хипотеза е приложен параметричен аналитичен подход, основан на вариране на основните геометрични параметри на масивна зидана арка. Целта на анализа е да се проследи влиянието на геометричната конфигурация върху положението на линията на натиск и върху устойчивостта на конструкцията.

Като изходен модел се приема идеализирана аркова система с постоянен отвор L , при която последователно се изменят два основни параметъра — стрелата f и дебелината на свода t . Анализът се провежда в три последователни етапа.

В първия етап се изследва влиянието на стрелата върху механичното поведение на арката при постоянен отвор. Разглеждат се три характерни съотношения между стрелата и отвора, представени в Таблица 2.

Табл. 2. Параметричен анализ на влиянието на стрелата върху устойчивостта на арката.

Вариант	Отвор L	Стрела/Отвор f/L	Характер на арката	Очаквано механично поведение
1	const.	1/2	Полуциркулна / висока арка	По- благоприятен натисков поток
2	const.	1/3	Средно полегата арка	Увеличен хоризонтален разпор
3	const.	1/4	Полегата арка	Значително изместване на линията на натиск



Фиг.7 Влияние на отношението стрела/отвор върху устойчивостта на арката

Резултатите показват, че с намаляване на стрелата при постоянен отвор се увеличава хоризонталният разпор и линията на натиск постепенно се измества към

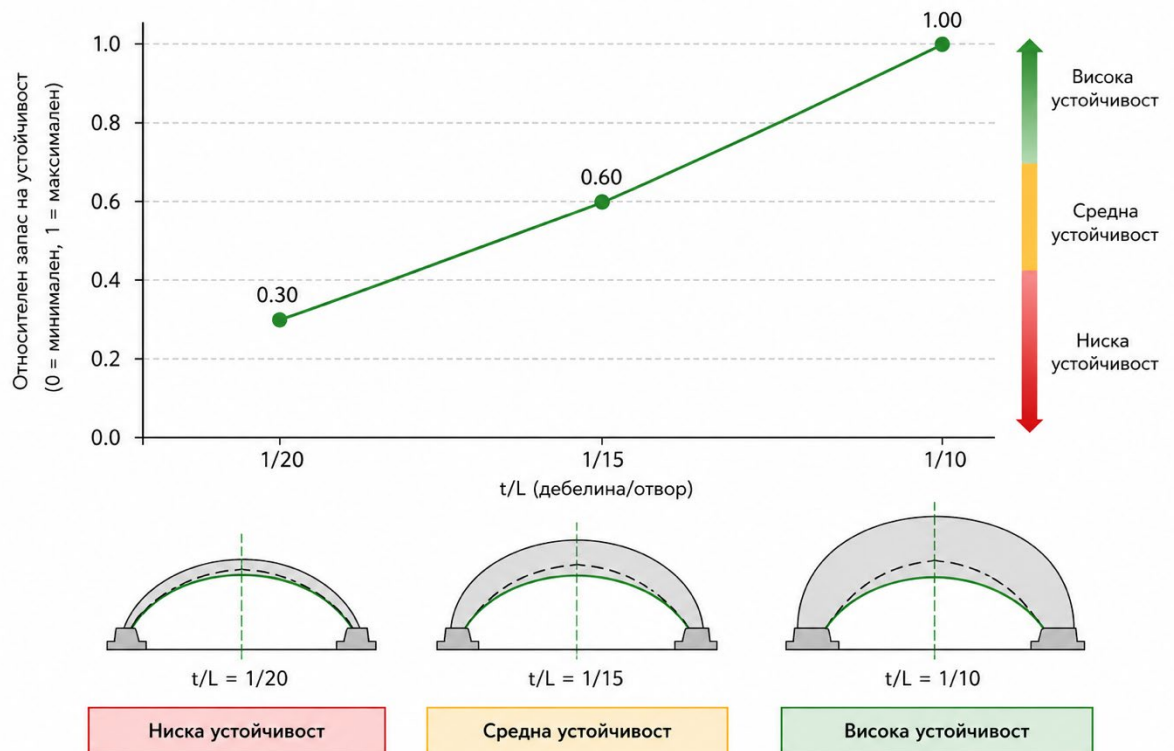
периферията на напречното сечение. Това води до намаляване на устойчивостта и повишаване на риска от локална декомпресия.

Във втория етап се анализира влиянието на дебелината на свода при постоянен отвор. Разглеждат се три характерни съотношения между дебелината и отвора, представени в Таблица 3.

Табл. 3. Параметричен анализ на влиянието на дебелината на свода върху устойчивостта на арката.

Вариант	Отвор L	Дебелина/Отвор t/L	Характер на свода	Очаквано механично поведение
1	const.	1/10	масивен свод	висока устойчивост
2	const.	1/15	средна дебелина	ограничен запас на устойчивост
3	const.	1/20	тънък свод	повишен риск от декомпресия

Анализът показва, че увеличаването на дебелината осигурява по-широка зона за развитие на линията на натиск и по-голям конструктивен запас. При по-тънки сводове линията на натиск се доближава до границите на сечението, което увеличава вероятността от загуба на контакт между отделните блокове (фиг.8).



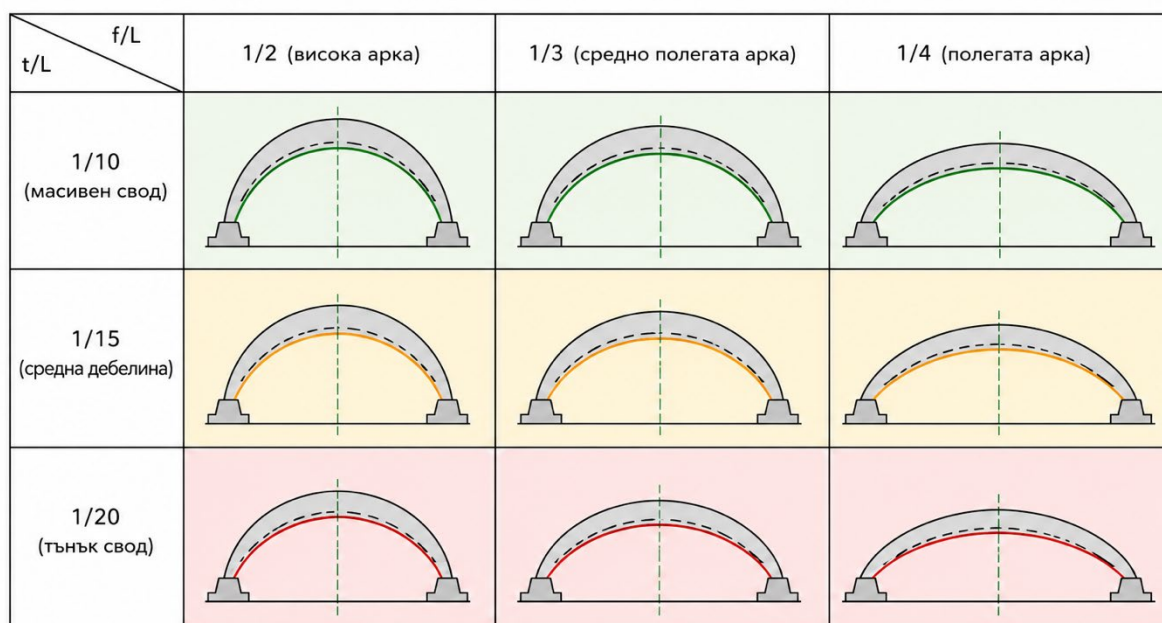
Фиг.8 Влияние на отношението дебелина на зида/отвор върху устойчивостта на рамката

За по-пълна оценка на съвместното влияние на геометричните параметри е проведен комбиниран параметричен анализ, при който едновременно се изменят стрелата и дебелината на свода. Целта е да се установят най-благоприятните и най-неблагоприятните геометрични конфигурации по отношение на устойчивостта.

Табл. 4. Комбиниран параметричен анализ на влиянието на стрелата и дебелината върху устойчивостта на арковата конструкция.

Геометричен вариант	f/L t/L	Очаквано положение на линията на натиск	Оценка на устойчивостта
Висока и масивна арка	1/2 1/10	В средната зона на сечението	Висока
Висока, но тънка арка	1/2 1/20	В рамките на сечението, с малък запас	Средна
Полегата и масивна арка	1/4 1/10	Изместване към ръба на сечението	Средна
Полегата и тънка арка	1/4 1/20	Близо до или извън ръба на сечението	Ниска

Комбинираният анализ потвърждава, че устойчивостта на арката зависи от съвместното действие на геометричните параметри. Най-благоприятно поведение се наблюдава при високи и масивни арки, при които линията на натиск остава в средната зона на напречното сечение. При намаляване както на стрелата, така и на дебелината, натисковият поток се измества към ръбовете, което създава условия за декомпресия, локално напукване и формиране на механизъм на разрушение.



Фиг.9 Влияние на съотношения стрела/отвор (f/L) и дебелина/отвор (t/L) върху устойчивостта на арковата конструкция

Следователно, резултатите от параметричния анализ потвърждават поставената научна хипотеза, че геометричната форма е основен определящ фактор за напрегнатото състояние, носимоспособността и устойчивостта на масивните аркови конструкции. Критерият за устойчивост може надеждно да бъде формулиран чрез проследяване на положението на линията на натиск в рамките на ефективното напречно сечение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Историческият анализ на развитието на аналитичните модели за изследване на аркови конструкции показва, че още много преди формализирането на строителната механика древните и средновековните строители интуитивно са овладели основните закони на равновесието. Чрез натрупан практически опит, строги геометрични пропорции, масивни подпори, увеличаване на дебелината в петите, използване на

контрафорси, обтегачи и пръстенови обръчи, те са успявали да поддържат линията на натиск в безопасните граници на конструкцията, без да разполагат с математическия апарат на съвременната теория.

Развитието на строителната механика през XVIII и XIX век постепенно трансформира тези емпирични правила в последователна научна система. Концепцията за обърнатата верига на Хук поставя физическата основа на равновесието в арковите системи. Графоаналитичният метод на Мери за първи път позволява геометричното проследяване на линията на натиск и нейното съпоставяне с границите на сечението. Последващото развитие на аналитичната механика чрез Навие, Клапейрон и Мор разширява този подход чрез строг математически апарат за определяне на усилията и деформациите в статически неопределими системи.

Получените резултати потвърждават, че при масивните аркови конструкции устойчивостта е преди всичко геометричен проблем, а не въпрос единствено на материална якост. Именно правилното управление на геометрията, разпора и траекторията на вътрешните сили обяснява защо множество исторически арки и куполи са запазили своята цялост в продължение на столетия. В същото време, когато линията на натиск напусне допустимите граници на сечението, конструкцията преминава в нов механичен стадий на работа, свързан с декомпресия и трансформация на статическата схема — процеси, които ще бъдат предмет на следващата част на настоящото изследване.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Coulomb, C. A., Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique, relatifs à l'architecture. Mémoires de Mathématique et de Physique présentés à l'Académie Royale des Sciences, Paris, 1773
2. Navier, C. L., Résumé des leçons données à l'École des Ponts et Chaussées sur l'application de la mécanique à l'Établissement des constructions et des machines, 1826
3. Carilian-Goeury, Poleni, G., Memorie istoriche della Gran Cupola del Tempio Vaticano. Padova, Paris, 1748
4. Méry, C. (1840). Sur l'équilibre des voûtes en berceau. Annales des Ponts et Chaussées, 1, pp. 50-70, 1840
5. Heyman, J., *The Stone Skeleton: Structural Engineering of Masonry Architecture* Goodreads. Cambridge University Press, 1995

6. Benvenuto, E., *An Introduction to the History of Structural Mechanics: Part I: Statics and Resistance of Solids*, 1991
7. Benvenuto, E., *An Introduction to the History of Structural Mechanics: Part II: Vaults, Arches and Frameworks*, 1991
8. Kurrer, K.-E., *The History of the Theory of Structures*, 2018