**XXVIII INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON
MODERN TECHNOLOGIES, EDUCATION AND PROFESSIONAL PRACTICE
IN GEODESY AND RELATED FIELDS**

Sofia, 08 - 09 November 2018

**XXVIII МЕЖДУНАРОДЕН СИМПОЗИУМ
"СЪВРЕМЕННИТЕ ТЕХНОЛОГИИ, ОБУЧЕНИЕТО И ПРОФЕСИОНАЛНАТА
ПРАКТИКА В ГЕОДЕЗИЯТА И СВЪРЗАНИТЕ С НЕЯ ОБЛАСТИ"**

София, 08 - 09 Ноември 2018

МЕТОДЪТ НА КРАЙНИТЕ ЕЛЕМЕНТИ В РАВНИНАТА И В ПРОСТРАНСТВОТО ЗА АНАЛИЗ НА ДЕФОРМАЦИИ И ПРИЛОЖЕНИЯ

Георги Вълев, Керанка Василева (BG)

РЕЗЮМЕ

Представен е методът на крайните елементи (МКЕ) в равнината и развитият от авторите МКЕ за пространството. Методът е приложен за няколко обекта на изследване на повърхностните движения на земната кора. Извършен е сравнителен анализ на определените деформации и са дискутирани получените резултати.

Ключови думи: метод на крайните елементи, главни деформации, повърхностни движения на земната кора, GNSS

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Определянето на относителните деформации може да се извърши по различни начини. Най-широко разпространен е методът на крайните елементи (МКЕ). При този метод цялата територия, подложена на изследване се разделя на отделни непокриващи се триъгълници. В границите на всеки триъгълен площен елемент се предполага, че деформациите са еднородни т.е., че средата е изотропна. Така всеки триъгълник се разглежда като отделен краен елемент.

Съвременната GNSS технология се използва широко за изследване на движенията на земната кора в локален, регионален и глобален мащаб. Днес методът на крайните елементи се използва успешно за анализ на движението на станциите, които са резултат от обработката на данни от GNSS, за да се получат тензори на напрежение [4], [6], [7], [12], [14], [15].

2. МЕТОД НА КРАЙНИТЕ ЕЛЕМЕНТИ В РАВНИНАТА

Установяването на деформациите се постига посредством преместването на върховете на триъгълника. Преместването на всяка точка се определя чрез разликата в координатите на точките, изведени за всяка епоха на измерване. Между началните (x, y) и деформираните координати (x', y') на точките в една крайна област се предполага, че съществуват връзките:

$$x^{|} = f(x,y) = c_1 + a_1 x + b_1 y$$
$$y^{|} = \varphi(x,y) = c_2 + a_2 x + b_2 y \qquad (1)$$

Формули (1) представляват развитие в Тейлоров ред на функциите $f(x,y)$ и $\varphi(x,y)$ до първите частни производни, но в същото време те са едно афинно преобразуване на началните координати (x, y) в деформираните координати (x', y'). За намиране на 6-те коефициента a, b и c са необходими 6 уравнения или три точки с началните си и деформирани координати.

Горните връзки , приложени за разликите в координатите на едноименните точки ще имат вида

$$\Delta x_i = x^{|} - x = f(x,y) = a_0 + (a_1 - 1).x + a_2 y = a_{10} + a_{11}.x + a_{12} y$$
$$\Delta y_i = y^{|} - y = \varphi(x,y) = b_0 + b_1 x + (b_2 - 1).y = a_{20} + a_{21} x + a_{22}.y \qquad (2)$$

Коефициентите a_{ik} в уравнения (2) могат да бъдат определени от началните координати и техните изменения в трите точки на крайния елемент, като се решат 6 уравнения.

Параметри на транслация (a_{10}, a_{20}) в (2) не причиняват никаква деформация в крайния елемент. Коефициентите $a_{11.}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$ обаче отразяват скоростта на преместването (деформацията) в посоката на координатните оси. При геофизичната интерпретация на геодинамичните процеси най-често се използват следните величини, свързани с деформацията:

- Посока на главните оси на деформацията. Това са две взаимно-перпендикулярни посоки по които разтягането или свиването имат екстремални стойности
- Големина на главните деформации, която е разликата между тях
- Мащабните характеристики на деформиране на територията.

Обикновено главните деформации се отнасят до средната точка в триъгълника.

При извеждането на главните деформации може да се разсъждава по следния начин.

Формира се симетричния тензор на деформациите

$$E = \begin{vmatrix} e_{11} & e_{12} \\ e_{12} & e_{22} \end{vmatrix}, \qquad (3)$$

където

$$e_{11} = a_{11,} e_{22} = a_{22,}$$
$$e_{12} = \frac{1}{2}(a_{12} + a_{21}).$$

Тензорът за деформация (3) може също да бъде получен и по друг начин. Решават се три уравнения с три неизвестни

$$e_1 = e_{11}.\cos^2\alpha_1 + e_{12}.\sin\alpha_1.\cos\alpha_1 + e_{22}.\sin^2\alpha_1,$$
$$e_2 = e_{11}.\cos^2\alpha_2 + e_{12}.\sin\alpha_2.\cos\alpha_2 + e_{22}.\sin^2\alpha_2, \qquad (4)$$
$$e_3 = e_{11}.\cos^2\alpha_3 + e_{12}.\sin\alpha_3.\cos\alpha_3 + e_{22}.\sin^2\alpha_3$$

където $e_i = \frac{S_i^{'} - S_i^0}{S_i}$ е деформацията по съответната страна на триъгълника, S'_i – дължина на страната за текущата епоха t', S^0_i - дължина на страната за началната епоха t^0, а α е посочният ъгъл на страната. По този начин обаче не може да се изведе въртенето ω.
Главните деформации са собствените числа на матрицата-тензор

$$\begin{aligned} E_1 &= \lambda_1, \\ E_2 &= \lambda_2 \end{aligned} \tag{5}$$

и те са получени от решението на характерното уравнение

$$\begin{vmatrix} e_{11} - \lambda & e_{12} \\ e_{12} & e_{22} - \lambda \end{vmatrix} = \lambda^2 - (e_{11} + e_{22})\lambda + (e_{11}.e_{22} - e_{12}e_{12}) = 0 \tag{6}$$

Направленията на главните деформации се дават чрез собствените вектори на същата матрица и се извеждат от уравненията:

$$\begin{aligned} (e_{11} - \lambda)\cos\alpha + e_{12}\sin\alpha = 0 \\ e_{12}\cos\alpha + (e_{22} - \lambda)\sin\alpha = 0 \end{aligned} \tag{7}$$

където sinα и cosα са посочните им косинуси. Решението на горните уравнения (7) води до определяне на посоките на главните оси

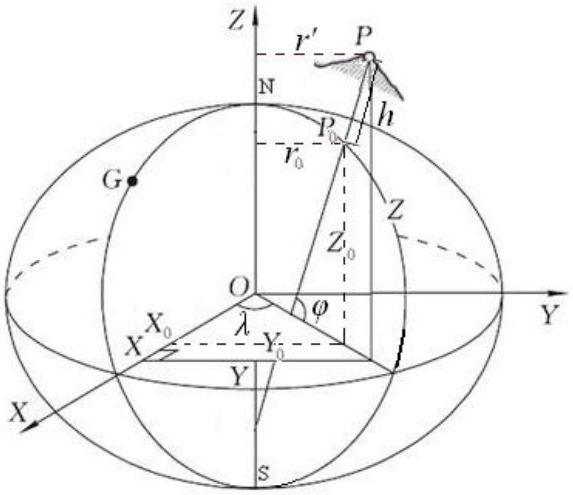
$$\begin{aligned} tg\,2\alpha_a &= \frac{2e_{12}}{e_{11} - e_{22}}, \\ \alpha_b &= \alpha_a \pm 90^0 \end{aligned} \tag{8}$$

3. МЕТОД НА КРАЙНИТЕ ЕЛЕМЕНТИ В ПРОСТРАНСТВОТО

Разработеният от авторите МКЕ за пространството, представен подробно в [14], [15] е подходящ метод за големи територии. Ще бъдат дадени само основните теоретични принципи на предложения метод.

Най-напред получените от обработката на GNSS данните елипсоидни координати φ, λ и h на станция P (фигура 1) в пространството се преобразуват в декартови координати P_0 (X_0, Y_0, Z_0) на проектираната върху елипсоида точка P_0 по добре познатите формули.

Нека X_0, Y_0, и Z_0 са декартовите координати на точка P_0, която е пробода на нормалата през точката P с елипсоида (фиг. 1).



Фиг. 1. Координатна система

Точката P_0 трябва да удовлетворява както уравнението на меридианната елипса, така и уравнението на нормалната линия през точката $P(X, Y, Z)$ към тази елипса, а именно

$$r_0^2 + Z_0^2(1+e'^2) = a^2 \tag{9}$$

$$\frac{Z - Z_0}{r' - r_0} = \frac{Z_0(1+e'^2)}{r_0}, \tag{10}$$

където r_0 е радиусът на паралела, който минава през точката P_0, r' е разстоянието от точка P. След заместванията и някои преобразования се получава уравнение от 4-та степен, което се решава чрез прилагане на метода на Ферари и накрая декартовите координати (X_0, Y_0, Z_0) на станция P_0 се изчисляват чрез

$$X_0 = X\frac{r_0}{r'}, Y_0 = Y\frac{r_0}{r'}, Z_0 = Z\frac{r_0}{r'}, \tag{11}$$

Получават се азимутите $\alpha_{i,k}$ и дължините $S_{i,k}$ на елипсоидните триъгълникови хорди (базисни линии) между върховете i и k на крайните елементи.

Накрая линейните деформации m на страните на триъгълника се получават от следните уравнения

$$m_{i,j} - 1 = \frac{S'_{i,j} - S_{i,j}}{S_{i,j}}, m_{j,k} - 1 = \frac{S'_{j,k} - S_{j,k}}{S_{j,k}}, m_{k,i} - 1 = \frac{S'_{k,i} - S_{k,i}}{S_{k,i}}. \tag{12}$$

Полуосите на елипсите на деформации a, b на крайния елемент се получават чрез

$$(b^2 - a^2) = (m_{j,k}^2 - m_{i,j}^2) / (\sin^2\gamma_{j,k} - \sin^2\gamma_{i,j}), \tag{13}$$

Накрая се определят главните деформации a' и b' (голяма и малка) и техните направления.

$$a' = 1 - b$$

$$b' = 1 - a$$

$$\alpha_b = \alpha_a + 90^\circ.$$

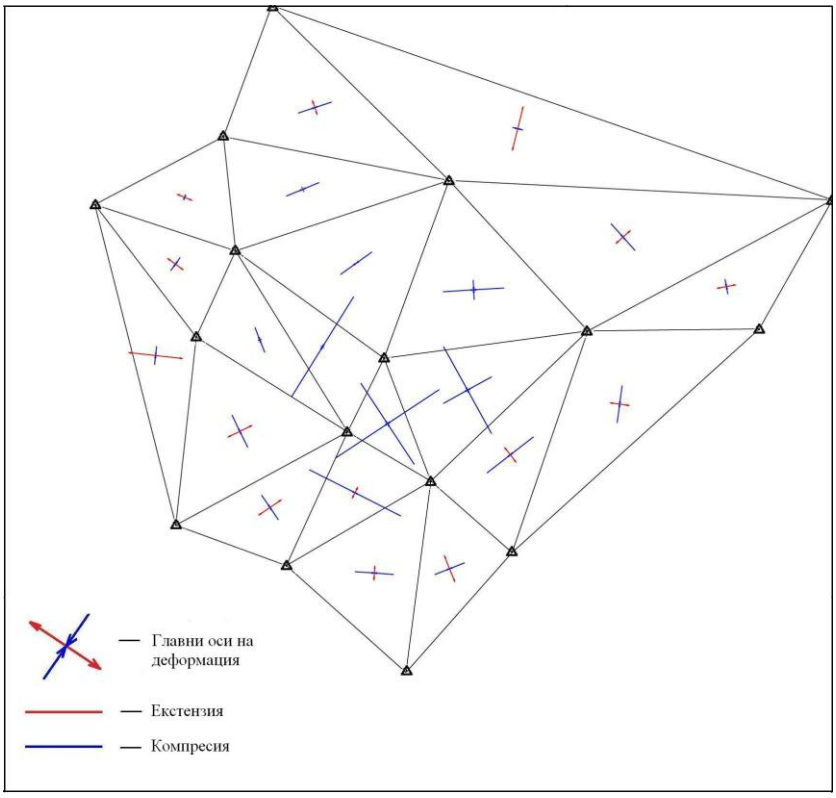
4. ГЕОКИНЕМАТИЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

4.1. Изследване на деформации в равнината

4.1.1. Мировско солно находище, Провадия

Мировското солно находище се намира на около 5 км югоизточно от град Провадия. Геодинамичният проект се състои от гъста мрежа от 26 стабилни стълба за наблюдение и много нивелачни репери, специално изградени, за да бъдат наблюдавани движения и деформации в зоната на находището, покриващи територия от 1km^2. Досега са извършени 37 комплексни прецизни измервания измервателни кампании след първоначалните наблюдения през 1990 г. Целта е да се изследва до каква степен извличането на солта е свързано с локалната сеизмична дейност, защото напоследък тук се наблюдават по-често земетресения и с нарастваща величина. Общата тенденция на деформациите на терена е потъване на централната зона и като страничен резултат скъсяване на разстоянието между центъра и външния контур на находището.

Като се приеме, че деформациите, настъпили между 2-рия и 37-ия цикъл, както и между 36-ия и 37-ия цикъл на измерването, са изотропни в границите на диференциалния триъгълник (краен елемент), методът на крайните елементи в равнината (виж раздел 2) е приложен за анализ на деформациите [2]. Същите стандартни площни елементи, представляващи непокриващи се триъгълници, се избират като крайни елементи. Координатите триангулачните точки на мрежата, получени от обработката на данните на съответните измервателни епохи, се използват като входни данни за изчисляване на деформациите. Деформациите на страните на триъгълниците, главните деформации a и b (фиг. 2) и посоките на главните деформации a (α_a) се изчисляват за всеки краен елемент чрез прилагане на теорията, представена в раздел 2.



Фиг. 2. Главни деформации на екстензия (червено) и компресия (синьо) за периода 1990-2016 г.

Анализът на получените деформации показва, че има деформации както на разтягане (разширяване), така и на свиване (компресия). В централната част на находището има предимно деформации на компресия и техните стойности са най-големи. В периферните части деформациите са от двата вида и те са по-малки.
За периода 1990-2016 г. най-големи деформации (повече от 50.10^{-5} или над 5.10^{-4}), които са близки до критичните, се срещат за крайни елементи, разположени в централната част на находището. По-малки, но съществени (между 1.10^{-4} и 5.10^{-4}) са деформациите в повечето от крайните елементи. Сред тях има периферни крайни елементи, но повечето от тях са в централната зона. Деформации под или равни на 1.10^{-4} (или под 10.10^{-5}) могат да се считат за незначителни. Те се отнасят до елементите, които обикновено се намират в периферните части на обекта.

4.1.2. АЕЦ "Козлодуй"

АЕЦ "Козлодуй" е разположена на 120 км северно от София и на 5 км източно от Козлодуй.

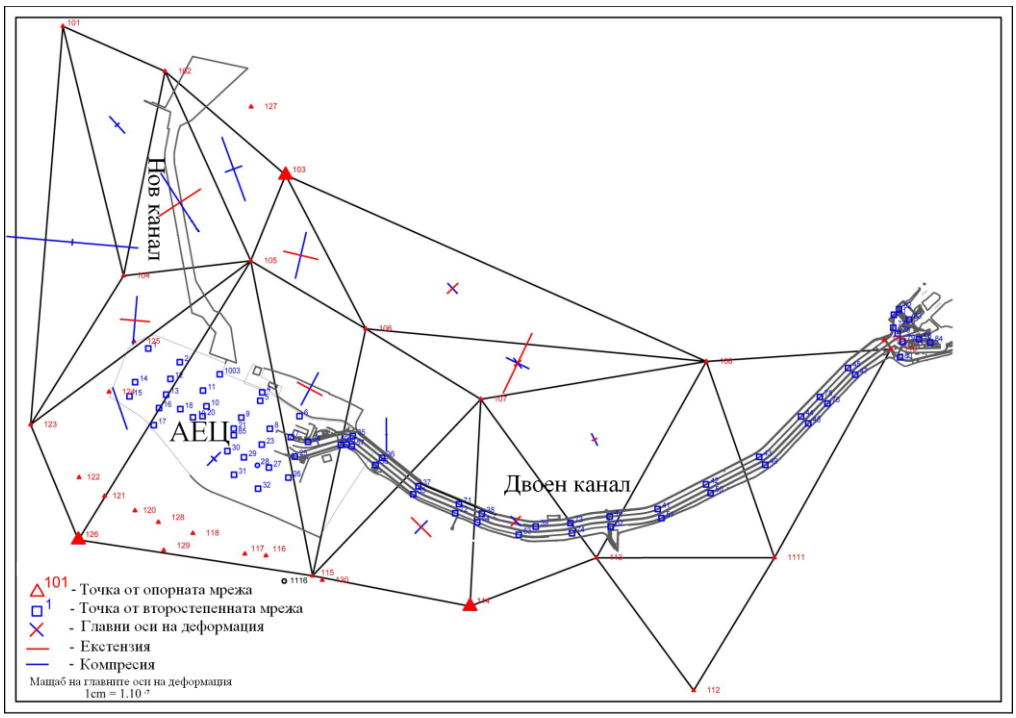
Една от основните цели на системата за геодезическо изследване е мониторинг на преместванията и деформациите в равнината, които могат да възникнат в съоръженията, върху терена под тях и върху околния терен. Резултатите от геодезическото наблюдение могат да се използват за предсказване и предотвратяване на евентуални аварии.

Геодезическите измервания в района на АЕЦ "Козлодуй" започват през 1998 г. [1].

Структурата на цялата геодинамична мрежа според различните типове измервания може да се разглежда като съставена от четири отделни геодезически мрежи, обхващащи площ от 24 km^2 - GPS мрежа, хоризонтална триангулачна мрежа, хоризонтална трилатерачна мрежа, вертикална (нивелачна) мрежа.

Цялостни и интегрирани прецизни геодезически измервания на всички типове мрежи са извършени в 7 цикъла (1998, 2001, 2004, 2007, 2010, 2016). Хоризонталните и вертикалните движения са изчислени от получените премествания.

Методът на крайните елементи в равнината е приложен при същите предпоставки, както при предходното изследване на този раздел. Относителните деформации на страните на всеки краен елемент и главните деформации с посоките им за всеки краен елемент са изчислени от изравнените равнинни координати на триангулачните точки [13]. Получените главни оси на деформации между 1-ва и 5-та епохи на измерване са показани на фиг. 3.



Фиг. 3: Главни оси на деформации на основната геодезическа мрежа между 1-ви и 5-ти цикъл

Хоризонталните движения на мрежата, която обхваща само района на АЕЦ, са по-малки от 20mm с посоки най-вече на югоизток. Максималната деформация на почти всички крайни елементи е под 10^{-4}, но за много от тях те са дори под 10^{-5}. Деформациите са разнообразни по характер и посока.

Резултатите от анализа показват, че установените деформации са както на разтягане, така и на компресия. Има участъци, при които деформациите са само на разтягане или само на компресия. Посоките на главните оси на деформация са различни. Това означава лека промяна в пространството и времето на количествените и качествените характеристики между епохите или че е налице постоянно преразпределение на интензивността и естеството на деформационните процеси в региона.

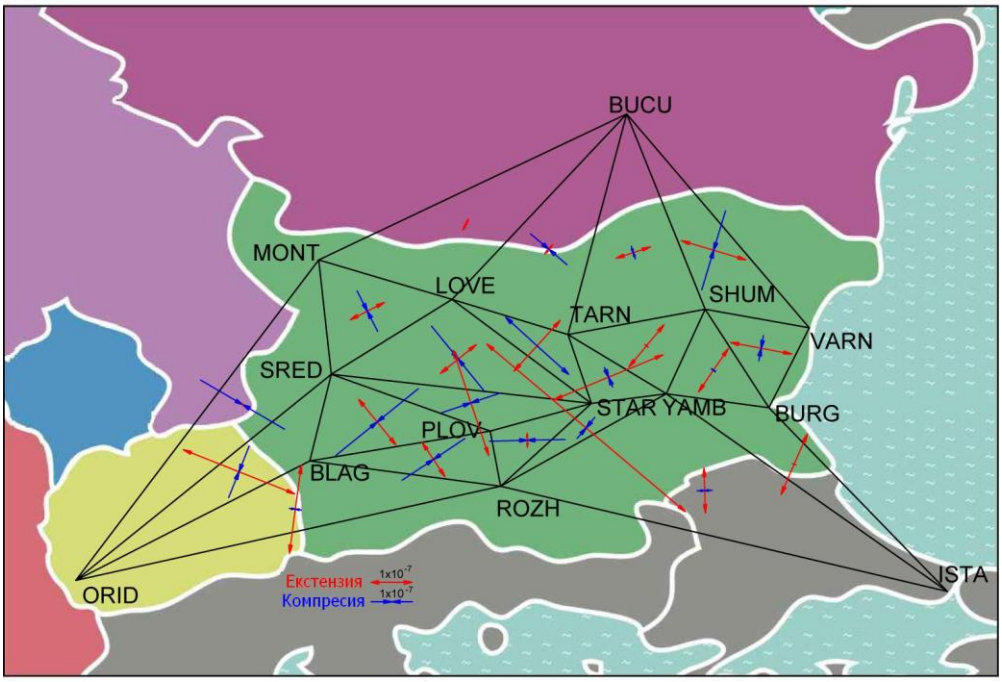
Последните получени резултати потвърждават отново вече установените равнинни деформации – по големина, посока и тип на деформациите.

4.2. Изследване на деформации в пространството

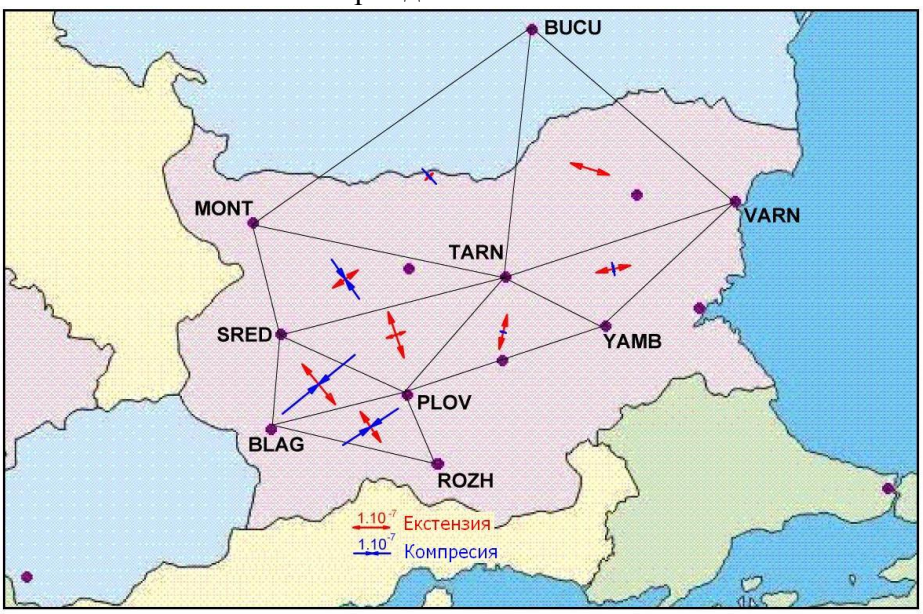
4.2.1. 3D приложение на МКЕ за територията на България

Територията на България се намира в активна геодинамична зона, както е известно. За пръв път за територията на България е приложен разработеният метод на крайните елементи за големи територии [14], [15]. Крайните елементи са конфигурирани с използване на всички станции от референтната GNSS мрежа BULiPOS [3] на територията на България и най-близките три станции IGS - Bucu, Ista, Orid, както в [15].

Относителните деформации на страните на триъгълниците и относителните главни деформации на компресия и екстензия на всеки краен елемент са преизчислени по формулите (12) и (13) и (14) за периода 2009-2013 г. в два варианта. Първият включва всички налични станции, а вторият - само част от станциите. Получените главни деформации (големини и посоки) са показани съответно на фиг. 4 и на фиг. 5.



Фиг. 4. Главни деформации на крайните елементи, конфигурирани с всички GNSS станции за периода 2009-2013 г.



Фиг. 5. Главни деформации на крайни елементи, конфигурирани с част от GNSS станциите за периода 2009-2013 г.

Най-малките относителни главни деформации на компресия и за двата варианта са между $0{,}2.10^{-7} \div 0{,}4.10^{-7}$, а най-големите са между $0{,}6.10^{-7} \div 1{,}3.10^{-7}$. Деформациите на екстензия варират между $0{,}1.10^{-7} \div 0{,}7.10^{-7}$ за случая с редуцирания брой на крайните елементи и между $0{,}2.10^{-7} \div 1{,}4.10^{-7}$ за случая с всички GNSS станции. Деформациите, получени за случая с всички GNSS станции показват екстензия в южна България със различни посоки. В югозападна България посоките са североизток-югозапад, в централната част те са в северозапад-югоизток, а на изток посоките на екстензия са североизток-югозапад. Деформациите на компресия са предимно североизток-югозапад. В северна България деформациите на екстензия са в посока североизток-югозапад за западната и

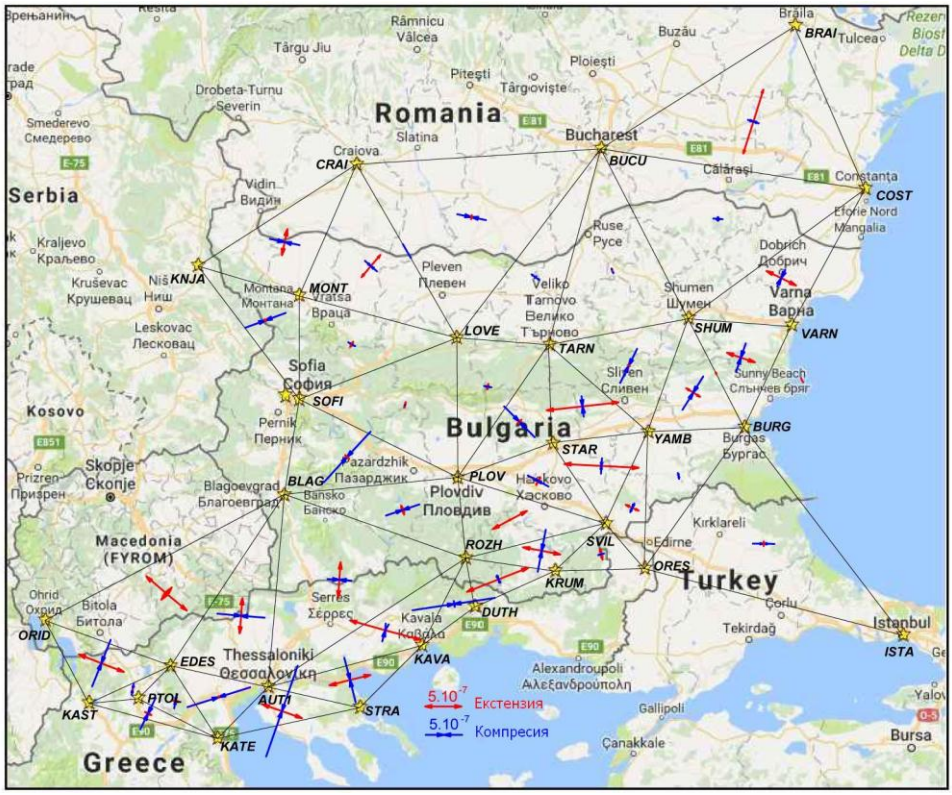
централната ѝ част, а за най-източната част те са в посока северозапад-югоизток. Съответно за тези части компресията е в посока северозапад-югоизток, а за най-източната - североизток-югозапад. Подобни са деформациите, получени за случая с редуциран брой на крайните елементи.

4.2.2. 3D приложение на МКЕ за територията на Балканския полуостров

Територията на Балканския полуостров като активна тектонска зона е изследвана по различни геофизични, геоложки и геодезични методи и подходи [5], [8], [9], [10], [11]. В това изследване, анализът и интерпретирането на резултатите от обработката на GNSS данните и разработеният от авторите метод на крайните елементи за пространството са приложени за територията на Балканския полуостров в периода 2011-2016 г. [14], [15]. Изследваната територия е покрита от 33 перманентни GNSS станции. Единадесет перманентни IGS GNSS станции са включени като референтни. Оценените от изравнението координати и компоненти на скоростта на движение на всички станции в системата ITRF2008, трансформирани в ETRF2000, са използвани за анализ на деформациите. За три станции получените резултати за хоризонталните скорости не са надеждни и не са използвани за по-нататъшен анализ.

Крайните елементи са конфигурирани в два варианта, включващи различен брой от общия брой GNSS станции.

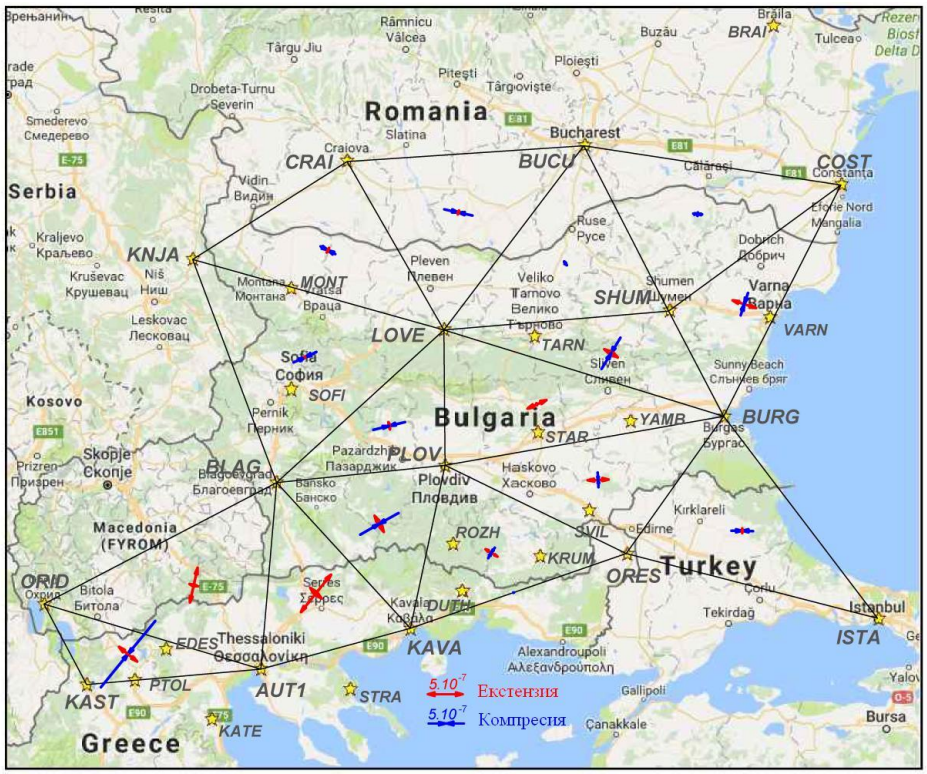
За периода от пет години 2011-2016 г. са определени три основни типа деформации: преместване на станциите, относителни деформации на страните и относителни главни деформации на крайните елементи. Повърхностните движения се представят най-добре от относителните славни деформации. Случаят на изследване с участието на всичките 30 GNSS станции е показан на фиг. 6.



Фиг. 6. Относителни главни деформации за периода 2011-2016 г., включващ 30 GNSS станции

За случая на участие на всички 30 GNSS станции получените деформации на Мизийската плоча са преобладаващо на компресия (синьо) с посоки предимно северозапад-югоизток, като големината им намалява от запад на изток ($2{,}1.10^{-7} \div 0{,}2.10^{-7}$, съответстващи на 2,1÷0,2mm на 10 km. Получените деформации на екстензия (червено) в посока северозапад-югоизток около станциите във Варна и Бургас, близо до Черноморското крайбрежие, са приблизително еднакви по големина с тези на компресия (североизток-югозапад). За централната южна част на България са получени деформации на екстензия в посока запад-изток до югозапад-североизток. В най-югозападната част на България и в западната част на Балканите получената екстензия е предимно север-юг до североизток-югозапад. Северна Гърция показва предимно деформации на компресия (от $1{,}0.10^{-7}$ до $6{,}6.10^{-7}$) в посока североизток-югозапад до почти изток-запад, като в района на Халкидики и западно от него компресията приема посока североизток-югозапад.

При случаят на изследване с участието на 14 GNSS станции, крайните елементи образуват приблизително равностранни триъгълници с приблизително равни площи и не се припокриват.



Фиг. 7. Относителни главни деформации за периода 2011-2016 г. с участието на 14 GNSS станции

Относителните главни деформации на всеки краен елемент, получени от формули (13), (14) за случая на 14 участващи GNSS станции, са показани на фиг. 7.

Деформациите в северна България за периода 2011-2016 г. са предимно на компресия от $0{,}4.10^{-7} \div 2{,}0.10^{-7}$ (еквивалентни на 0,4÷2,0mm на 10km), а посоките са предимно северозапад-югоизток. Относителните главни деформации на компресия в посока североизток-югозапад в североизточната част на района, близо до северното Черноморие, са приблизително същите като тези на тяхната екстензия (северозапад-югоизток). Резултатите за западната част на Балканите, между станциите Knja, Love, Plov, Kava и Blag и за най-югоизточната част показват деформации на компресия в посока югозапад-североизток, респективно запад-изток. Главните деформации на най-западната и югозападната част на

Балканите, обхващащи северна и северозападна Гърция, южна Македония и югозападна България, се показват екстензия във всички посоки между $1{,}1.10^{-7}$ и $3{,}4.10^{-7}$.

5. АНАЛИЗ И ДИСКУСИЯ

Резултатите от двудименсионалните приложения на МКЕ за райони с малки площи се потвърждават от дългогодишните изследвания на тези райони. Последната обработка на данните за Мировското солно находище в Провадия, обхващаща 26 години изследване, потвърждава установените по-рано видове и тенденции на определените деформации в равнината и те недвусмислено показват успешно геокинематично приложение на МКЕ.

Анализът на интегрираните прецизни геодезически измервания и обработката на всички видове мрежи в района на АЕЦ "Козлодуй" в рамките на 18 години показва, че в района на АЕЦ "Козлодуй" се наблюдава процес на деформация, който е бавен и има променлив характер. Определените движения показват възможни слаби геодинамични процеси и явления. Вертикалните премествания не са от същия порядък, както хоризонталните - вертикалните са почти с порядък по-малки. Деформациите, установени между съседните епохи, са далеч под критичните стойности.

Методът на крайните елементи в пространството е приложен за първи път за анализ на деформации за цялата територия на България. Въз основа на получените резултати могат да се определят потенциални области на компресия и екстензия, но не съвсем ясно. Случаят с включване на всички налични GNSS станции (фиг. 4), с оглед на използване на пълната информация от обработката на GNSS данните, не е напълно подходящ за получаване на ясна картина на деформациите, поради образуването на не малък брой тъпоъгълни триъгълници и с различни площи. Получените деформации на повечето триъгълници се смесени и е трудно да се разграничат ясни области на компресия или екстензия. След редуциране на броя на станциите въз основа на основното изискване на МКЕ - равностранни триъгълници с приблизително еднакви площи (фиг. 5), картината на деформациите е обобщена и по-ясна, като тенденциите на екстензия и компресия са запазват, както тези с използването на всички 30 GNSS станции.

Същият принцип на конфигуриране на крайните елементи за територията на България е приет в случая на изследване, отнасящ се до територията на Балканския полуостров - с участието на всички GNSS станции и с редуциран брой GNSS станции (фиг. 6 и фиг. 7). Получават се подобни резултати. Случаят с редуцирани крайни елементи (фиг. 7) представя геокинематиката на региона, близка до други геофизични и геодинамични изследвания. Трябва да се отбележи, че предложените области на екстензия и компресия чрез метода на крайните елементи и техният анализ представят математично-геометрична интерпретация на движенията на Балканския регион.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализът на деформациите на изследваните малки територии от приложението на метода на крайните елементи за равнината за относително дълъг период от време (18 до 26 години) потвърждава тяхната тенденция, която е в съответствие с геотектонската обстановка на районите и този метод може да се използва успешно.

За големи територии, разработеният от авторите метод на крайните елементи за пространство и приложен за територията на България и Балканския полуостров, дава много смесена картина на деформациите. Трябва да се отбележи, че определените области на екстензия и компресия и техният анализ представят математично-геометрична интерпретация на движенията на тези големи региони. За по-ясна деформационна картина трябва да се включат повече станции, като за конфигурирането на крайните елементи да

бъдат внимателно подбрани онези от тях, които отговарят освен на основните изисквания на МКЕ, също така да се вземе предвид съвременната геотектоника на регионите.

7. ЛИТЕРАТУРА

1. Вълев, Г., Г. Райнов, И. Калчев. Изграждане на прецизна геодезическа мрежа на територията на атомната централа в Козлодуй. Геодезия, картография, земеустройство, 1999, 5-6, 5-10
2. Вълев, Г., Г. Райнов, К. Василева. Анализ на деформациите на Мировското солно находище от 26 години комплексни геодезически измервания. Геодезия, картография, земеустройство, 2017, 3-4, 2-9
3. Милев, Г., И. Милев. Основи, системи и технологии в Инженерната геодезия. София, СГЗБ, „Авангард“, 2017, 498
4. Bogusz, J., A. Klos, M. Figurski, M. Jarosinski, B. Kontny. Investigation of the reliability of local strain analysis by means of the triangle modelling. Acta Geodyn. Geomater., 2013, Vol. 10, No. 3 (171), 293–305
5. Burchfiel, B. C., R. W. King, A., Todosov, V., Kotzev, N., Dumurdzanov, T., Serafimovski, B., Nurce. GPS results for Macedonia and its importance for the tectonics of the Southern Balkan extensional regime, Tectonophysics, 2006, 413, 239–248
6. Deniz, I., H. Ozener. Estimation of strain accumulation of densification network in Northern Marmara Region, Turkey. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2010, 10, 2135–2143
7. Hu, Y., K. Wang, J. He, J. Klotz, G. Khazaradze. Three-dimensional viscoelastic finite element model for postseismic deformation of the great 1960 Chile earthquake. Journal of geophysical research, 2004, Vol. 109, B12403
8. Kotzev, V., R.W. King, B.C. Burchfiel, A. Todosov, B. Nurce, R. Nakov. Crustal motion and strain accumulation in the South Balkan Region Inferred from GPS Measurements, in Husebye, E., ed., Earthquake monitoring and seismic hazard mitigation in Balkan countries: Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Earthquake Monitoring and Seismic Hazard Mitigation in Balkan Countries, Borovetz, Bulgaria, 11–18 September 2005: NATO Science Series IV: Earth and Environmental Sciences. 2000, Volume 81, 19–43
9. Matev, K. GPS constrains on current tectonics of southwest Bulgaria, northern Greece and Albania. Thesis, Doctor of university of Grenoble, 2011, 203 pp.
10. Reilinger, R., S. McClusky, D. Paradissis, S. Ergintav, Ph. Vernant. Geodetic constraints on the tectonic evolution of the Aegean region and strain accumulation along the Hellenic subduction zone. Tectonophysics, 2010, 488, 22–30
11. Stangl, G., Ph. Mitterschiffthaler. A GNSS-derived Velocity Field of the Southern Balkan Peninsula. Geophysical Research Abstracts, 2015, Vol. 17, EGU2015-8362, EGU General Assembly 2015
12. Valev, G., P. Kastreva. Stress strain analysis of the Balkan Peninsula. Balkan Peninsula monograph, Reports on Geodesy, Warsaw University of Technology, 2006, No 5(80), 597-605.
13. Valev, G., G. Rainov, K., Vassileva. Geodetic measurements in the area of Kozloduy Nuclear Power Plant. Coordinates, 2016, Vol. XII, Issue 8, 37-40
14. Vassileva, K., G. Valev. Application of Finite Elements Method in space for deformation analysis of the territory of Bulgaria, Proceedings of the 8-th Congress of the Balkan Geophysical Society, 4-8 October, Crete, Chania, Greece, 2015, 5p. art. N. 26716
15. Vassileva, K., G. Valev. Deformation analysis of the Territory of Bulgaria from GNSS observations. Coordinates, 2015, Vol. XI, Issue 12, 12-15.

АВТОРИ:

Проф. д.т.н. Георги Вълев –
Шуменски университет
„Константин Преславски „
ул. Университетска 115
9712 Шумен
България
e-mail: georgvalev@abv.bg

Проф. д-р инж. Керанка Василева –
Европейски политехнически университет, Перник
Доц**.** д-р инж. – НИГГГ, БАН
Ул. „Академик Г. Бончев”, Бл. 3, 413
1113 София,
България
e-mail:keranka.vassileva@gmail.com, ker@bas.bg