

РАЧУНАЊЕ R - ФАКТОРА (ФАКТОР ЕРОЗИВНЕ ЕНЕГИЈЕ КИШЕ) ЗА ПОТРЕБЕ МОДЕЛИРАЊА ГУБИТАКА ЗЕМЉИШТА ПОМОЋУ РУСЛЕ МЕТОДЕ НА ОСНОВУ ГОДИШЊИХ ПАДАВИНА

Иван Блинков¹, Иван Минчев¹, Божин Трендафилов¹

¹Универзитет “Св.Кирил и Методиј Скопје” – Факултет за шумарски науки, пејзажна архитектура и екоинженеринг “Ханс Ем” – Скопје, Катедра за земјиште и вода

ИЗВОД: УСЛЕ/РУСЛЕ метода је најкоришћенија метода у свету за рачунање интензитета ерозије изражено као губитак земљишта. Последњих година урађена је карта губитака земљишта ЕУ по овој методи.. Један од кључних параметра за примену РУСЛЕ методе је R – фактор ерозивне енергије кише за ког је направљена и глобална светска карта-модел. У Републици Северна Македонија нису доступни подаци да би се користио оригинални приступ за прорачун овог фактора. Зато је коришћен приступ на основу годишњих падавина. Анализиране су више доступних једначина из раличитих крајева света. Прорачун је израђен за 17 плувиометриских станица у држави, а затим је извршено моделирање за целу државу на основу надморске всиине. Просечна вредност R – фактора у држави износи 533 ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$), а креће се од 437 ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) у околини Криволака у централном делу државе, па до 835 ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) на југозападном делу Шар Планине и Кораба. Компарација добијених вредности са резултатима за пограничне делове и високе планине у Грчкој и Бугарској, показала је да су реални и омогућавају њихову даљу примену у финалном моделирању за израду карте губитака земљишта у Републици Северној Македонија помоћу РУСЛЕ методе.

Кључне речи: ерозија, губици земљишта, РУСЛЕ, R - фактор

CALCULATION OF THE R - FACTOR (THE RAINFALL EROSIVITY FACTOR) FOR THE NEEDS OF MODELING SOIL LOSSES USING THE RUSLE METHOD, BASED ON ANNUAL PRECIPITATION

ABSTRACT: The USLE / RUSLE method is the most widely used method in the world for calculating erosion intensity expressed as soil loss. IN the latest period, a map of soil loss EU was made by this method. One of the key parameters for applying the RUSLE method is the R - erosive energy factor for which a global world map model has been created too. In the Republic of North Macedonia there are no available data to use original access for calculation this factor. That is why the approach is based on the annual precipitations. Several equations developed in different parts of the world were analyzed. Calculation was done for data from 17 gauges stations in the country, and at the same time modeling has been done for the whole country on the basis of altitude. Comparison of the obtained values with the results for the border areas and high mountains in Greece and Bulgaria, showed that they are realistic and enable o be further applied in the final modeling for creation of Soil Loss map in the Republic of North Macedonia using RUSLE method. Average R - factor in states amounts to 533 ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$), and rises from 437 ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) in Krivolaka district in the central part of the country, to 835 ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) in the southwestern part of Shar Planina and Korab mountains.

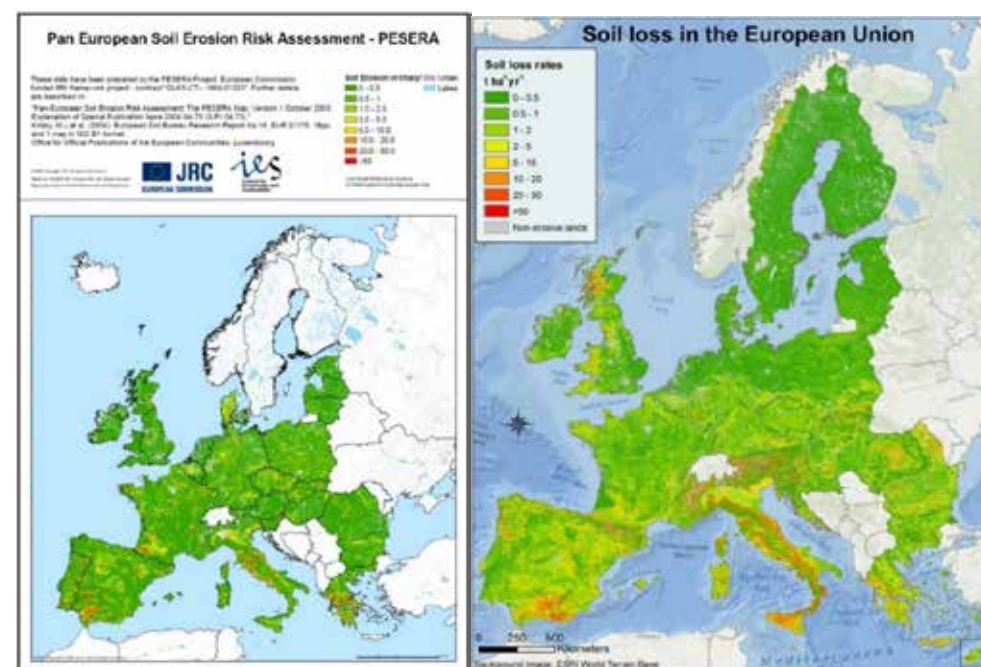
Keywords: erosion, soil losses, RUSLE, R-factor

1. УВОД

Постоје различите методе за оцену интензитета ерозије у свету. Све ове методе се разликују по својим карактеристикама и применљивости. Све већ развијене методе и приступи унапређени су у последњем периоду коришћењем геопросторних база података развијених коришћењем ГИС технологије. У свету најраширенија метода са рачунање интензитета ерозије(губици земљишта) је УСЛЕ (Universal Soil Loss Equation) са варијантама РУСЛЕ и МУСЛЕ.

Постоје 2 карте ерозије Европске уније:

- 2003 - Киркби и сарадници, ПЕСЕРА пројекат (Pan-European Soil Erosion Risk Assessment) користећи УСЛЕ метод I
- 2015 – Панагос и сарадници, користећи RUSLE.



Слика 1. Карта губитака земљишта ЕУ, Киркби 2003 и Панагос 2015
Figure 1. Map of soil loss in EU, Kirkby 2003 and Panagos 2015

Ко што се види на овим картама недостају подаци за земље Западног Балкана. Обе карте су израђене на основу моделирања помоћу УСЛЕ/РУСЛЕ методе. Основна једначина је

$$E = R K C L S P$$

E: просечни годишњи губици земљишта ($\text{t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$),
R: фактор ерозивности кише ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$),

K: фактор еродибилности земљишта ($t\ ha\ h\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$),
 C: фактор покривности и управљања земљиштем (бездимензионалан),
 LS: топографски фактор -дужина и нагиб падина (бездимензионалан)) и
 P: фактор противероиних радова (бездимензионалан).

Панагос и сар. (2014-15) развили су приступ за моделирање ерозије земљишта ЕУ користећи РУСЛЕ методу. Идеја је била да се користе већ развијене неопходне базе података на европском нивоу (Corine LCU, подаци о земљишту, климатски подаци, топографски подаци) и да се вредности сваког параметра усвоје у класификације у поменућу базу података.

Теоретски осврт

R factor - оригинално рачунање

R - фактор је производ кинетичке енергије падавина (E) и максимални 30 минутни интензитет (I_{30}) (Brown and Foster, 1987):

$$R = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{m_j} (EI30)k$$

R - просечна годишња ерозивност падавина ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ yr^{-1}$),

n - број година за које су коришћени подаци,

m_j - број ерозивних случајева у некој години (j)

EI30 - ерозивни индекс јединачног догађаја (k)

$$EI30 = \left(\sum_{r=1}^0 e_r v_r \right) I_{30}$$

где је :

e_r - јединачна енергија кише ($MJ\ ha^{-1}\ mm^{-1}$)

v_r - количина пале кише (mm) за време периода одређеног -r-,

I_{30} - максимални интензитет кише за време 30-минутног кишног догађаја ($mm\ h^{-1}$).

Вредност јединачне енергије кише рачуна се за сваки временски интервал

(Brown and Foster, 1987). $e_r = 0,29 [1 - 0,722 \exp(-0,05 i_r)]$ где је

i_r - интензитет кише у одређеном периоду [$mm\ h^{-1}$]

Рачунање R - фактора захтева идентификацију ерозивне енерије кише за сваки јединачни догађај посебно и на свим метеоролошким станицама. Три критеријума за идентификацију ерозивног кишног догађаја дају Renard et al. (1997):

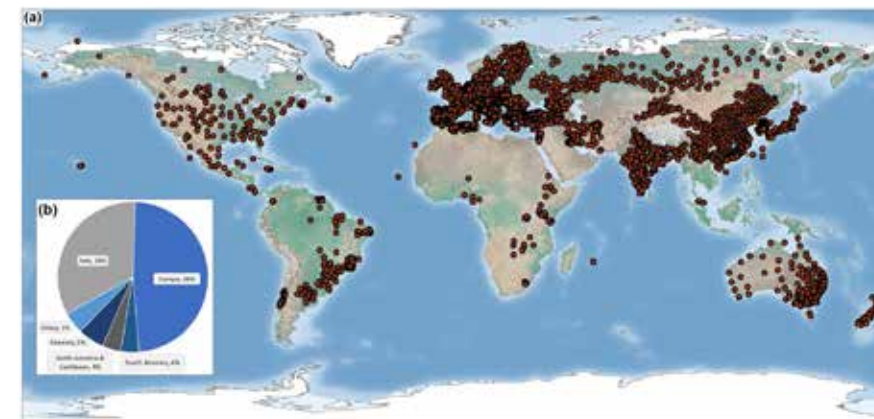
а) кумулативне падавине догађаја већи од 12,7 mm, или

б) догађај који има најмање један пик већи од 6,35 mm током периода од 15 минута или в) 12,7 mm у периоду од 30 мин.

Акумулација падавина мање од 1,27 mm током периода од 6 часа дели дужи период олује на две олује. Праг од 12,7 mm дефинише падавине које имају ерозивну моћ. Постоји и софтверска алатка за сумирање интензитета падавина (RIST software), USDA 2014.

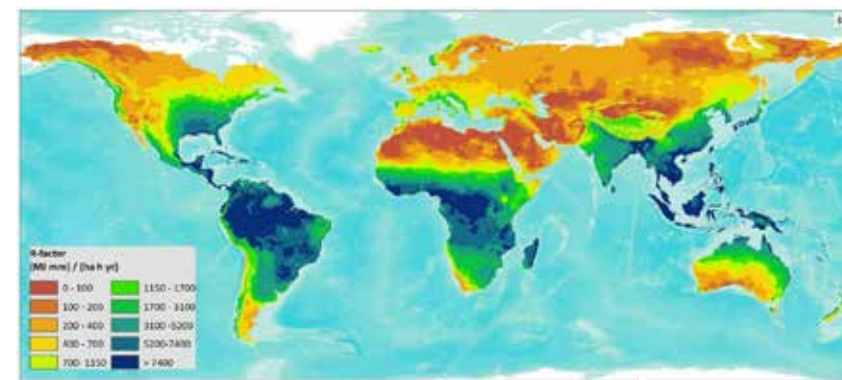
Подаци о R - фактору на глобалном нивоу

Панагос и сарадници (2017) су израдили глобални светски модел ерозивне енергије кише – глобални светски R - фактор. За тај циљ су користили доступне податке са 3,625 плувиометријских станица у 63 државе раширене по целом свету, а највише у Европи.



Слика 2. Распоред кишимерних станица коришћених за израду глобалног модела
 Figure 2. Distribution of rainfall stations used to create global model

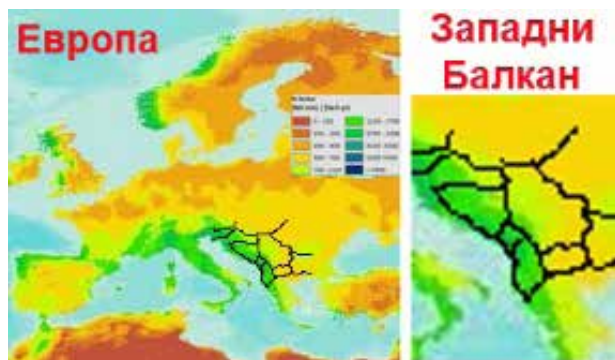
Прецизност модела износи 30 arc.sec и (~1 km) на основу Гаусовог регресионог модела, а карта је генерирана у ESRI ArcGIS ver. 10.4. Балканске државе у које има података за рачунање R – фактора су: Турска, Грчка, Бугарска, Румунија, Мађарска, Хрватска и Словенија, док за Северну Македонију, Србију, Црну Гору, БиХ и Албанију нема релевантних података.



Слика 3. Карта глобалне ерозивне енергије падавина (Панагос П., и сар. 2017)
 Figure 3. Global R – factor map (Panagos et al, 2017)

Глобално, средња ерозивна енергија падавина износи $2.190\ (MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ yr^{-1})$, са највишим вредностима у Јужној Америци и земљама Кариба, Централној и источној Африци и југоисточној Азији. Најниже вредности се углавном налазе у Канади, Руској Федерацији, Северној Европи, Северна Африка и Блиски исток.

Средња вредност фактора ерозивне енергије кише за ЕУ са Швајцарском износи 722 ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$), са највећим вредностима у Медитерану од 1000 ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) а најнижим у Нордиским земљама од 500 ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$).



Слика 4. Карта ерозивне енергије падавина (R-фактор) Европе и Западног Балкана (Панагос П., и сар. 2017)

Figure 4. Map of rainfall erosivity (R – factor) of Europe and Western Balkan (Panagos et al 2017)

За земље ЕУ има и националних вредности за остале нема. Са карте на слици 5 за Западни Балкан, оцењује се да се вредности R-фактор крећу:

- Северна Македонија - генерално 400-700 а у западном планинском делу државе дуж границе са Албанијом су највише и у распону 700- 1150 ,
- Србија - јужна, југоисточна и источна Србија као и око границе са Румунијом и Мађарском 400-700, централна Србији и већи део Војводине 700-1150, док у Западној Србији су вредности највише иду и преко 1150.
- Албанија и Црна Гора – генерално 1150- 1700 а на одређеним деловима поред мора и до 3000
- Босна и Херцеговина – североисточни део 700 -1150, западни део од 1150-1700, а југоисточни део углавном Херцеговина и до 3150.

Треба да се узме у обзир да су ове вредности непрецизне и служе само оријентационо и за глобално моделирање.

2. ЦИЉ И МЕТОДОЛОГИЈА РАДА

У оквиру GEF – UNEP пројекта “Preparation of soil erosion and drought vulnerability map, and identification of high-risk zones and their impact to biodiversity”, један од задатака је био израда Карте ерозије Северне Македоније помоћу RUSLE методе. Приликом рада, пројектни тим се је суочио са проблемом око одређивања неколико фактора за које најлакше пронађено решење, али најсложеније је било како одредити R – фактор.

R фактор је најпроблематичнији и можда је кључни фактор у прорачуну губитка земљишта по RUSLE методи у земљама у свету, које још увек немају доступне детаљне податке о интензитету падавина.

С обзиром да не постоје релевантни подаци са кишомерних станица у држави, које могу да се користе за моделирање овог R фактора приступљено је алтернативним методом.

Разни научници су спровели многе студије како би проценили R-фактор на основу доступних података о годишњим или месечним падавинама.

Методологија рада састојила се од неколико поступака:

- Анализа литературних података о методама и формулама за одређивање R – фактора на основу годишњих падавина,
- Сакупљање података од месечним и годишњим падавинама за вишегодишњи период за све плувиометриске станице у држави,
- Рачунање R- фактора по свим пронађеним формулама,
- Компарација добијених резултата са оријентационим из глобалне карте,
- Селекција тзв. “подобних” формула и резултата и рачунање аритметичке средине од вредности добијених користећи “подобне” формуле, на свим станицама,
- Моделирање - интерполација R фактора на нивоу државе користећу линиску регресију за корелацију $R = f(H)$ где је H -надморска висина и
- Контрола добијених резултата са оријентационим резултатима из глобалне карте света за R – фактор (Панагос и сар. 2017) као и са детаљнијом картом израђена за ЕУ (Панагос и сар.2015), а као оријентир су узете вредности региона у Грчкој и Бугарској које граниче са Северном Македонијом.

Моделирање је урађено у ГИС окружењу користећи Q GIS.

3. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

У Републици Северна Македонија постоје 144 кишомерних станица. Већи део су у моменту нефункционалне. Поред тога, има и доста прекида мерења и празнина у низовима података, а за велики део станица постоје само подаци на папиру. После разговора и препорука колега из хидрометеоролошке управе фокусирали смо се на 17 плувиометриских станица за које су одређене суме годишњих падавина као и сума падавина у вегетацијском периоду (мај-октобар) за период 1951-2018. Ови резултати су приказани у табели 1

Табела 1. Сума годишњих падавина и падавина у вегетацијском периоду на 17 плувиометриских станица у Северној Македонији за период 1951-2018
Table 1. Mean annual precipitations and precipitations in vegetative period on 17 pluviometric stations in North Macedonia for the period 1951-2018

Станица	Годишња сума падавина P - mm	Падавине у вегетацијском периоду Pv - mm
Штип	455,1	287,0
Скопје	478,6	287,9
Прилеп	510,1	307,6
Демир Капија	554,8	281,5
Струмица	564,4	311,4
Претор	594,1	304,4

Берово	611,1	378,1
Битола	619,9	321,6
Крива Паланка	624,7	395,0
Гевгелија	678,6	334,1
Охрид	689,9	335,6
Н. Дојран	700,0	393,5
Солунска Глава	838,6	485,6
Крушево	881,3	457,9
Попова Шапка	883,4	530,1
Маврово	993,5	467,7
Лазарополе	1060,4	504,6

Следећи корак је рачунање R – фактора по свим пронађеним расположивим формулама, и компарација са вредностима за Северну Македонију са глобалне карте.

Све формуле су проверене на свим станицама у Северној Македонији али неке дају по мишљењу тима нереалне вредности - Bols (153-360), Roswell (919 – 3589), Mihalik (269-4341), Torn (1520-4178) итд., које се значајно раликују од оних оријентационих. Зато су одбачене за даље рачунање.

У следећој табели су представљене прихваћене формуле за прорачун R-фактора на основу годишњих падавина (P) или падавина у вегетативном периоду (Ps) пронађених у различитим студијама.

Табела 2. Формуле за рачунање ерозивне енергије кише на основу годишњих падавина
Table 2. Equations for calculation R factor based on mean annual precipitations

Аутор	Y Година	Формула	Регион
Bois	1978	$R = 2.5 P^2 / 100 (0.073P + 0.73)$	
Mikhailova, Bryant, Schwager, Smith	1997	$R = -3172 + 7.562P$	Honduras
Torri et al	2006	$R = -944 + 3.08P$	USA (continental)
Renard, Fremund,	1994	$R = 0.04830 P^{1.51}$	
Yu and Rosewell	1996	$R = 0.0438 P^{1.61}$	Australia
Torri et all	2006	$R = -944 + 3.08P$	Malaysia
Zacchi		$R = (1,1 - 1,5) P$	Italia - Tuscany
Hurni	1985	$R = 0,55 * P - 24,7$	Ethiopia, Egypt
Sung	1981	$R = 79 + 0,363 * P$	Entire India
Rambabu	1979	$R = 81,5 + 0,375 * P$	India
Eltaiif	2010	$R = 23,61 * e^{(0,048 * P)}$	Jordan
Harper	1987	$R = 38,5 + 0,35 * P$	Thailand
Rogler & Schwertmann	1981	$R = 10 (-1,48 + 1,48 * Ps)$	Germany - Bavaria

R – ерозивна енергија кише,

P – сума годишњих падавина Ps – сума падавина у вегетацијском периоду,

e – Неперов број

Формуле из табеле 2 су прихваћене за рачунање R – фактора на основу просечних вредности на 17 плувиометрских станица у држави за период 1951-2018.

Након прерачунавања R – фактора на свакој станици по свим прихватљивиим формулама, једноставно је израчуната и аритметичка средина овог фактора за сваку станицу.

Табела 3. R – фактор за све плувиометријске станице
Table 3. R-factor for all pluviometric stations

Плувиометриска Станица	Падавине [mm]		R – фактор [MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹ yr ⁻¹]			
	P	Ps	Просечни	min	max	StDev
Штип	455,1	287	389	198	693	205
Скопје	478,6	287,9	403	206	695	209
Прилеп	510,1	307,6	428	217	744	225
Демир Капија	554,8	281,5	445	233	721	219
Струмица	564,4	311,4	461	236	753	235
Претор	594,1	304,4	476	246	772	238
Берово	611,1	378,1	511	252	918	280
Битола	619,9	321,6	497	255	806	251
Крива Паланка	624,7	395	525	257	960	292
Гевгелија	678,6	334,1	535	276	882	270
Охрид	689,9	335,6	542	280	897	273
Н. Дојран	700,0	393,5	569	284	956	302
Солунска Глава	838,6	485,6	682	332	1183	375
Крушево	881,3	457,9	697	347	1146	369

Следећи корак је моделирање на нивоу државе.

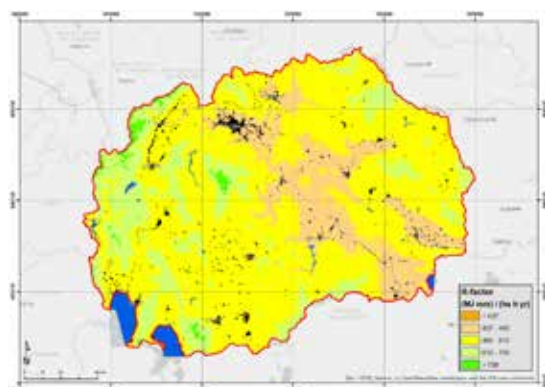
Главни улаз за модел била су надморска висина плувиометриске станице и вредност за R-фактор. Затим је направљена линеарна регресија и квалитет модела је оцењен коришћењем r – (коефицијента корелације).

Излаз модела је била једначина линеарне регресије као функција R-фактора и надморске висине т.ј.

$$y = 0,1471x + 431,57 \text{ или } R = 0,1471H + 431,57$$

Вредност коефицијента корелације – r = 0,72 – јака линеарна корелација узбрдо. Следећи корак је био имплементација добијене функције у континуалну карту. Користећи растерски калкулатор у ГИС окружењу, добијене једначине су коришћене за израчунавање растерских континуираних слојева за целу државу.

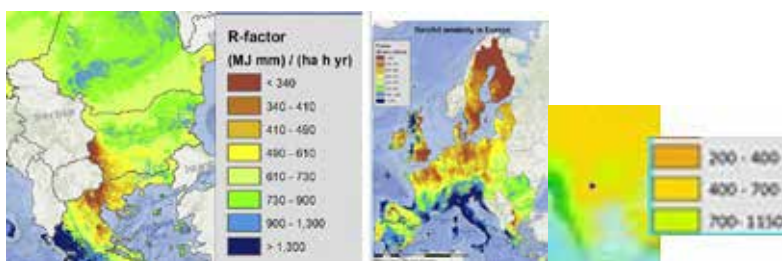
Добијен је следећи модел за R – фактор на нивоу државе.



Слика 5. R- фактор Северне Македоније
Figure 5. R-factor in North Macedonia

Просечна вредност R – фактора у држави износи 533, а креће се од 437 у околини Криволака у централном делу државе, па до 835 на југозападном делу Шар Планине и Кораба.

Следећи корак је компарација резултата са оним са глобалне карте као и са резултатима из Грчке и Бугарске.



Слика 6. Вредности R фактора – Панагос и сар. (2014,2015) и Панагос и сар. (2017)
Figure 6. Value of R factor (Panagos et al 2014,2015) and Panagos et al (2017)

Према Панагосу и сар. (2014, 2015), у Грчкој дуж границе, у западном делу вредности за R су између 400 и 600, док су у централном и источном делу између 340 – 490. Дуж Бугарске границе вредности су углавном између 410-490 и 490-610 док је у северном делу 340-410. На високим планинама ове вредности су веће. Према Глобалној R -карти (Панагос и сар., 2017), вредности у Северној Македонији су углавном између 400 -700, док су у западном делу земље > 700. За планинске делове у западном делу државе поред Албанске границе (где надморска висина достиже 2764 m – врх Кораб), као оријентир су узете вредности за планине: Рила - Бугарска (2935 m нв), као и Олимп – Грчка (2917 m нв), где је R – фактор 730-900 (по карти из 2014-5) или 700-1130 по карти из 2017.

Кад се упореде Панагосеви резултати са резултатима нашег модела може се утврдити да је модел карта за R – фактор Северне Македоније у складу са осталим резултатима.

4. ЗАКЉУЧАК

Овај рад је био први покушај моделирања R – фактора ерозивне енергије кише у Северној Македонији.

Добијени резултати после компарације са оним из глобалне карте израђене од Панагоса и сар., су усвојени као веродостојни и коришћени су за израду модела –карте губитака земљишта због ерозије (E), Северне Македоније по РУСЛЕ методу.

Овај приступ могу да користе и друге земље које немају податке о интензитету кише потребне за рачунање R – фактора по формулама Brown and Foster, 1987.

Признање –

Овај рад је израђен у оквиру пројекта “Preparation of soil erosion and drought vulnerability map, and identification of high-risk zones and their impact to biodiversity”, финансиран од стране GEF-a (Global Environment Facility), а имплементиран преко UNEP-a (United Nations Environment Programme).

5. ЛИТЕРАТУРА

Blinkov I., Trendafilov A., Muaketov D., Monevska Alcinova S., Stevkova S., Stevkov A., Mincev I., Trendafilov B., Пројекат “Preparation of soil erosion and drought vulnerability map, and identification of high-risk zones and their impact to biodiversity”, GEF-UNEP, 2021,

Brown, L. C. & Foster, G. R. Storm Erosivity Using Idealized Intensity Distributions. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* **30**, 379–386 (1987).

Kirkby, M. J., Gobin, A., & Irvine, B. 2003. Pan European Soil Erosion Risk Assessment. Deliverable 5: PESERA Model Strategy, Land Use and Vegetation Growth, European Soil Bureau. *eu soils. jrc. It.*

Panagos, P., Ballabio, C., Borrelli, P., Meusburger, K., Klik, A., et al., 2015a. Rainfall erosivity in Europe. *Science of Total Environment* 511, 801–814.

Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio C., Lugato E., Meusburger K., Montanarella, L., Alewell, C. (2015) The new assessment of soil loss by water erosion in Europe, *Environmental Science & Policy* 54 (2015) 438–447

Panagos P., Borrelli P., Meusburger K., Yu B., Klik A., Lim K.J., Yang J.E, Ni J., Miao C., Chattopadhyay N., Sadeghi S.H., Hazbavi Z., Zabihi M., Larionov G.A., Krasnov S.F., Garobets A., Levi Y., Erpul G., Birkel C., Hoyos N., Naipal V., Oliveira P.T.S., Bonilla C.A., Meddi M., Nel W., Dashti H., Boni M., Diodato N., Van Oost K., Nearing M.A., Ballabio C., 2017. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Scientific Reports* 7: 4175. DOI: 10.1038/s41598-017-04282-8.

Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K. & Yoder, D. C. *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. **703**, (US Government Printing Office Washington, DC, 1997).