
**СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ МЕЖДУ
НОРМАТИВНОЗАЛОЖЕНИТЕ ПАРАМЕТРИЧНИ МОДЕЛИ ЗА
ПРОГНОЗИРАНЕ НА СЪСЪХВАНЕТО НА БЕТОНА И МЕТОДА
С ИЗКУСТВЕНИТЕ НЕВРОННИ МРЕЖИ**

Р. Захариева¹, Я. Кънчева²

Ключови думи: невронни мрежи, моделиране, бетон, съсъхване, прогноза

Научна област: строителни материали

РЕЗЮМЕ

Съсъхването на бетона е процес, който влияе както върху механичното поведение на бетона, така и върху неговата дълготрайност. Поради сложната природа на съсъхването и влиянието на множество фактори от състава на бетона, грижите в ранна възраст и експлоатационните условия, за прогнозирането и отчитането му при оразмеряване на стоманобетонни конструкции му се използват параметрични модели. При тях се прилага система от коефициенти, които са също обект на моделиране и приемане. Неточността на прогнозата може да има сериозни последствия, поради което като цяло се приемат твърде завишени коефициенти, водещи до преразход на ресурси. Настоящата публикация представя един нов подход при оценка и прогнозиране на съсъхването – този с използването на изкуствени невронни мрежи (Artificial Neural Network, ANN), който дава възможност да се обработят огромни масиви с експериментални данни. По този начин може да бъде използван в максимална степен натрупаният опит, чрез който да се обхванат множество факти, изменящи се в широк интервал. Направен е сравнителен анализ между резултатите, получени за съсъхването по някои от нормативнозаложените модели и с помощта на ANN. Установено е, че методът ANN дава най-добра корелация между експерименталните и изчислителните данни в разглеждания широк интервал на вариране на факторите и позволява да се открият най-меродавните. Изводът е, че с използването на ANN могат както да бъдат прогно-

¹ Румяна Захариева, доц. д-р инж., кат. „Строителни материали”, УАСГ, бул. „Христо Смирненски” 1, София 1046, e-mail: roumiana.zaharieva@gmail.com

² Яна Кънчева, ас. инж., кат. „Дескриптивна геометрия и инженерно-строителна графика“, УАСГ, бул. „Христо Смирненски” 1, София 1046, e-mail: ykancheva@gmail.com

зиран по-точно стойностите на съсъхването, така и да се редуцира обемът и обхватът на лабораторните изследвания, с което да се постига икономия на време и ресурси.

1. Въведение

Съсъхването на бетона е сложен процес, който трудно се поддава на математическо моделиране и прогнозиране. Причините за това се намират както в различната природа и механизъм на съсъхването (контракционно, влажностно, карбонизационно, автогенно и др.), което се развива с години, но с различна интензивност в различните периоди на втвърдяване на бетона, така и в множеството фактори, които влияят на процеса (състав на бетона, грижи в ранна възраст, условия на втвърдяване и др.). На макрониво, съсъхването се изразява в намаляване на размерите (обема) на бетона [1]. В редица случаи това е причина за поява на сериозни опънни напрежения, което от своя страна може да доведе до пукнатинообразуване. Ето защо прогнозирането на процеса на развитие на деформациите от съсъхване представлява важен момент при оценка на риска от образуване на пукнатини, респ. тяхната превенция. Налични са редица модели описващи процеса на съсъхване – ACI 209R-92, Bažant-Baweja B3, СЕВ МС90-99, GL2000, като някои от тях са залегнали в нормите за проектиране на стоманобетонни конструкции. Общото между тези модели е, че те са най-често параметрични, което предполага ограничен брой на факторите, приети за меродавни и ограничен диапазон на изменение на факторите, в който моделът да остава адекватен. От друга страна, при параметричните модели се прилага система от коефициенти, които са също обект на моделиране и приемане. Следователно би могло да се натрупа неточност, налагаща приемането на твърде завишени коефициенти, водещи от своя страна до преразход на ресурси.

В последните години е възможно при моделирането на сложни и дълговременни процеси да бъдат използвани големи бази от съществуващи данни, за чиято обработка да се използват мощни кибернетични инструменти – например изкуствени невронни мрежи (Artificial neural networks – ANN), генетичен алгоритъм (Genetic algorithm – GA) и др. В настоящата статия е направен сравнителен анализ на прогнозите за съсъхването според някои от най-популярните параметрични модели и резултатите, получени с използване на ANN.

2. Основни предпоставки и критерии при моделиране на процеса на съсъхване

Сумарната деформация от съсъхване се определя от 2 основни компонента основно собствено съсъхване и влажностно съсъхване [2]. Собственото съсъхване (контракционно съсъхване) е резултат от хидратацията на цимента, вследствие на което новообразуваната смес е с по-малък обем от обема на изходните вещества. Съсъхването от изсъхване (влажностно съсъхване) се дължи на промяната във водното съдържание на втвърдената бетонна смес. Влажностното съсъхване е обект на повишен интерес не само защото е най-голямо, но и защото предизвиква допълнителни напрежения в конструкциите. То е най-съществено в ранната възраст на бетона и може да бъде минимизирано чрез редица мерки за ограничаване изпаряването на вода – засенчване, покриване с полимерно фолио, омокряне на елемента, използване на филмообразуващи препарати и др. Основни фактори от състава на бетона, които влияят върху този

тип съсъхване, са: водоциментното отношение (В/Ц), количеството и видът на цимента, на добавъчните материали, на минералните и на химичните добавки.

Моделите за прогнозиране, цитирани в [3], са валидни за втвърден бетон със средна якост на натиск на 28-мия ден в диапазона 20 – 120 МПа, съдържание на активни минерални добавки (силициев прах, летливи пепели) до 30% [3], който е бил подложен на топло-влажностна обработка в ранна възраст.

При развитието на параметричните модели са възприети следните предпоставки:

- Деформациите от съсъхването са кумулативни с деформациите от натоварване – две серии опитни образци от бетон с един и същи състав са подложени на едни и същи условия на втвърдяване и грижи в ранна възраст. Пробите от едната серия са ненатоварени и служат за измерване на съсъхването, а пробите от другата серия се натоварват с 20% до 40% от якостта на натиск. Деформациите от натоварване се определят, като се извадят деформациите от съсъхване на ненатоварените проби от общите деформации, измерени при натоварените проби.
- В общия случай се приема, че деформациите от съсъхване се разпределят равномерно по напречното сечение на образците (освен ако не е използван анализ по метода на крайни елементи или друг подобен метод).
- Деформациите от собствено съсъхване (контракционно и автогенно) са пренебрежими – тази предпоставка не би следвало да е в сила за високоякостни бетони, с якости над 60 МПа и $V/C < 0,4$, тъй като тези деформации са значителна част от общите деформации от съсъхване.
- Счита се, че съсъхването се развива до определени граници, т.е. не нараства безкрайно, а има затихващ във времето характер [3].

Прогнозите за съсъхването, получени посредством моделиране на процеса, се съпоставят (валидират) с експериментални данни. За тази цел се разработва специална експериментална постановка и/или се ползват и допълват бази данни (напр. тези на Международния съюз на лабораториите и експертите по строителни материали, системи и конструкции, RILEM). При ползването на такива бази данни възникват някои проблеми, породени от нееднаквост при условията на отлежаване и изпитване на иначе идентични по състав и размери проби, както и от различните качества на материалите за бетон. Освен това повечето изпитвания се провеждат в сравнително кратък период от време, което ограничава възможността с тях да се прогнозира дългосрочни тенденции. Спорно е и доколко малките размери на изпитваните проби могат да отразят адекватно процесите на големи по размери елементи, особено на процесите във вътрешността на тези елементи.

Използването на експериментални стойности изисква да се изследва отклонението в данните за всеки модел, като за това се прилагат различни системи за предварителна обработка (линейна регресия, изчисляване на коефициент на вариация и др.).

Различните подходи ползват различен набор от критерии за моделиране на съсъхването – табл. 1. [2, 3, 4].

Таблица 1. Сравнение на моделите по вида и диапазона на изменение на входните данни (по данни от [3] и [4])

Входни данни	Модел				
	ACI 209R-92	Bažant-Baweja B3	CEB MC90-99	GL 2000	ANN Bal&Buyle-Bodin
Грижи в ранна възраст	x	x	o	o	o
Модул на повърхнината (V/S) или средна дебелина на елемента	x	x	x	x	x
f_{cm28} , МПа	o	17–70	15–120	16–82	11,4–119
Съдържание на цимент, kg/m^3	279–446	160–720	o	o	250–564
В/Ц	o	0,35–0,85	o	o	o
Относителна влажност на въздуха, %	40–100	40–100	40–100	20–100	20–75
Тип на цимента	x	x	x	x	x
Възраст на бетона, от която се отчита съссъхването (обикновено след края на влажностната обработка), t_c	≥ 1 ден	≥ 1 ден	> 1 ден	≥ 1 ден	≥ 1 ден
Възраст на бетона, при която е приложено натоварване, t_0	≥ 7 дни	$t_0 \geq t_c$	< 14 дни	$t_0 \geq t_c \geq 1$ ден	$t_0 \geq t_c$
Съдържание на добавъчни материали по маса, kg/m^3	o	x	o	o	1661–1985
Форма на изпитваните тела	o	x	o	o	o
Водно съдържание, kg/m^3	o	x	o	o	129–293
Дял на пясъка в общото количество добавъчни материали	o	o	o	o	0,357–0,77
Модул на еластичност на 28-ия ден, МПа	o	x	x	x	12537–53200

x – отчита се в модела; o – не се отчита в модела

3. Сравнение на някои параметрични модели за прогнозиране на съсъхването с невронно-мрежови модел

Същността на ANN и възможностите за приложението им в областта на строителното материалознание са дискутирани в предишна наша публикация [5].

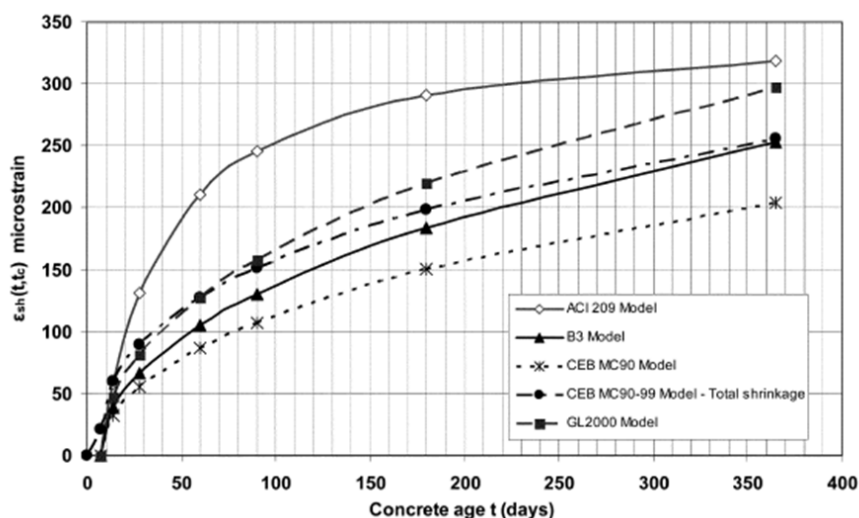
Сравнението между параметричните модели за прогнозиране на съсъхването и невронно-мрежовия модел може да бъде направено в няколко плоскости:

- по отношение на входните данни – табл. 1;
- по отношение на структурата на модела;
- по отношение на пълнотата и надеждността на резултатите.

Прави впечатление, че макар и близки, различните параметрични модели се отличават един от друг по входни данни – както по разнообразие от изследвани параметри, така и по техния обхват. Тъй като съсъхването се влияе от много фактори, колкото повече информация ползва моделът, толкова по-точна е прогнозата. Моделите на Važant-Baweja B3, СЕВ МС90-99 и GL2000 използват измервания за набирането на якост и модула на еластичност, като тези данни се отчитат в уравненията за съсъхването и това значително подобрява точността на прогнозиране, сравнено с АСІ 209R-92. За невронно-мрежовия модел (ANN) е характерно, че той е сред моделите с най-голям набор от параметри. Следва да се подчертае, че за ANN подхода няма ограничение в набора и формата на входните данни, стига техният брой да е достатъчен, [4].

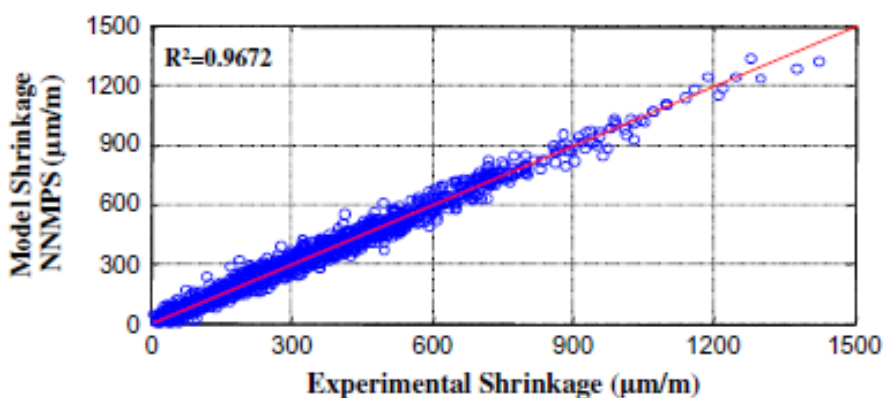
Конвенционалните методи за прогнозиране на съсъхването, за разлика от ANN, са базирани на уравнения за изчисляване на деформациите от съсъхване, чиито коефициенти са изведени от емпирични данни. Изчислените прогнозни стойности се сравняват с целево получени експериментални данни и/или налични бази данни. Отчитането на различията в реалните условия от моделните става с прилагането на редица коефициенти [2], някои от които също са изведени от емпирични зависимости. При невронно-мрежовите модели ANN обаче подходът при прогнозиране (в случая на съсъхване, но и по принцип) е по-различен – не се предопределят доминиращите фактори, не се предопределят зависимостите между тях и изходната величина; връзките между променливите се формират в хода на анализа, при обмена на данни между т.нар. неврони (основни единици от невронната мрежа) и преминават през итеративен процес, докато не се достигне максимална точност и (приблизително) пълно обхващане на входните данни. За тази първа обучителна част на мрежата се използват обикновено около 70% от експерименталните данни. За тестовата фаза и фазата на валидирането на резултатите остават останалите 30%, по 15% за всяка фаза. Подобно разпределение е примерно и може да се подбира в зависимост от случая [4, 5].

За оценка на надеждността на прогнозата, а оттам и на самия модел, могат да се използват различни величини. Много често това са коефициентът на корелация, коефициентът на вариация, средноквадратичната грешка и средното отклонение. При еднакви начални данни моделите на Važant-Baweja B3, СЕВ МС90-99 и GL2000 дават приблизително еднакви крайни резултати, при това в голяма степен съпоставими с информацията от базата данни [3], докато моделът АСІ 209R-92 дава значително по-големи деформации от съсъхване, което се дължи основно на факта, че този модел ползва по-малко параметри при анализа (фиг. 1). Следователно мерките за ограничаване и отчитане на съсъхването според АСІ 209R-92 биха изисквали най-голямо количество ресурси.



Фиг. 1. Сравнение на прогнозите за деформациите от съсъхване на параметричните модели (по данни на [3])

При сравнението на резултатите от параметричните модели с тези, получени с помощта на ANN [4], при използването на една и съща (случайна) база данни, се оказва, че с най-висок коефициент на корелация (0,9834) е именно невронно-мрежовият модел ANN, следван от моделите на Bažant-Baweja B3 (0,9390), GL2000 (0,9277) и CEB MC90-99 (0,9076). Този висок коефициент на корелация при ANN (почти 1) е свидетелство за изключителната точност на ANN модела – фиг. 2, което прави прогнозата за големината на съсъхване с ANN подхода най-точна.



Фиг. 2. Прогнозни стойности за съсъхването посредством изкуствени невронни мрежи (ANN) (по данни на [4])

Освен това ANN позволява да се проследи влиянието на отделните променливи върху съсъхването при различни възрасти на бетона. Потвърждават се следните зависимости:

- с увеличаване на V/S и с увеличаването на количеството на пясъка в общия дял на добавъчните материали (S/Ta) съсъхването намалява;
- с повишаване на влажността на въздуха и продължителността на грижите за бетона в ранна възраст (до 14-ти или до 28-ми ден) съсъхването намалява значително, като при това стойностите се запазват относително стабилни във времето;
- с нарастване на количеството цимент и В/Ц, деформациите от съсъхване се увеличават, като по-осезаемо влияние имат тези фактори при бетони в зряла възраст [4].

4. Заключение

Проблемът с прогнозиране на съсъхването, дължащо се на множество фактори, които влияят и които се изменят в широки граници, прави трудно математическото му описание. Този проблем може да бъде преодолян с използването на подхода на ANN. Основна трудност се очертава необходимостта от наличие на бази данни с експериментални резултати, но подобна трудност възниква и при разработването на параметричните модели. При сравнението на тези модели с ANN се оказва, че последният се характеризира с най-добър обхват на данните (практически всички данни могат да бъдат обхванати, няма ограничение в броя и границите на параметрите) и най-точна прогноза както за големината на съсъхването, така и по отношение на зависимостите между отделните фактори (състав, условия на отлежаване, време) и търсената величина. Предизвикателство е разширяването на обхвата на изследваните фактори (например процента на замяна на естествени с рециклирани добавъчни материали) и/или техният диапазон (например при изследване на процесите при супервисокоякоостните бетони), което би позволило разширяване на приложимостта към повече видове, освен към конвенционалните бетони.

ЛИТЕРАТУРА

1. Симеонов, Й. и др. Строителни материали. Техника, 1991 г.
2. Еврокод 2. Проектиране на сгради със стоманобетонни и комбинирани конструкции. Издание на БИС, Сборник от стандарти, 2010 г.
3. Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete ACI 209.R-08. American Concrete Institute (ACI), 2008.
4. Bal, L., Buyle-Bodin, F. Artificial neural network for predicting drying shrinkage of concrete. Construction and Building Materials 38, 2013, pp. 248–254.
5. Кънчева Я., Р. Захариева. Приложение на изкуствените невронни мрежи като инструмент за анализ и прогноза в областта на строителните материали и конструкции. Сб. Доклади Межд. конференция ВСУ'2014, 5–6 юни 2014 г., София.

Постъпила: април 2015 г.

COMPARATIVE ANALYSIS OF NORMATIVE-BASED PARAMETRIC MODELS FOR PREDICTION OF SHRINKAGE OF CONCRETE AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS APPROACH

R. Zaharieva¹, Y. Kancheva²

Keywords: ANN, modeling, concrete, shrinkage, prediction

Research area: building materials

ABSTRACT

Shrinkage of concrete is a process that affects mechanical behaviour of concrete as well as its durability. Due to the complexity of shrinkage and the impact of many other factors regarding concrete constituents, early age curing and operation conditions, parametric models are usually used to describe and predict its properties when designing structures of reinforced concrete. These parametric models include a system of coefficients that are also an object of modeling and acceptance. An inaccurate prediction might have serious consequences, which is why these coefficients are highly increased, thus leading to overconsumption of resources.

The current paper presents a new approach for estimating and prediction of shrinkage – Artificial neural networks (ANN), which allows processing of huge amounts of experimental data. ANNs can envelope plenty of factors varying in big intervals and thus allow the best incorporation of the available experience. A comparative analysis of some results for shrinkage according to normative-based models (CEB, ACI 209, etc.) and ANN is made. ANN turns to show best correlation between experimental and calculation data within the wide interval of variation of values and allows most relevant factors to be outlined. As a result, applying ANN provides not only a more accurate prediction of shrinkage values, but also reducing the number of laboratory examination, thus saving time and resources.

This study is supported by the Centre for Research and Design at UACEG and is part of a scientific research project “Artificial neural networks (ANN) as an instrument for analysis and prediction in the area of building materials and processes”, contract BN 165/14.

¹ Roumiana Zaharieva, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. “Building Materials and Insulations”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: roumiana.zaharieva@gmail.com

² Yana Kancheva, Assist. Eng., Dept. “Descriptive Geometry and Engineering-Constructive Graphics”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: ykancheva@gmail.com