

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

ШУМАРСКИ ФАКУЛТЕТ

Младен А Фуртула

**Утицај еколошких и енергетских  
фактора на коришћење чврстих  
дрвних горива у Србији**

докторска дисертација

Београд, 2014

UNIVERSITY OF BELGRADE

FACULTY OF FORESTRY

Mladen A Furtula

**The Impact of Ecological and Energy  
Factors on More Efficient Use of Solid  
Wood Fuels in Serbia**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2014

**Ментор:**

др Градимир Данон, редовни професор  
Универзитета у Београду-Шумарског факултета

**Чланови комисије:**

др Бранко Главоњић, редовни професор  
Универзитета у Београду-Шумарског факултета

др Бојана Клашња, научни саветник  
Универзитета у Новом Саду-Институт за низијско шумарство

др Борислав Грубор, научни саветник  
Универзитета у Београду-Нуклеарни институт „Винча“, Лабораторија за  
термотехнику и енергетику

др Мирко Коматина, редовни професор  
Универзитета у Београду-Машинског факултета

Датум одбране:

## Захвалница

Захваљујем се ментору професору Градимиру Данону на свесрдној помоћи у изради докторске дисертације и стрпљењу које је имао.

Захваљујем се Комисији: др Бранку Главоњићу, др Бојани Клашњи, др Бориславу Грубору и др Мирку Коматини и на добрим сугестијама и саветима како би ова дисертација била боља.

Захвалност дугујем Милицы Перић на помоћи при раду на анализи животног циклуса. Захваљујем се Момчилу Радоњићу, Игору Иликићу и Живку Видићу за податке из производњи пелета. Хвала Бојану Груичком и Светлани Савић за податке о котловима.

Захваљујем се мојим другарима и колегама Ранку, Александру, Небојши, Игору, Горану и Марији на свим предлозима, коментарима и подршци.

Велику захвалност дугујем сестрама Милени и Владислави за помоћ око сређивања текста и предлога које су ми давале. Захваљујем се и Горчину на коментарима који су ме наводили да проверавам своје мишљење. Хвала Станиславу и Гордану на подршци и превођењу текстова.

Ништа од овог не би било да није мојих родитеља који су ми омогућили да постанем то што јесам.

*Докторат посвећујем Мили, Милутину и свима којима ће значити  
покушаји да се животна средина сачува*

## КЉУЧНЕ ДОКУМЕНТАЦИОНЕ ИНФОРМАЦИЈЕ

Редни број (РБ):	
Идентификациони број (ИБР):	
Тип документације (ТД):	Монографска публикација
Тип записа (ТЗ):	Текстуални штампани документ
Врста рада (ВР):	Докторска дисертација
Аутор (АУ):	Младен Фуртула
Ментор (МН):	др Градимир Данон, редовни професор Универзитета у Београду - Шумарски факултет
Наслов рада (НР):	Утицај еколошких и енергетских фактора на коришћење чврстих дрвних горива у Србији
Језик публикације (ЈЗ):	Српски / ћирилица
Земља публикације (ЗП):	Србија
Географско подручје (УГП):	Србија
Година (ГО):	2014
Издавач (ИЗ):	Ауторски репринт
Место и адреса (МА):	11 030 Београд, Кнеза Вишеслава 1
Физички опис рада:	9 поглавља, 148 страница, 82 литературна навода, 74 табеле, 19 слика, 44 графикана, 26 једначина
Научна област (НО):	Биотехничке науке
Научна дисциплина (DIS):	Машине и уређаји у преради дрвета
Предметна одредница / кључне речи (ПО)	дрвна биомаса, чврста дрвна горива, потрошња енергије, емисија гасова са ефектом стаклене баште, когенерација
УДК:	620.92:662.63(497.11)(043.3)
Чува се (ЧУ):	Библиотека Шумарског факултета, Кнеза Вишеслава 1, 11030 Београд, Србија
Важна напомена (ВН):	Нема
Извод (ИЗ):	Предмет истраживања ове дисертације су еколошки и енергетски фактори који утичу на производњу и боље коришћење чврстих дрвних горива у Србији. Циљ истраживања је био формирање јединственог модела који обухвата све битне факторе који утичу на потрошњу енергије и емисију гасова са ефектом стаклене баште при производњи чврстих дрвних горива и ефекте њиховог сагоревања. Модел је искоришћен за оцену производње конкретних чврстих дрвних горива (огревно дрво, дрвна сечка и дрвни пелет) и њиховог коришћења .
Датум прихватања теме од стране НН:	12.11.2013.
Чланови комисије (КО):	др Градимир Данон, редовни професор Универзитета у Београду - Шумарски факултет, др Бранко Главоњић, редовни професор Универзитета у Београду - Шумарски факултет, др Бојана Клашња, научни саветник Универзитета у Новом Саду - Институт за низијско шумарство, др Борислав Грубор, научни саветник Универзитета у Београду – Нуклеарни институт Винча, др Мирко Коматина, редовни професор Универзитета у Београду – Машински факултет.

## Резиме

Предмет истраживања ове дисертације су еколошки и енергетски фактори који утичу на производњу и боље коришћење чврстих дрвних горива у Србији. Анализирани су потрошња и структура енергије и емисија гасова са ефектом стаклене баште у свим фазама животног циклуса чврстих дрвних горива, односно њихова производња и коришћење за добијање топлотне и електричне енергије.

Циљ истраживања је био формирање јединственог модела који обухвата све битне факторе који утичу на потрошњу енергије и емисију гасова са ефектом стаклене баште при производњи чврстих дрвних горива и ефекте њиховог сагоревања. Обухваћени су следећи фактори који утичу на потрошњу енергије и емисију CO<sub>2</sub>e: почетна влажност дрвних горива, влажност дрвних горива (природно и вештачко сушење), транспорт и карактеристике котлова и пећи у којима се користе дрвна горива. Модел је искоришћен за оцену производње конкретних чврстих дрвних горива (огревно дрво, дрвна сечка и дрвни пелет) и њиховог коришћења (сагоревања) са еколошког и енергетског становишта. Урађени модел је верификован кроз примере производње дрвних пелета у Србији.

На основу свих претпоставки и израчунатих фактора коришћењем одговарајућих подмодела, може се донети закључак да огревно дрво има најмању потрошњу енергије и емисију CO<sub>2</sub>e, али да има велику потрошњу сировине по јединици произведене топлотне енергије. Производња дрвне сечке има нешто већу потрошњу енергије и емисију са ефектом гасова стаклене баште од огревног дрвета и најмању потрошњу сировине по јединици произведене топлотне енергије. Пелет има највећу потрошњу енергије и емисију CO<sub>2</sub>e од посматраних чврстих дрвних горива, али је могуће смањити потрошњу топлотне енергије природним сушењем сировине, а емисију гасова са ефектом стаклене баште смањити укључивањем когенерације (CHP) у процес производње. Дрвни пелет има мању потрошњу сировине по јединици произведене топлотне енергије у односу на огревно дрво, што му даје предност у коришћењу у кућним пећима и котловима. У закључку су на крају дати предлози за боље коришћење чврстих дрвних горива у Србији.

**Кључне речи:** дрвна биомаса, чврста дрвна горива, потрошња енергије, емисија гасова са ефектом стаклене баште, когенерација

## KEY WORD DOCUMENTATION

Accession number (ANO):	
Identification number (INO):	
Document type (DT):	Monograph documentation
Type of record (TR):	Textual printed document
Contains code (CC):	Doctoral dissertation
Author (AU):	Mladen Furtula
Menthor (MN):	Dr Gradimir Danon, full professor University of Belgrade - Faculty of Forestry
Title (TI):	The Impact of Ecological and Energy Factors on More Efficient Use of Solid Wood Fuels in Serbia
Language of text (LT):	Serbian/ Cyrillic alphabet
Country of publication (CP):	Serbia
Locality of publication (LP):	Belgrade
Publication year (PY):	2014
Publisher (PU):	The authors reprint
Publication place (PP):	11 030 Belgrade, Kneza Višeslava 1
Physical description (PD):	9 chapters, 148 pages, 82 references, 77 tables, 19 figures, 44 graphics, 26 equations
Scientific field (SF):	Biotechnological sciences
Scientific discipline (SD):	Machines and apparatus in wood processing
Subject/Key words (CX):	wood biomass, solid wood fuels, energy consumption, GHG emission, cogeneration.
UC:	620.92:662.63(497.11)(043.3)
Holding Data (HD):	Library of Faculty of Forestry, Kneza Višeslava 1, 11030 Belgrade
Note (N):	None
Abstract (AB):	The subject matter of research in this dissertation are ecological and energy factors affecting the production and more efficient use of solid wood fuels in Serbia. The purpose of this research was to create a model, which encompasses all important factors affecting energy consumption and GHG emission. This model has been used for assessing the production of particular solid wood fuels (firewood, wood chips and wood pellets) and their use.
Accepted by Scientific Board on (ACB):	12.11.2013.
Thesis Defend Board (DB):	Dr Gradimir Danon, Full Professor, University of Belgrade – Faculty of Forestry, Dr Branko Glavonjić, Full Professor, University of Belgrade – Faculty of Forestry, Dr Bojana Klačnja, Research Professor, University of Novi Sad - Institute of Lowland Forestry and Environment, Dr Borislav Grubor, Research Professor, University of Belgrade – Institute of Nuclear Sciences Vinča, Dr Mirko Komatina, Full Professor, University of Belgrade – Faculty of mechanical engineering.



## Abstract

The subject matter of research in this dissertation are ecological and energy factors affecting the production and more efficient use of solid wood fuels in Serbia. The analysis has been done with regard to consumption and energy structure, as well as greenhouse gases (GHG) emission in all phases of the lifespan of solid wood fuels, that is, their production and use for generating thermal and electric energy.

The purpose of this research was to create a model, which encompasses all important factors affecting energy consumption and GHG emission during the production of solid wood fuels, and effects of combustion have been included. The following factors affecting energy consumption and CO<sub>2</sub>e emission: initial wood fuel moisture, wood fuel moisture (natural and artificial drying), transport and specifications of boilers and furnaces using wood fuels. This model has been used for assessing the production of particular solid wood fuels (firewood, wood chips and wood pellets) and their use (combustion) based on ecological and energy point of view. The rendered model has been verified through examples of production of wood pellets in Serbia.

Based on all assumptions and calculated factors, using appropriate sub-models, it may be concluded that firewood has the lowest energy consumption and CO<sub>2</sub>e emission, however, it has a high raw material consumption per unit of produced thermal energy. A production of wood chips has a bit higher energy consumption and GHG emission effect than firewood, and the lowest raw material consumption per unit of produced thermal energy. Pellet has the highest energy consumption and CO<sub>2</sub>e emission among the respective solid wood fuels, however, it is possible to reduce the consumption of thermal energy by natural drying of raw material, and to reduce GHG emission effect by deploying the process of cogeneration (CHP) in production process. Wood pellet has a lower consumption of raw material per unit of produced thermal energy compared to firewood, which makes it more preferable for use in household furnaces and boilers. A conclusion at the end of this paper provides suggestions for more efficient use of solid wood fuels in Serbia.

**Keywords:** wood biomass, solid wood fuels, energy consumption, GHG emission, cogeneration

## Садржај

Списак слика	IV
Списак табела	V
Списак графикона	IX
Списак скраћеница	XII
Списак ознака	XIII
Списак симбола	XIV
<b>1. Увод</b>	<b>1</b>
1.1 Енергетски сектор у свету и значај дрвне биомасе	2
1.2 Значај дрвне биомасе у енергетском сектору у Србији	6
<b>2. Претходна истраживања</b>	<b>10</b>
2.1 Преглед досадашњих истраживања из области животног циклуса дрвне биомасе	11
2.2 Шуме у Србији са аспекта потенцијала дрвне биомасе	13
2.3 Производња дрвета у Србији	17
2.4 Анализа производње и употребе чврстих дрвних горива	18
2.5 Производња чврстих дрвних горива у Србији	24
<b>3 Предмет и циљ</b>	<b>26</b>
<b>4. Метод истраживања</b>	<b>30</b>
4.1 Оцењивање животног циклуса	32
4.2 Формирање модела производње и коришћења чврстих дрвних горива	34
4.2.1 Огревно дрво	38
4.2.2 Дрвна сечка	39
4.2.3 Дрвни пелет	42

4.3	Потенцијал глобалног загревања (Global Warming Potential)	44
4.4	Однос уложене енергије и енергије добијених горива (EROI)	45
4.5	Нето произведена енергија из чврстих дрвних горива	46
4.6	Ефикасност коришћења расположивих ресурса	46
4.7	Стандарди коришћени у истраживању	46
5.	<b>Карактеристике дрвне сировине и прорачун потрошње енергије у производњи и транспорту чврстих дрвних горива</b>	<b>48</b>
5.1	Својства материјала истраживања	48
5.2	Планирање и газдовање шумама	53
5.3	Сеча и извлачење	55
5.4	Дрвни остаци из прераде дрвета	58
5.5	Производња дрвне сечке	60
5.6	Производња дрвних пелета	62
5.7	Транспорт	70
5.8	Производња топлотне енергије	73
5.9	Когенеративна производња топлотне и електричне енергије	79
6.	<b>Резултати истраживања</b>	<b>83</b>
6.1	<b>Производња чврстих дрвних горива</b>	<b>83</b>
6.1.1	Огревно дрво	83
6.1.2	Дрвна сечка	85
6.1.3	Дрвни пелет	93
6.2	<b>Ефекти коришћења чврстих дрвних горива</b>	<b>97</b>
6.2.1	Производња топлотне енергије из чврстих дрвних горива	97
6.2.2	Коришћење чврстих дрвних горива у когенеративним постројењима	104

<b>7. Анализа резултата</b>	<b>108</b>
7.1 Потрошња енергије и емисија CO <sub>2</sub> e у производњи чврстих дрвних горива	108
7.2 Производња топлотне енергије	114
7.3 Употреба дрвета у когенеративним постројењима	122
7.4 Транспорт чврстих дрвних горива	129
7.5 Поређење са резултатима добијеним коришћењем програма SimaPro	132
<b>8. Закључци</b>	<b>135</b>
<b>9. Литература</b>	<b>141</b>

## Списак слика

Слика 2.1 Шематски приказ протока материје и енергије при коришћењу биомасе и фосилних горива за добијање енергије (Schlamadinger et al., 1997; IEA, 1998)	11
Слика 2.2 Производња и употреба биомасе (Jungmeier, 2000)	18
Слика 2.3 Модел производње и коришћења чврстих дрвених горива у Европи (LOT 15, 2009)	19
Слика 2.4 Фазе сагоревања дрвета (Hall, 2007)	22
Слика 2.5 Емисија CO <sub>2</sub> е код даљинског грејања при коришћењу лож уља и огревног дрвета (Jungmeier, 2000)	23
Слика 2.6 Подела уређаја за производњу топлотне енергије (LOT 15, 2009)	24
Слика 2.7 Коришћење огревног дрвета у Србији (Glavonjić 2011b)	25
Слика 4.1 Општи модел производње дрвених горива и кружење гасова стаклене баште	35
Слика 4.2 Предложени општи модел производње и коришћења чврстих дрвених горива у Србији	36
Слика 4.3 Подмодел „Огревно дрво“ - производња огревног дрвета	39
Слика 4.4 Подмодел „Сечка <sub>1</sub> “ - производња сечке од шумских остатака мобилним дробилицама	40
Слика 4.5 Подмодел „Сечка <sub>2</sub> “ - производња сечке од огревног дрвета мобилним дробилицама	40
Слика 4.6 Подмодел „Сечка <sub>3</sub> “ - производња сечке од огревног дрвета стабилним дробилицама	41
Слика 4.7 Подмодел „Сечка <sub>4</sub> “ - производња сечке од дрвених остатака на месту коришћења	41
Слика 4.8 Подмодел „Пелет <sub>1</sub> “ - производња дрвених пелета од огревног дрвета	43
Слика 4.9 Помодел „Пелет <sub>2</sub> “ - производња пелета од дрвених остатака	43
Слика 5.1 Дијаграм тока сушења дрвне сировине у производњи пелета	64
Слика 5.2 Поступак избора малих котлова и пећи које користе дрвно гориво	73
Слика 5.3 Утицај технолошког унапређења котлова и пећи на повећање ефикасности и смањење емисије CO (Schwarz et al., 2011)	75
Слика 5.4 Дијаграм производње топлотне и електричне енергије у производњи пелета	81

## Списак табела

Табела 2.1 <i>Опити подаци о шумама Србије</i>	14
Табела 2.2 <i>Порекло шума у Србији</i>	14
Табела 2.3 <i>Власничка структура шума у Србији по површини</i>	15
Табела 2.4 <i>Дубећа запремина и запремински прираст у шумама Србије</i>	15
Табела 2.5 <i>Дубећа запремина и запремински прираст по врстама у Србији</i>	16
Табела 2.6 <i>Посечено дрво у шуми и ван шуме у Србији 2012.</i>	17
Табела 4.1 <i>Вредности GWP за различите гасове и периоде посматрања</i>	45
Табела 4.2 <i>Енергетске вредности и емисија CO<sub>2</sub>e за горива коришћена у производњи чврстих дрвних горива</i>	45
Табела 5.1 <i>Усвојена апсолутна влажност букове сировине за производњу чврстих дрвних горива</i>	50
Табела 5.2 <i>Процентуално учешће хемијских елемената у дрвету</i>	52
Табела 5.3 <i>Вредности апсолутне и релативне влажности, густине и нето калоријске вредности буковог дрвета</i>	52
Табела 5.4 <i>Утицај влажности на нето калоријску вредност горива</i>	53
Табела 5.5 <i>Запремина сортимената на подручју источне Србије</i>	53
Табела 5.6 <i>Годишња потрошња енергената у шумским газдинтвима</i>	54
Табела 5.7 <i>Енергије и емисија CO<sub>2</sub>e у шумарству за 1 m<sup>3</sup> шумских сортимената</i>	54
Табела 5.8 <i>Потрошња бензина и уља при раду моторне тестере по врсти дрвета</i>	55
Табела 5.9. <i>Усвојена потрошња енергије при утовару шумских сортимената</i>	56
Табела 5.10 <i>Потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e при сечи и извлачењу дрвних сортимената</i>	57
Табела 5.11 <i>Сеча и извлачење шумских сортимената</i>	58
Табела 5.12 <i>Потрошња горива при производњи дрвне сечке</i>	60
Табела 5.13 <i>Усвојена потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e при производњи сечке</i>	61
Табела 5.14 <i>Потрошња топлотне и електричне енергије у производњи пелета</i>	62
Табела 5.15 <i>Потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e у производњи пелета</i>	64
Табела 5.16 <i>Утицај влажности на количину дрвне сировине за производњу пелета</i>	67

Табела 5.17 Потрошња енергије и емисија CO <sub>2</sub> e у зависности од влажности сировине и подмодела производње пелета	68
Табела 5.18 Јединична потрошња енергената у Производња I за 2012. годину	69
Табела 5.19 Просечна потрошња енергената у Производња II за 2012. годину	70
Табела 5.20 Потрошња горива и уља за транспорт камионима	71
Табела 5.21 Потрошња горива, односно енергије и емисије CO <sub>2</sub> e при транспорту чврстих дрвених горива	72
Табела 5.22 Ефикасност малих котлова и пећи и вредности емисије честица и штетних гасова	76
Табела 5.23 Просечне вредности за Европску унију при коришћењу котлова и пећи	76
Табела 5.24 Усвојене вредности сезонске ефикасности коришћења горива	77
Табела 5.25 Основни подаци о когенеративним постројењима на дрвну биомасу	80
Табела 5.26 Потрошња дрвне сировине при коришћењу когенерације у производњи пелета [m <sup>3</sup> /t]	82
Табела 6.1 Потрошња енергије и емисија CO <sub>2</sub> e за производњу у подмоделу Огревно дрво при почетној влажности сировине	83
Табела 6.2 Потрошња енергије и емисија CO <sub>2</sub> e за производњу у подмоделу Огревно дрво - различите влажности дрвог горива	84
Табела 6.3 Укупна потрошња енергије и емисија CO <sub>2</sub> e за подмодел Огревно дрво – за различите влажности	84
Табела 6.4 Вредности EROI за подмодел Огревно дрво – за различите влажности	85
Табела 6.5 Потрошња енергије и емисија CO <sub>2</sub> e за производњу у подмоделу Сечка <sub>1</sub> при почетној влажности сировине	86
Табела 6.6 Потрошња енергије и емисија CO <sub>2</sub> e за производњу у подмоделу Сечка <sub>1</sub> - за различите влажности	86
Табела 6.7 Укупна потрошња енергије и емисија CO <sub>2</sub> e за подмодел Сечка <sub>1</sub> - за различите влажности	87
Табела 6.8 Вредности EROI за подмодел Сечка <sub>1</sub> – за различите влажности	87
Табела 6.9 Потрошња енергије и емисија CO <sub>2</sub> e за производњу у подмоделу Сечка <sub>2</sub> при почетној влажности сировине	88
Табела 6.10 Потрошња енергије и емисија CO <sub>2</sub> e за производњу у подмоделу Сечка <sub>2</sub> - за различите влажности сировине	88
Табела 6.11 Укупна потрошња енергије и емисија CO <sub>2</sub> e за подмодел Сечка <sub>2</sub> - за различите влажности	89

Табела 6.12	<i>Вредности EROI за подмодел Сечка<sub>2</sub> – за различите влажности</i>	89
Табела 6.13	<i>Потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e за производњу у подмоделу Сечка<sub>3</sub> при почетној влажности сировине</i>	90
Табела 6.14	<i>Потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e за производњу у подмоделу Сечка<sub>3</sub> - за различите влажности</i>	90
Табела 6.15	<i>Укупна потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e за подмодел Сечка<sub>3</sub> - за различите влажности</i>	91
Табела 6.16	<i>Вредности EROI за подмодел Сечка<sub>3</sub> – за различите влажности</i>	91
Табела 6.17	<i>Потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e за производњу у подмоделу Сечка<sub>4</sub> при почетној влажности сировине</i>	92
Табела 6.18	<i>Потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e за производњу у подмоделу Сечка<sub>4</sub> - за различите влажности</i>	92
Табела 6.19	<i>Укупна потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e за подмодел Сечка<sub>4</sub> - за различите влажности сировине</i>	92
Табела 6.20	<i>Вредности EROI за подмодел Сечка<sub>4</sub> – за различите влажности</i>	93
Табела 6.21	<i>Потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e у производњи дрвних пелета за посматране производње у Србији</i>	94
Табела 6.22	<i>Укупна потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e производње са транспортом пелета за посматране производње у Србији</i>	94
Табела 6.23	<i>Потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e за производњу у подмоделу Пелет<sub>1</sub> - за различите влажности полазне сировине</i>	95
Табела 6.24	<i>Укупна потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e за подмодел Пелет<sub>1</sub> - за различите влажности сировине</i>	95
Табела 6.25	<i>Вредности EROI за подмодел Пелет<sub>1</sub> – за различите влажности</i>	96
Табела 6.26	<i>Потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e за производњу у подмоделу Пелет<sub>2</sub> - за различите влажности сировине</i>	96
Табела 6.27	<i>Укупна потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e за подмодел Пелет<sub>2</sub> - за различите влажности сировине</i>	97
Табела 6.28	<i>Вредности EROI за подмодел Пелет<sub>2</sub> – за различите влажности</i>	97
Табела 6.29	<i>Ефекти коришћења огревног дрвета за добијање топлоте у кућним пећима и котловима</i>	98
Табела 6.30	<i>Потрошња енергије, емисија CO<sub>2</sub>e, потрошња горива и сировине за произведени MWh топлоте и NEROI коришћењем огревног дрвета</i>	99
Табела 6.31	<i>Ефекти коришћења дрвне сечке за добијање топлотне енергије у индустријским котловима</i>	100



Табела 6.32	<i>Потрошња енергије, емисија CO<sub>2</sub>e, потрошња горива и сировине за произведени MWh топлоте и NEROI коришћењем сечке у индустријским котловима</i>	101
Табела 6.33	<i>Коришћење пелета из подмодела Пелет<sub>1</sub> за производњу топлоте у кућним пећима и кућним и индустријским котловима</i>	102
Табела 6.34	<i>Потрошња енергије, емисија CO<sub>2</sub>e, потрошња горива и сировине за произведени MWh топлоте коришћењем подмодела Пелет<sub>1</sub></i>	102
Табела 6.35	<i>Коришћење пелета из подмодела Пелет<sub>2</sub> за производњу топлоте у кућним пећима и кућним и индустријским котловима</i>	103
Табела 6.36	<i>Потрошња енергије, емисија CO<sub>2</sub>e, потрошња горива и сировине за произведени MWh топлоте коришћењем подмодела Пелет<sub>2</sub></i>	104
Табела 6.37	<i>Произведена енергија и емисија CO<sub>2</sub>e у когенеративним постројењима за сагоревање 1 тоне чврстог дрвног горива</i>	105
Табела 6.38	<i>Произведена енергија и емисија CO<sub>2</sub>e когенерацијом у производњи пелета сагоревањем 1 тоне дрвне сировине (Сечка<sub>3</sub>) влажности 10%</i>	106
Табела 6.39	<i>Потрошња дрвне сировине при коришћењу когенерације у производњи пелета [m<sup>3</sup>/t]</i>	106
Табела 7.1	<i>Коефицијент повећања вредности транспорта у односу на влажност</i>	132

## Списак графикана

Графикон 1.1	<i>Производња огревног и техничког дрвета у свету (IPCC, 2011b)</i>	2
Графикон 1.2	<i>Учешће врсте горива у примарној производњи енергије у 2008. години (IEA, 2010a)</i>	3
Графикон 1.3	<i>Учешће горива у финалној потрошњи енергије у свету (IEA, 2012a))</i>	4
Графикон 1.4	<i>Учешће горива у емисији CO<sub>2</sub> (IEA, 2012a)</i>	4
Графикон 1.5	<i>Учешће појединих сектора у емисији CO<sub>2</sub> у свету (IEA, 2012b)</i>	5
Графикон 1.6	<i>Процентуално учешће дрвне биомасе у укупној биомаси која се користи у свету (IPCC, 2011b)</i>	6
Графикон 1.7	<i>Учешће дрвних горива у изворима примарне енергије у изабраним земаљама UNECE региона (Ellul, 2012)</i>	7
Графикон 1.8	<i>Учешће дрвних горива у обновљивим изворима енергије (Ellul, 2012)</i>	8
Графикон 1.9	<i>Начин коришћења дрвних горива (Ellul, 2012)</i>	8
Графикон 1.10	<i>Процентуално учешће дрвних горива према сврси коришћења (Ellul, 2012)</i>	9
Графикон 5.1	<i>Утицај влажности горива и температуре димних гасова на ефикасност котла</i>	74
Графикон 5.2	<i>Утицај вишка кисеоника у димним гасовима на ефикасност котла</i>	75
Графикон 5.3	<i>Релативно оптерећење котла током сезоне грејања (UNDP, 2014))</i>	77
Графикон 5.4	<i>Потрошња дрвне сировине по MWh произведене топлоте за огревно дрво и сечку</i>	78
Графикон 5.5	<i>Потрошња дрвне сировине по MWh произведене топлоте за пелет</i>	78
Графикон 7.1	<i>Потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>е у производњи огревног дрвета и сечке према количини употребљене дрвне сировине</i>	109
Графикон 7.2	<i>Потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>е при производњи 1 тоне огревног дрвета и сечке за различите влажности</i>	110
Графикон 7.3	<i>Потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>е по т<sup>3</sup> коришћене дрвне сировине у производњи пелета</i>	111
Графикон 7.4	<i>Потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>е по 1 тони произведених пелета за различите влажности дрвне сировине</i>	112

Графикон 7.5 <i>Вредности EROI у зависности од врсте и влажности чврстих дрвених горива</i>	113
Графикон 7.6 <i>Потрошња огревног дрвета и пелета при производњи топлоте у домаћинствима (t/MWh)</i>	114
Графикон 7.7 <i>Потрошња сечке и пелета при производњи топлоте у индустријским котловима (t/MWh)</i>	115
Графикон 7.8 <i>Ефикасност коришћења расположивих ресурса (<math>E_k</math>) при коришћењу огревног дрвета и пелета у кућним пећима (<math>m^3/MWh</math>)</i>	116
Графикон 7.9 <i>Ефикасност коришћења расположивих ресурса (<math>E_k</math>) при коришћењу огревног дрвета и пелета у кућним котловима (<math>m^3/MWh</math>)</i>	117
Графикон 7.10 <i>Ефикасност коришћења расположивих ресурса (<math>E_k</math>) при коришћењу сечке и пелета у индустријским котловима (<math>m^3/MWh</math>)</i>	117
Графикон 7.11 <i>Вредност NEROI за пећи у домаћинствима</i>	118
Графикон 7.12 <i>Вредност NEROI за котлове у домаћинствима</i>	119
Графикон 7.13 <i>Вредност NEROI за индустријске котлове</i>	120
Графикон 7.14 <i>Емисија CO<sub>2</sub>е код производње топлотне енергије у кућним пећима</i>	121
Графикон 7.15 <i>Емисија CO<sub>2</sub>е код производње топлотне енергије у кућним котловима</i>	121
Графикон 7.16 <i>Емисија CO<sub>2</sub>е код производње топлотне енергије у индустријским котловима</i>	122
Графикон 7.17 <i>Вредности NEROI за производњу електричне енергије у когенерационим постројењима</i>	123
Графикон 7.18 <i>Вредности NEROI за производњу топлотне енергије у когенеративним постројењима</i>	124
Графикон 7.19 <i>Емисија CO<sub>2</sub>е при производњи електричне енергије у когенеративним постројењима</i>	124
Графикон 7.20 <i>Емисија CO<sub>2</sub>е при производњи топлотне енергије у когенеративним постројењима</i>	125
Графикон 7.21 <i>Удео произведене електричне енергије когенерацијом у укупној потрошњи електричне енергије за производњу 1 тоне пелета</i>	126
Графикон 7.22 <i>Емисија CO<sub>2</sub>е утрошене електричне енергије у зависности од врсте когенерације за производњу 1 тоне пелета</i>	127

Графикон 7.23	<i>Потрошња сировине за производњу 1 тоне пелета у зависности од врсте когенерације</i>	128
Графикон 7.24	<i>Утицај транспорта на укупно уложену енергију и емисију CO<sub>2</sub>e према нето калоријској вредности подмодела Огревно дрво</i>	129
Графикон 7.25	<i>Утицај транспорта на укупно уложену енергију и емисију CO<sub>2</sub>e према нето калоријској вредности подмодела Сечка<sub>1</sub></i>	130
Графикон 7.26	<i>Утицај транспорта на укупно уложену енергију и емисију CO<sub>2</sub>e према нето калоријској вредности подмодела Пелет<sub>1</sub></i>	131
Графикон 7.27	<i>Утицај производње огревног дрвета и сечке на животну средину</i>	132
Графикон 7.28	<i>Однос утицаја производње огревног дрвета и пелета на животну средину</i>	133
Графикон 7.29	<i>Утицај производње пелета на животну средину</i>	134

## Списак скраћеница

CEN - Европски комитет за стандардизацију

FAO – Организација за храну и пољопривреду

IPCC – Међувладин панел за климатске промене

IEA – International Energy Agency

ISO – Међународна организација за стандардизацију

LCA - Оцењивање животног циклуса (eng. life cycle assessment)

LCI - Анализа инвентара животног циклуса (енгл. Life cycle inventory)

LCIA - Оцењивања утицаја животног циклуса (енгл. Life cycle impact assessment)

SRPS ISO – Усвојени међународни стандарди од стране Института за стандардизацију Србије

SRPS EN – Усвојени европски стандарди од стране Института за стандардизацију Србије

UNDP – Програм за развој Уједињених нација

UNECE - Економска комисија за Европу Уједињених нација

БДП - бруто домаћи производ

ОЕЦД - Организација за економску сарадњу и развој (енг. *Organisation for Economic Co-operation and Development*)

ТНГ – течни нафтни гас

## Списак ознака

CO – угљенмоноксид

CO<sub>2</sub> – угљендиоксид

CO<sub>2</sub>e – еквивалентна емисија угљендиоксида

CH<sub>4</sub> – метан

H - водоник

N<sub>2</sub>O - азот субоксид

NO<sub>x</sub> - азотови оксиди

N – азот

O – кисеоник

S - сумпор

°C – степен Целсијус

MJ – мега џул, јединица за количину топлотне енергије

EJ – екса џул (10<sup>18</sup> J)

kWh – киловат час, јединица за утрошену енергију

TWh – Терават час (10<sup>12</sup> kWh)

Mtoe – милион тона еквивалентне нафте

kg CO<sub>2</sub>e – килограм емитованог еквивалентног угљендиоксида

m<sup>3</sup> – метар кубни, јединица за запремину

t – тона, јединица за масу

h – час, јединица времена

L – литар, јединица за запремину

km – километар, јединица за раздаљину

ha – хектар, јединица за површину

## Списак симбола

$M$  – релативна влажност дрвета

$u$  – апсолутна влажност дрвета

$H_d$  – нето калоријска вредност

$H_g$  – бруто калоријска вредност горива

$\eta$  – ефикасност уређаја

$\beta_v$  – запреминско утезање дрвета

$e$  - топлота потребна за испаравање 1 тоне воде

$\epsilon_e$  – ефикасност производње електричне енергије

$E_k$  - ефикасност коришћења расположивих ресурса

$E_p$  – утрошена енергија за производњу и транспорт огревног дрвета

EROI - однос енергије из добијених горива и уложене енергије

GWP - потенцијал глобалног загревања (Global Warming Potential)

NEROI - нето енергија горива

## **1. Увод**

Коришћењем угљеника из фосилних извора енергије повећава се емисија гасова у атмосферу, што за резултат има стварање ефекта „стаклене баште“. Под овим појмом се подразумева загревање планете Земље настало поремећајем енергетске равнотеже између количине зрачења које од Сунца прима и у свемир зрачи земљина површина услед повећања концентрације гасова стаклене баште. Најзаступљенији од гасова стаклене баште је угљендиоксид (CO<sub>2</sub>). Његова концентрација износи 0,037% од укупне запремине атмосфере. Његова концентрација се повећала за око 30% у задњих 200 година и највиша је забележена у последњих 650.000 година (IPCC, 2001). Остали гасови су метан (CH<sub>4</sub>), азотови оксиди (NO<sub>x</sub>) и перфлуоркарбонати (HFC/PFC/SF<sub>6</sub>). Човечанство је постало свесно свог негативног утицаја на животну средину и тренутно се, на светском нивоу, праве свеобухватни планови активности којима би се смањила емисија гасова стаклене баште у наредним декадама. Кораци који се предлажу за смањење емисије гасова са ефектом стаклене баште су: примена мера за уштеду енергије кроз повећање енергетске ефикасности, веће коришћење обновљивих извора енергије, смањење коришћења угља и нафте у корист природног гаса (као прелазног решења) и смањење емисије гасова из транспорта.

Већим и одговорнијим коришћењем сопствених обновљивих извора енергије, пре свега биомасе, побољшава се енергетска безбедност земље и смањује се утицај на животну средину у локалним и глобалним размерама. Такође, повећава се могућност запошљавања локалног становништва у неразвијеним шумским и пољопривредним подручјима. Веће и ефикасније коришћење ових извора би допринело ефикаснијем коришћењу сопствених потенцијала у производњи енергије, смањењу емисија гасова са ефектом стаклене баште, смањењу зависности од фосилних горива, развоју локалне индустрије и отварању нових радних места (Национални акциони план за коришћење обновљивих извора енергије, НАПОИЕ, 2008).

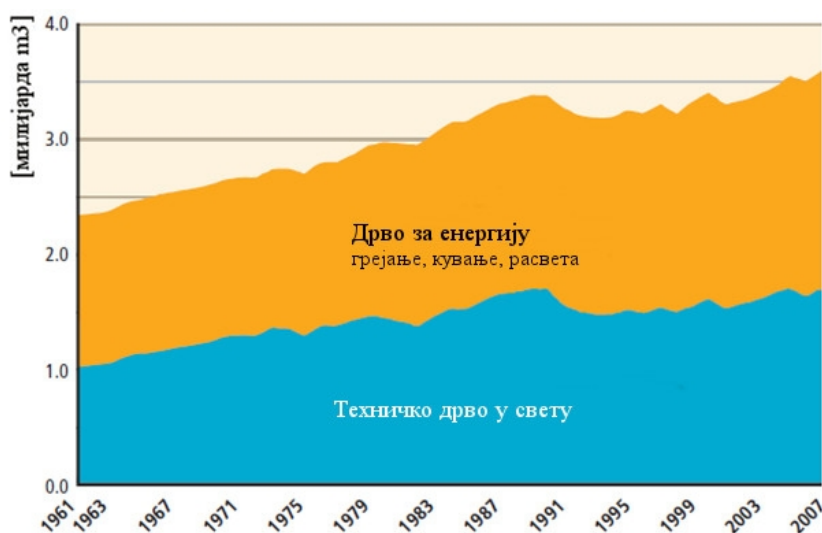


## 1.1 Енергетски сектор у свету и значај дрвне биомасе

Шуме покривају око једне трећине светског копна, што их чини једним од главних елемената екосистема на земљи (FAO, 2005). Шуме су станишта многих биљака и животиња, штите земљишта и водне ресурсе и побољшавају квалитет ваздуха и воде. Такође, шуме као значајан извор сировина, доприносе економском развоју руралних крајева. На крају, шуме могу бити обновљив извор енергије уз услов да се „одрживо“ користе.

Шуме су велики и динамичан резервоар угљеника и стога имају велику улогу у глобалном циклусу угљеника (Nabuurs et al., 2007; Shvidenko et al., 2005). Управљање шумама је једна од кључних опција у решавању изазова ублажавања климатских промена. Опције ублажавања укључују смањење емисије од прекомерне експлоатације шумског фонда, спречавање деградације шума, повећавање „хватања“ и складиштења угљеника у постојећим и новим шумама и у трајним производима од дрвета који замењују угљеник-интензивне материјале<sup>1</sup> (нпр. алуминијум, челик итд.), као и замена фосилних горива горивима на бази дрвета.

На графикону 1.1 приказане су произведене количине техничког и огревног дрвета у свету за последњих пола века (IPCC, 2011b)



Графикон 1.1 Производња огревног и техничког дрвета у свету (IPCC, 2011b)

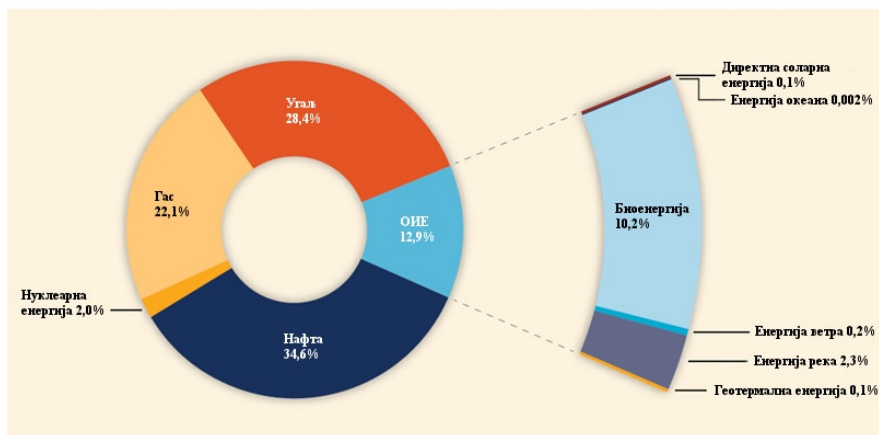
<sup>1</sup> Угљеник интензивни материјали - при њиховој производњи емитује се велика количина гасова стаклене баште

У свету је 2007. године произведено око 3 милијарде  $m^3$  дрвних сортимената, а од тога, према проценама (FAO, 2005), половина је била огревно дрво, што указује на важну улогу горива на бази дрвета у задовољавању потреба за енергијом.

За одржив развој човечанства, потребно је обезбедити стабилне изворе енергије као и да њихово коришћење има што мањи утицај на животну средину. То захтева веће учешће горива из обновљивих извора и коришћење поступака производње са ниским негативним утицајем на животну средину, укључујући и емисије гасова стаклене баште (IPCC, 2011a).

При решавању проблема производње енергије потребне човечанству, постављени су различити сценарији у зависности од праваца будућег привредног развоја. Већина глобалних дугорочних енергетских сценарија потрошње горива претпостављају повећање производње примарне енергије током овог века. Основни сценарији показују значајно више емисије гасова који стварају ефекат стаклене баште у 2100. години у односу на 2000. годину, што подразумева растућу концентрацију тих гасова и повећања глобалног загревања. Зависно од основних социо-економских сценарија и узимајући у обзир додатне неизвесности, очекује се да ће глобална средња температура расти и да ће се повећати за  $1,1^{\circ}C$  до  $6,4^{\circ}C$  до краја овог века у односу на просек за период 1980.-1999.(IPCC, 2011a).

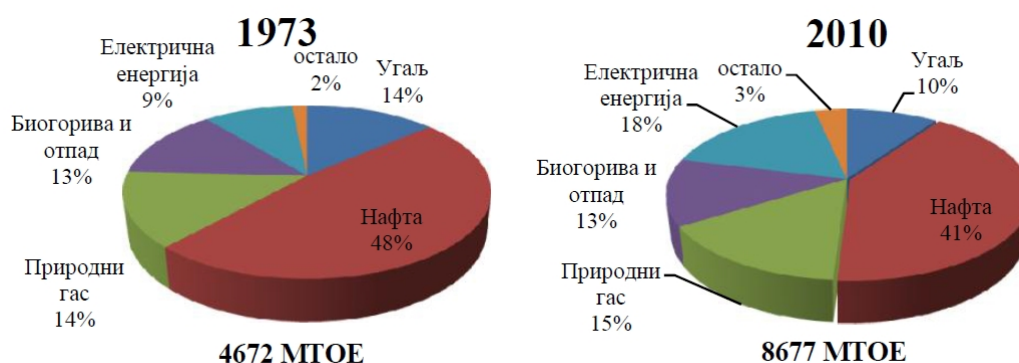
На графикону 1.2 приказано је учешће појединих врста горива у укупној примарној производњи енергије у свету у 2008. години. Подаци су преузети од Међународне енергетске агенције (IEA – International Energy Agency).



Графикон 1.2 Учешће врсте горива у примарној производњи енергије у 2008. години (IEA, 2010a)

На основу графикана 1.2 може се закључити да у потрошњи горива у примарној производњи енергије највеће учешће има нафта са 35%, затим угаљ са 28% и природни гас са 22%, обновљиви извори енергије учествују са 13%, док нуклеарна енергија учествује са 2%. Од обновљивих извора енергије биоенергија је најзаступљенија и учествује са 10% у укупној примарној енергији, док остале врсте енергената учествују са 3%.

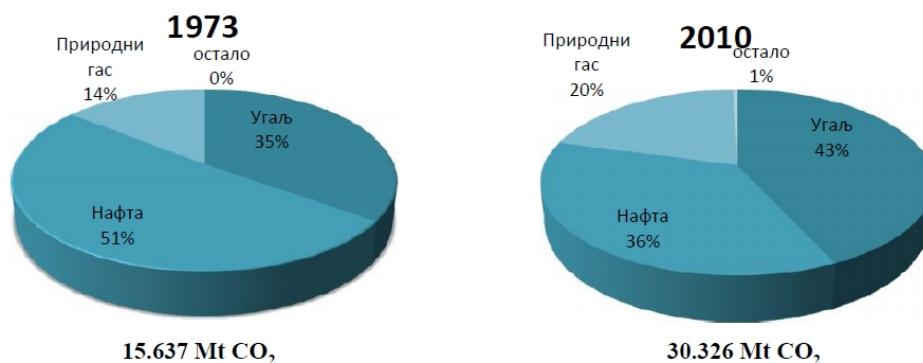
Удели различитих врста горива у финалној потрошњи енергије на светском нивоу за 1973. и 2010. годину представљени су на графикану 1.3.



Графикон 1.3 *Учешће горива у финалној потрошњи енергије у свету (IEA, 2012a)*

Према графикану 1.3 финална потрошња енергије у свету се за посматрани период скоро удвостручила. Од горива највеће учешће у финалној потрошњи енергије има нафта и то у обе посматране године, учешће електричне енергије расте, а угља опада. Процентуално учешће биомасе је остало на истом нивоу, што значи да су се утрошене количине у овом периоду практично удвостручиле.

На графикану 1.4 приказано је учешће појединих врста горива у емисији угљендиоксида у атмосферу.



Графикон 1.4 *Учешће горива у емисији CO<sub>2</sub> (IEA, 2012a)*

Графикон 1.4 такође приказује да је емисија CO<sub>2</sub> удвостручена, а приметно је да је у 1973. години највеће учешће (51%) имала нафта, а да је у 2010. години примат преузео угаљ (43%).

На графикону 1.5 дат је приказ учешћа емисија CO<sub>2</sub> по секторима потрошње енергије за 2010. годину.



Графикон 1.5 Учешће појединих сектора у емисији CO<sub>2</sub> у свету (IEA, 2012b)

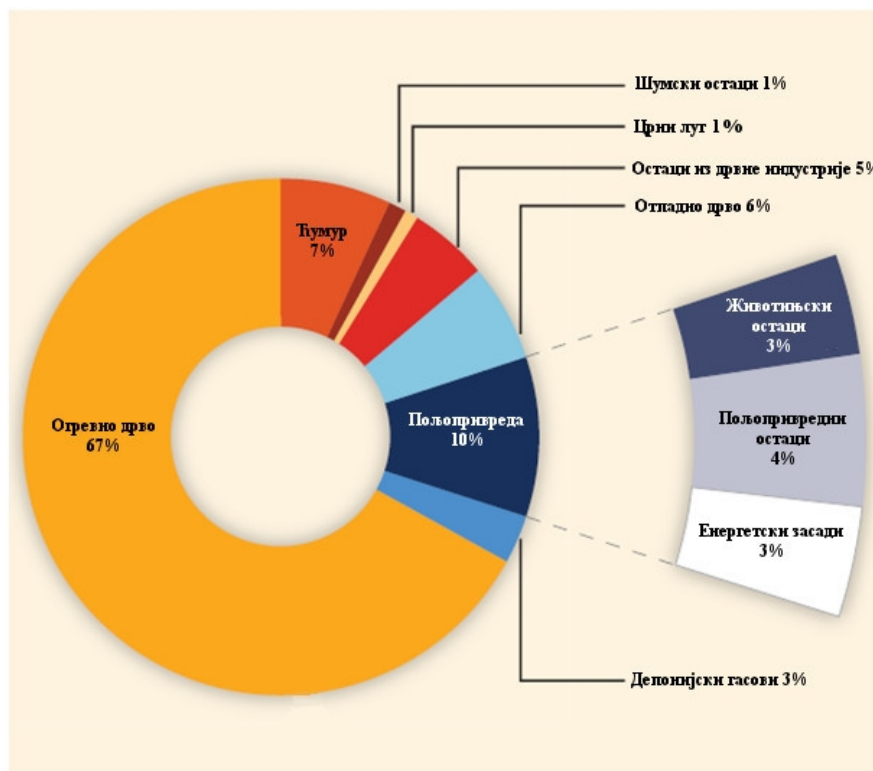
Графикон 1.5 приказује да је највећа емисија у сектору производње електричне и топлотне енергије (42%), следе транспорт (22%) и индустрија (20%), које имају приближно исто учешће. Домаћинства учествују са 6% енергије, док 10% емисије отпада на остале потрошаче (комерцијални/јавни сервис, пољопривреда и шумарство, рибарство итд.).

Биомаса је најстарији извор енергије познат човечанству који је и данас највећи извор обновљиве енергије, односно око 10% или 50 EJ светске укупне производње примарне енергије (IEA, 2011a). Већи део биомасе се користи за кување и грејање, посебно у сиромашним домаћинствима у земљама у развоју (IEA, 2012c).

Према (IEA, 2012c), предвиђено је повећање укупне светске производње примарне биоенергије са данашњих 50 EJ на 160 EJ до 2050. године, при чему ће већи део, односно 100 EJ бити искоришћено за производњу топлотне и електричне енергије. До 2050. године биомаса би могла да буде извор за 3.100 TWh електричне енергије, односно 7,5 % светске производње електричне енергије. Додатно, топлотна енергија из биоенергије могла би осигурати 22 EJ (15 % од укупних

потреба) у индустрији и 24 EJ (20 % од укупних потреба) у сектору грејања у 2050. години. Електрична енергија из биомасе може уштедети годишње 1,3 Gt - CO<sub>2</sub>е до 2050. године, уз 0,7 Gt годишње од топлотне енергије из биомасе у индустрији и зградарству.

Однос врсте горива из биомасе коришћене за енергију приказан је на графикану 1.6.



Графикон 1.6 Процентуално учешће дрвне биомасе у укупној биомаси која се користи у свету (IPCC, 2011b)

Учешће огревног дрвета и горива на бази дрвета је 87%. Преостале сировине долазе из сектора пољопривреде (енергетски засади, остаци и споредни производи).

## 1.2 Значај дрвне биомасе у енергетском сектору у Србији

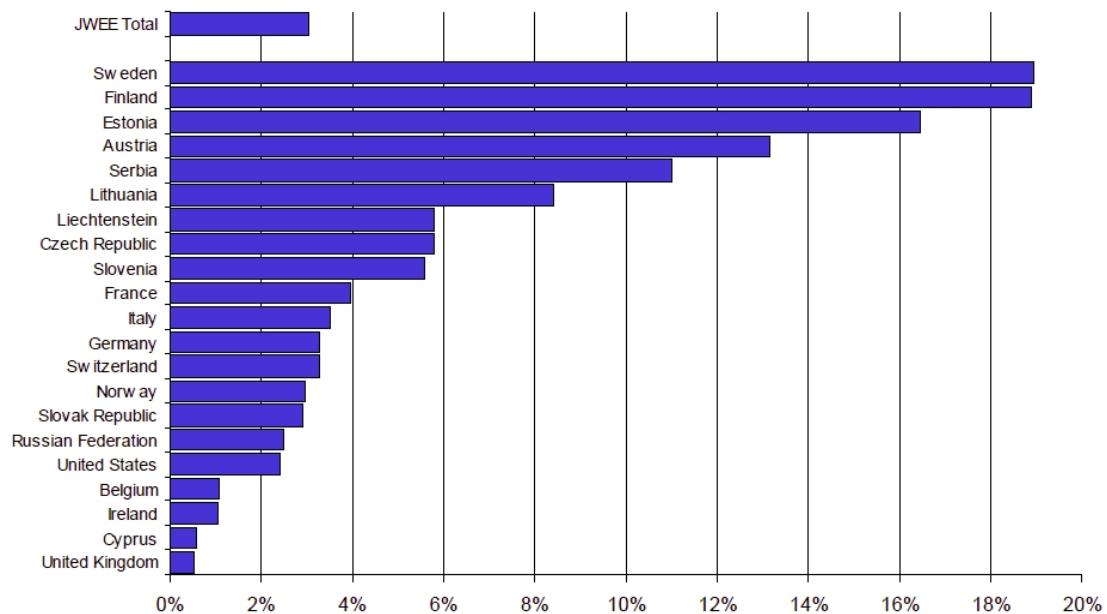
Енергетски сектор Србије карактерише велики интензитет емисије угљендиоксида по јединици бруто домаћег производа (БДП) и он је 6,8 пута већи од светског просека, а 10,8 пута већи од просека ОЕЦД-а<sup>2</sup> (UNDP, 2007). Разлози су:

<sup>2</sup> Организација за економску сарадњу и развој (енг. *Organisation for Economic Co-operation and Development*)

- Ниска енергетска ефикасност привреде Србије која користи 3,8 пута више енергетских јединица од светског просека да би произвела један долар БДП-а (SEEI, 2014)
- Високо учешће фосилних горива (пре свих лигнита) у производњи електричне енергије (Гаврић и сар., 2009).

Србија је земља сиромашна конвенционалним (фосилним) изворима енергије, али располаже значајним потенцијалима обновљивих извора енергије који су процењени на 6 милиона тона еквивалентне нафте (Mtoe) годишње. На првом месту је биомаса са око 3,3 Mtoe годишње, следи хидропотенцијал са 1,7 Mtoe (од тога је 0,9 Mtoe већ искоришћено), 0,2 Mtoe је на располагању у постојећим геотермалним неискоришћеним изворима, 0,2 Mtoe у енергији ветра и 0,6 Mtoe у коришћењу сунчевог зрачења (ПНАПОИЕ, 2012).

Према међународном истраживању UNECE/FAO<sup>3</sup> Joint Wood Energy Enquiry (Ellul, 2012) о учешћу дрвне биомасе у изворима примарне енергије Србија се налази на петом месту од анкетираних земаља (Графикон 1.7).

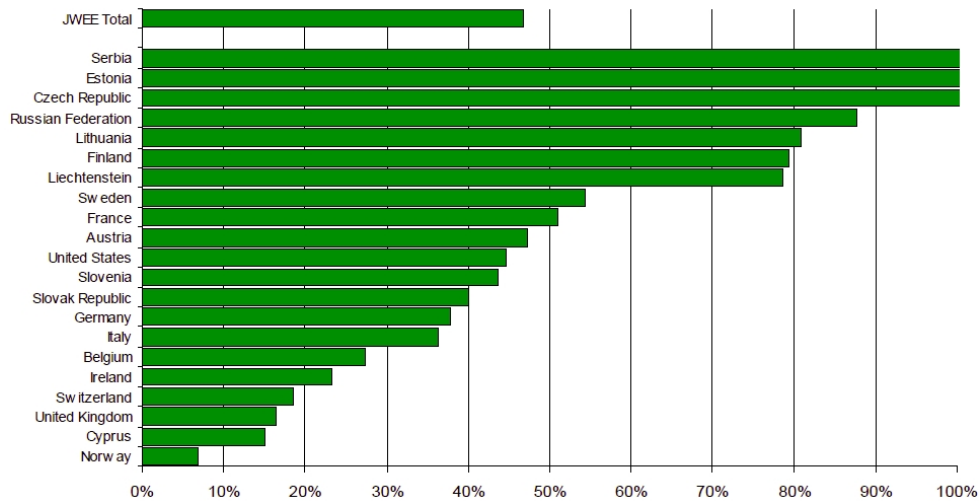


Графикон 1.7 Учешће дрвних горива у изворима примарне енергије у изабраним земаљама UNECE региона (Ellul, 2012)

<sup>3</sup> UNECE - Економска комисија за Европу (енг. *United Nations Economic Commission for Europe*);  
FAO - Организација за прехрану и пољопривреду (енг. *Food and Agriculture Organization*)

Према графикону 1.7 дрвна биомаса у Србији учествује са 11% у производњи примарне енергије, а само земље са дугом традицијом коришћења обновљивих извора енергије попут Шведске, Финске и Аустрије имају веће учешће.

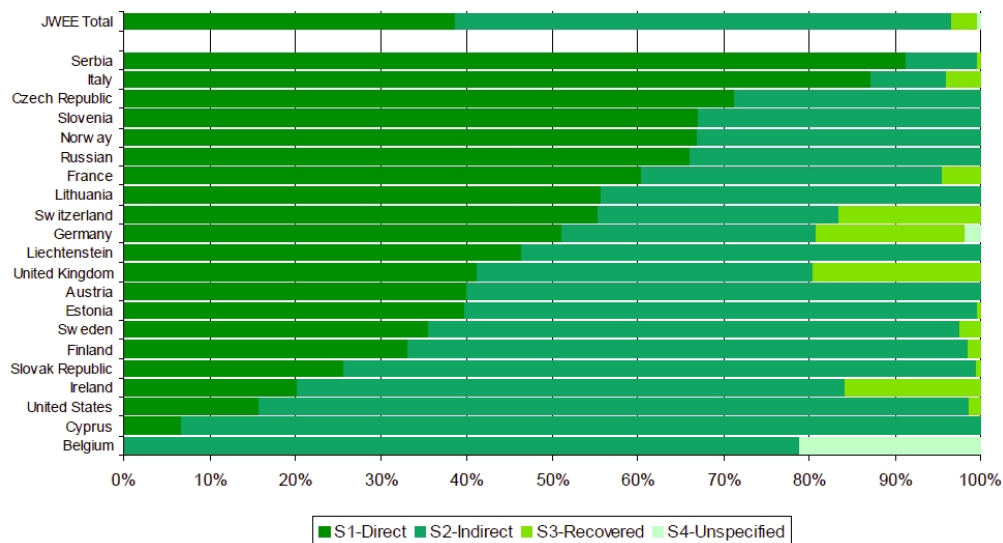
Према истом избору, учешће дрвних горива при коришћењу обновљивих извора енергије (без хидропотенцијала) може се видети на графикону 1.8.



Графикон 1.8 Учешће дрвних горива у обновљивим изворима енергије (Ellul, 2012)

Графикон 1.8 приказује да дрвна биомаса у Србији у 2009. години има удео од 100% у обновљивим изворима енергије и да уз Естонију и Чешку има највећи удео дрвних горива у коришћењу обновљивих извора енергије.

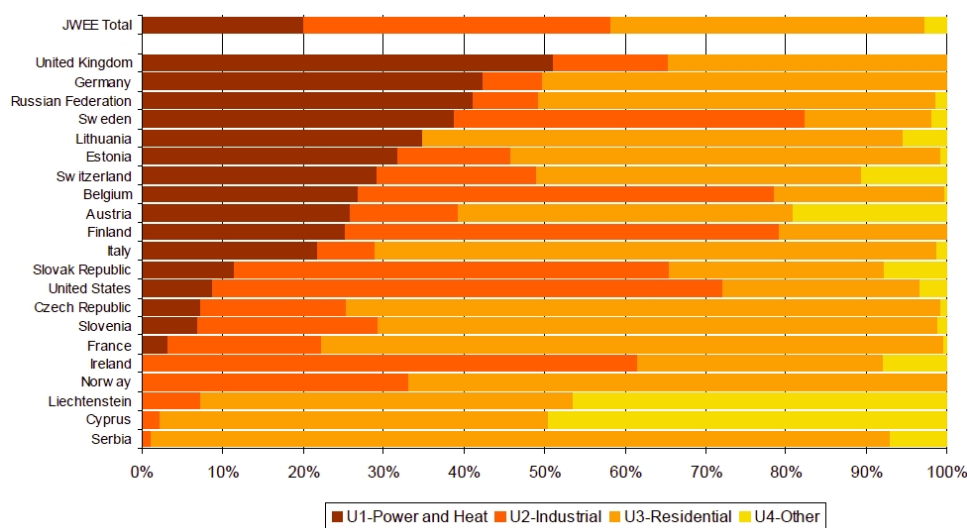
Начин коришћења дрвних горива у 2009. години приказано је на графикону 1.9.



Графикон 1.9 Начин коришћења дрвних горива (Ellul, 2012)

На графикону 1.9 се види да је преко 90% дрвне биомасе коришћено директно из шуме (S1), односно да је коришћено у форми огревног дрвета или сечке. Мање од 10% је дрвна маса била коришћена у виду прерађених горива (брикети, пелети, ђумур) (S2), а у подацима нема већ употребљеног дрвета (S3) и горива на бази дрвета из осталих извора (S4).

Када је реч о начину коришћења горива на бази дрвета, Графикон 1.10 приказује као се у Европи користе чврста дрвна горива.



Графикон 1.10 Процентуално учешће дрвних горива према сврси коришћења (Ellul, 2012)

Дрвна горива у Србији највише се користе за грејање приватних домаћинстава (U3) (око 90%), нешто мало мање од 10% за потребе јавног и приватног комерцијалног сектора (U4) и најмање за производњу топлотне енергије за индустријске сврхе (U2). Коришћења дрвних горива за добијање топлотне и електричне енергије (U1) није било и још увек нема погона који ради на том принципу у Србији.

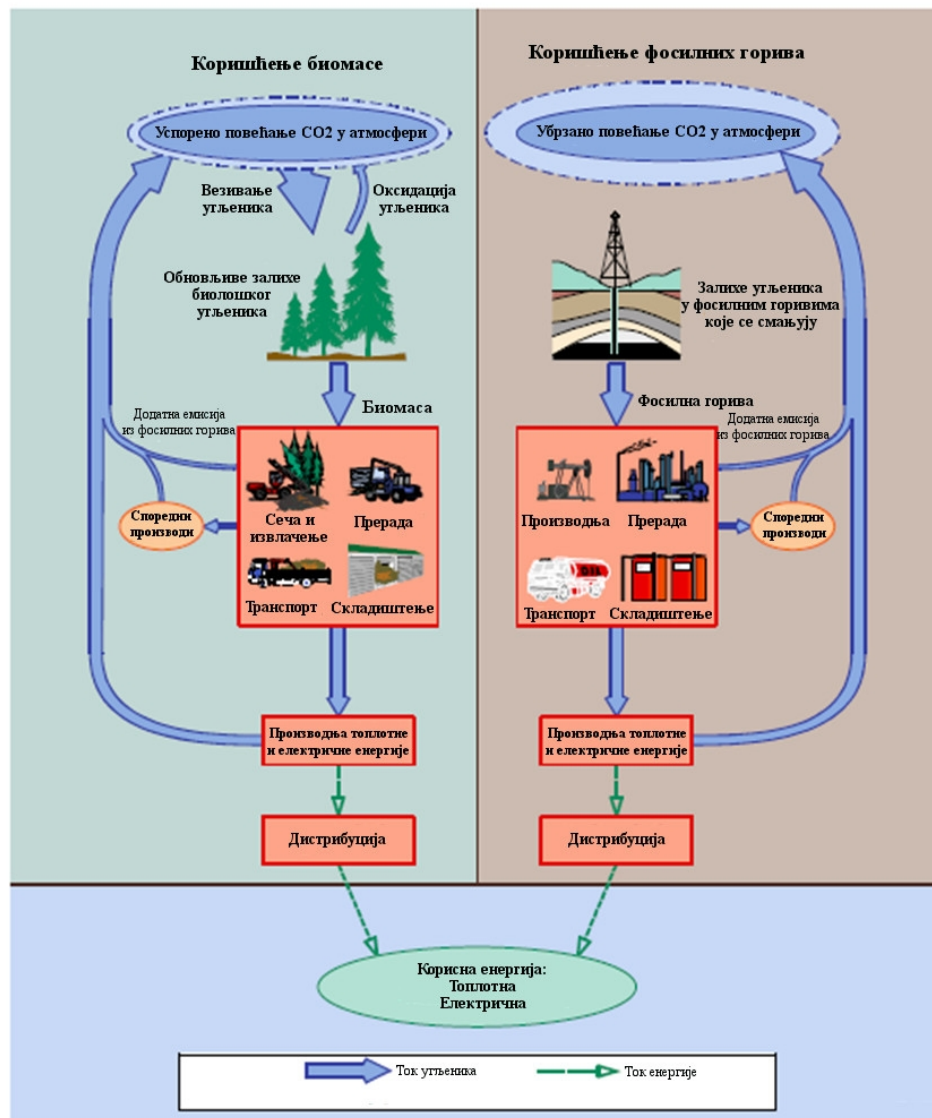
Наведени подаци показују да су количине дрвне биомасе респектабилне и да су најзаступљенији вид биогорива у Србији. Поред тога, дрвна биомаса се у Србији најчешће користи као огревно дрво, доста мање као пелети и брикети, а нема података о коришћењу употребљеног/отпадног дрвета. Као начин коришћења, најчешће се користи за потребе домаћинства, а знатно мање у индустријске сврхе. Из свега наведеног може се закључити да у Србији има доста могућности да се унапреди коришћење дрвних горива.



## 2. Претходна истраживања

Шуме су резервоари угљендиоксида и стога имају важну улогу у глобалном кружењу угљеника као један од фактора за смањење концентрације гасова са ефектом стаклене баште у атмосфери (Binkley, 1994; Dixon, 1994; Marland i Marland, 1992). Међутим, количина CO<sub>2</sub> коју дрвеће у шуми веже представља само пасивно и привремено решење. Дугорочно решење за смањење концентрације CO<sub>2</sub> мора се тражити у мањем коришћењу фосилних горива кроз повећање ефикасности њиховог коришћења и заменом обновљивим изворима енергије, а пре свега дрвним горивима израђених од дрвне биомасе из шуме, енергетских плантажа, остатака из прераде дрвета и рециклираног дрвета уместо фосилних горива (CORRIM, 1976), (Burschel, 1993), (Furtula et al., 2010), (Фуртула и др., 2009), (Кнежевић и др., 2010). Са становишта времена, кружење угљеника се сагоревањем дрвне биомасе убрзава, у односу на природно разлагање, које може да траје деценијама, а емитована количина гасова са ефектом стаклене баште на крају оба циклуса је приближно иста (Cherubini et al., 2009). Друга предност је у томе што у поређењу са другим врстама горива, дрвна биогорива захтевају мању потрошњу енергије по јединици произведене енергије (Buchanan, 1999).

Разлика између биогорива и фосилних горива је у томе што се код коришћења биогорива већи део емитованог угљенидиоксида „враћа“ у шуму и тако се успорава повећање концентрације гасова са ефектом стаклене баште. Када се користе фосилна горива практично сав угљендиоксид остаје у атмосфери повећавајући на тај начин укупну концентрацију.



Слика 2.1 Шематски приказ протока материје и енергије при коришћењу биомасе и фосилних горива за добијање енергије (Schlamadinger et al., 1997; IEA, 1998)

## 2.1 Преглед досадашњих истраживања из области животног циклуса дрвне биомасе

Оцењивање животног циклуса (eng. life cycle assessment-LCA) је стандардизована научна и аналитичка метода за доношење одлуке о изradi или квалитету одређеног производа уз идентификацију његовог утицаја на животну средину на основу целокупног животног циклуса производа. LCA је процес анализе материјала, енергије, отпада и емисија гасова које „продукује“ производ (или система услуга), кроз целокупан животи циклус (Стевановић Чарапина и др.,

2010). Оцењивање животног циклуса производа може се вршити од настанка (почевши од ресурса и експлоатације материјала) до следећег корисника (од колевке до капије, eng. Cradle to gate) или до престанка коришћења производа, односно коначног одлагања (од колевке до гроба, eng. cradle to grave).

Употреба различитих улазних података, функционалних јединица, метода расподеле, референтних система и друге претпоставке компликује поређење LCA студија биоенергије. Поред тога, процена неизвесности и употреба специфичних локалних фактора за индиректне ефекте (као што су на пример промене коришћења земљишта) доводи до широког опсега коначних резултата (Lindholm, 2010). Многе студије се баве различитим ресурсима биомасе, технологијама конверзије производа и категорије утицаја на животну средину. Са изузетком неколико студија, у већини је утврђено значајно смањење нето емисија гасова стаклене баште у случајевима када су фосилна горива замењена биомасом.

LCA студије могу се поделити у три групе: студије које се баве енергетским билансима, оне које се баве билансима емисије гасова са ефектом стаклене баште и остале студије LCA. Студије које се раде имају различите обиме и циљеве. То значи да када се упореде резултати LCA различитих аутора и извора, добија се широка варијација финалних резултата, чак и наизглед сличних ланаца за производњу и коришћење биоенергије. Варијације се могу приписати различитим изворима података, времену када су студије рађене, усвојеним вредностима улазних параметара и другим унутрашњим факторима. Поред тога, на варијације утичу и методолошка питања као што су: дефинисање граница система, расподеле, референце система и други индиректни ефекти у које спадају промене коришћења земљишта и емисије азота из земљишта. Све наведено у великој мери може да допринесе да се прошири опсег неизвесности коначних резултата LCA.

Постоје радови који анализирају односе постојећих студија. Један од таквих је рад (Cherubini et al., 2011) у којем је обрађено 98 студија из области употребе биомасе за добијање горива. Од тог броја 13 студија се бавило коришћењем шумске биомасе, а 12 је било из области коришћења дрвних остатака. Ако се гледају студије по врсти енергетског производа 9 студија је анализирано из производње топлотне енергије, 18 из производње електричне енергије, а 17 из области когенерације (симултане производње топлотне и електричне енергије).

Локацијски посматрано, највише студија је урађено на основу података из Европе (43), Северне Америке (2), Азије (13) итд. Закључак наведене студије је да још увек не постоји стандардна методологија за процену директних и индиректних ефеката утицаја коришћења дрвних биогорива на животну средину и да посао око дефинисања једноставне и довољно тачне методологије тек предстоји.

Према (Werner et al., 2007), критеријуми за еколошки одрживо коришћење дрвета као материјала за израду производа од дрвета, у које спадају и чврста дрвна горива су:

1. шумарство треба да прати квалитативне и квантитативне критеријуме одрживог газдовања шумама;
2. ефикасна и економична прерада и коришћење дрвета као сировине у преради дрвета;
3. избегавање коришћења препарата за заштиту дрвета где је то могуће (нпр. код дрвета у грађевинарству) и бирање адитива као што су адхезиви, површинска обрада и материјали за оплемењивање;
4. пројектовање производа од дрвета који се могу лако раставити како би били погодни за рециклажу, односно за производњу горива;
5. подићи ефикасност сагоревања биогорива да би се повећала супституција фосилних горива;
6. враћање пепела, насталог из сагоревања дрвета у шумски екосистем на еколошки прихватљив начин као ђубриво;
7. употреба отпадног дрвета из дрвних производа у производњи енергије како би се што више заменила фосилна горива;
8. што већа употреба дрвета у производима који имају дуг животни век као што је грађевинарство.

## **2.2 Шуме у Србији са аспекта потенцијала дрвне биомасе**

Србија се сматра средње пошумљеном земљом (Furtula et al., 2009). Од укупне територије, шуме покривају 29,1% територије (према Националној инвентури шума Републике Србије из 2009. године). Укупна површина шума у Србији је 2.252.000 хектара, а својинска структура је: 53% су државне шуме и 47% су шуме

у приватном власништву. Општи подаци могу се видети у табели 2.1 (Банковић и сар., 2009).

Табела 2.1 Општи подаци о шумама Србије

	Јединица	Количина
Површина Републике Србије	ha	8.836.100
Површина под шумом	ha	2.252.400
Шумовитост	%	29,1
Укупна дубећа запремина	m <sup>3</sup>	362.487.000
Просечна дубећа запремина	m <sup>3</sup> /ha	160,9
Годишњи запремински прираст	m <sup>3</sup>	9.079.772
Просечан прираст	m <sup>3</sup> /ha	4

Извор: (Банковић и сар., 2009)

Подела по пореклу шума је потребна да би се сагледао потенцијал са аспекта производње дрвних горива, али и за друге потребе.

У табели 2.2 су подаци о врсти шума, њиховим површинама, дубећој запремини и запреминском прирасту дрвета у шуми.

Табела 2.2 Порекло шума у Србији

Порекло	Површина		Дубећа запремина			Запремински прираст		
	ha	%	1.000 m <sup>3</sup>	%	m <sup>3</sup> /ha	1.000 m <sup>3</sup>	%	m <sup>3</sup> /ha
Високе шуме	621.200	27,5	157,511	43,4	253,6	3.388	37,3	5,5
Изданачке шуме	1.456.400	64,7	181,188	50	124,4	4.458	49,1	3,1
Културе и плантаже	174.800	7,8	23,787	6,6	134,1	1.233	13,6	7,1
<b>Укупно</b>	<b>2.252.400</b>	<b>100</b>	<b>362,487</b>	<b>100</b>	<b>160,9</b>	<b>9.079</b>	<b>100</b>	<b>4</b>

Извор: (Банковић и сар., 2009)

На основу података из табеле 2.2 може се закључити да највише има изданачких шума (64% површине), које по свом квалитету су значајно лошије од високих шума. То показује и дубећа запремина која је у изданачким шумама дупло мања по хектару, као и запремински прираст од 3,1 m<sup>3</sup>/ha који је 1,7 пута мањи у односу на прираст у високим шумама. Плантаже имају највећи прираст, али малу дубећу запремину.

Власничка структура шума је битна из два разлога. Први је што су приватне шуме углавном мање продуктивне од државних, а други што је тешко организовати

редовну и правилну експлоатацију из приватних шума јер зависи од воње власника, односно да ли ће је користити или не. У табели 2.3 приказан је однос површина приватних и државних шума.

Табела 2.3 Власничка структура шума у Србији по површини

Власници	Централна Србија		АП Војводина		Република Србија	
	ha	%	ha	%	ha	%
Државне шуме	1.069.200	51	124.800	81	1.194.000	53
Приватне шуме	1.029.200	49	29.200	19	1.058.400	47
<b>Укупно</b>	<b>2.098.400</b>	<b>100</b>	<b>154.000</b>	<b>100</b>	<b>2.252.400</b>	<b>100</b>

Извор: (Банковић и сар., 2009)

Власничка структура показује да укупно гледано 53% чине државне шуме, а 47% су приватне шуме. Сличан власнички однос је у централној Србији, док у Војводини учешће државних шума је преко 80%. Шуме у војводини учествују са око 7% у укупној површини шума у Републици Србији.

У табели 2.4 дата је дубећа запремина и запремински прираст у зависности од власништва.

Табела 2.4 Дубећа запремина и запремински прираст у шумама Србије

Власници	Дубећа запремина			Запремински прираст		
	1.000 m <sup>3</sup>	%	m <sup>3</sup> /ha	1.000 m <sup>3</sup>	%	m <sup>3</sup> /ha
Државне шуме	221.418	61,1	185,4	5.395	59,4	4,5
Приватне шуме	141.069	38,9	133,3	3.685	40,6	3,5
<b>Укупно</b>	<b>362.487</b>	<b>100</b>	<b>160,9</b>	<b>9.079</b>	<b>100</b>	<b>4</b>

Извор: (Банковић и сар., 2009)

Подаци из табеле 2.4 приказују да су дубећа запремина и запремински прираст већи у државним шумама у односу на приватне шуме. Овај неповољнији однос за приватне шуме настаје због већег учешћа изданаčkih шума у односу на државне шуме.

Подаци о учешћу врсте дрвећа у шумама Србије могу се видети у табели 2.5.

Табела 2.5 Дубећа запремина и запремински прираст по врстама у Србији

Врста	Дубећа запремина		Запремински прираст	
	1.000 m <sup>3</sup>	%	1.000 m <sup>3</sup>	%
Буква ( <i>Fagus sylvatica</i> )	146.850	40,5	2.781	30,6
Цер ( <i>Quercus cerris</i> )	46.980	13	1.034	11,4
Китњак ( <i>Quercus petraea</i> )	21.542	5,9	553	6,1
Сладун ( <i>Quercus farnetto</i> )	20.986	5,8	518	5,7
Граб ( <i>Carpinus betulus</i> )	15.157	4,2	334	3,7
Багрем ( <i>Robinia pseudoacacia</i> )	11.243	3,1	516	5,7
Лужњак ( <i>Quercus robur</i> )	9.242	2,5	158	1,7
Тополе ( <i>Populus sp.</i> )	6.137	1,7	338	3,7
Остали лишћари	46.833	11	1.109	11,6
<b>Укупно лишћари</b>	<b>317.930</b>	<b>87,7</b>	<b>7.341</b>	<b>80,9</b>
Смрча ( <i>Picea abies</i> )	18.810	5,2	605	6,7
Јела ( <i>Abies alba</i> )	12.659	3,5	715	7,9
Црни бор ( <i>Pinus nigra</i> )	8.304	2,3	199	2,2
Бели бор ( <i>Pinus silvestris</i> )	3.775	1	177	1,9
Остали четинари	1.003	0,3	42	0,5
<b>Укупно четинари</b>	<b>44.557</b>	<b>12,3</b>	<b>1.738</b>	<b>19,1</b>
<b>Укупно</b>	<b>362.487</b>	<b>100</b>	<b>9.079</b>	<b>100</b>

Извор: (Банковић и сар., 2009)

Учешће појединих врста дрвећа је такође врло важан податак за производњу чврстих дрвних горива. У односу на укупну количину шумских дрвних сортимената лишћарске врсте имају знатно више огревног дрвета и већу дубећу запремину у односу на четинарске врсте. Лишћари чине 87,7% укупне запремине шумског фонда, или укупно 317,93 милиона *ha*, док четинари учествују са 12,3% у укупној запремини. Учешће лишћара, према прирасту, је 80,9%, док четинари остварују 19,1% укупног годишњег прираста у шумама Србије. Најзаступљенија врста дрвећа, по запремини и запреминском прирасту, је буква, која учествује са 40,5% по запремини и 30,6% по прирасту.

У приватним шумама учешће лишћара је 93,3%, док је у државним шумама нешто мање, односно 84,1%. Разлика по врстама је још израженија, па је у државним шумама знатно веће учешће букве (47,7%), у односу на приватне (29,2%). Веће учешће храста у приватним (40,8%) у односу на државне шуме (19,1%) последица је велике заступљености цера у приватним шумама.

### 2.3 Производња дрвета у Србији

Газдовање и коришћење шума у државном власништву је поверено је јавним предузећима – ЈП „Србијашуме“, ЈП „Војводинашуме“, ЈП „Борјак“, ЈП „Национални парк Копаоник“, ЈП „Национални парк Тара“, ЈП „Национални парк Ђердап“, ЈП „Национални парк Фрушка гора“ и Шумарски факултет Универзитета у Београду. Према статистичким подацима (Билтен, 2013), у Србији је 2012. године произведено 2,7 милиона  $m^3$  шумских дрвних сортимената. Од те количине 938.596  $m^3$  (36%) је било индустријског и техничког дрвета, 1,42 милиона  $m^3$  (54%) огревног дрвета и 275.000  $m^3$  (10%) шумског остатка (у Билтену наведено као отпад).

Подаци о количинама произведених дрвних сортимената у Србији за 2012. годину дати су у табели 2.6 (Билтен, 2013).

Табела 2.6 *Посечено дрво у шуми и ван шуме у Србији 2012. године*

		Индустријско и техничко дрво	Огревно дрво	Шумски остатак (отпадак)	Укупно
Укупно Србија	свега	938.596	1.422.102	275.126	<b>2.635.824</b>
	лишћара	721.174	1.385.551	237.811	<b>2.344.536</b>
	четинара	217.422	36.551	37.315	<b>291.288</b>
Државне шуме	свега	859.66	994.672	220.793	<b>2.075.125</b>
	лишћара	667.480	959.124	186.93	<b>1.813.534</b>
	четинара	192.180	35.548	33.863	<b>261.591</b>
Приватне шуме	свега	78.936	427.43	54.333	<b>560.699</b>
	лишћара	53.694	426.427	50.881	<b>531.002</b>
	четинара	25.242	1.003	3.452	<b>29.697</b>

Извор: (Билтен, 2013)

Ако се посматра производња огревног дрвета, 70% је произведено у државним шумама, а 30% у приватним шумама. Ако се посматра по врсти дрвета, такође је 70% произведено лишћарског огревног дрвета у државном сектору, док је код четинарских врста скоро сво огревно дрво произведено у државним шумама (97%).

Највеће предузеће по површинама којима управља и контролише је ЈП „Србијашуме“ која покрива територију централне Србије. ЈП „Србијашуме“ управља са око 70% државних шума и врши технички надзор у 97% приватних



шума на својој територији. ЈП „Србијашуме“ територијално је организована на 17 шумских газдинстава.

Имајући у виду велики значај ЈП „Србијашуме“ у даљем прорачуну су узети подаци из овог предузећа као основа за прорачун потрошње енергије у процесу газдовања шумама.

#### 2.4 Анализа производње и употребе чврстих дрвних горива

При анализи утицаја процеса производње чврстих дрвних горива обично се користи систем одређивања граница „од колевке до капије“ (cradle to gate) који подразумева укључивање свих утицаја од производње садница у расаднику, припреме земљишта за пошумљавање, бриге током периода узгоја, сече, превоза, али и емисије из процеса производње коришћењем електричне енергије и фосилних горива (дизел, бензин, тнг). Изградња шумских путева и друге инфраструктуре, као и превоз радника до производње, такође би требало укључити у ову анализу (Tampier, 2005). На добијене вредности потребно је додати утросак енергије и CO<sub>2</sub>е при производњи одређене врсте чврстих дрвних горива.

На слици 2.2 приказана је подела производње, прераде, врста биогорива и начин коришћења за добијање топлотне и електричне енергије.

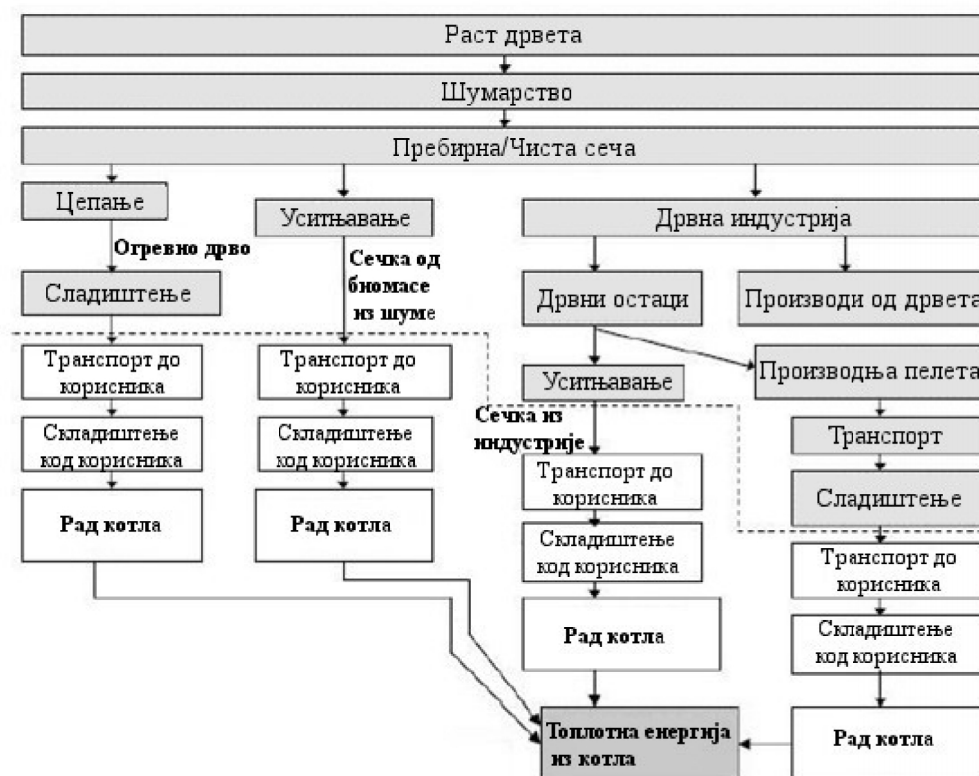


Слика 2.2 Производња и употреба биомасе (Jungmeier, 2000)

Подела сировине може се угрубо поделити на три извора: сировина из шумарства, из пољопривреде и из индустрије и отпадних материјала. Прерада сировине се дели на: механичку, термохемијску и биолошку. Подела биогорива се врши у

односу на агрегатно стање на: чврста, течна и гасовита биогорива. Коришћење биогорива може се поделити на производњу топлотне енергије и симултану производњу електричне и топлотне енергије (когенерација). Према овој подели у овом истраживању користе се извори сировине из шумарства и дрвне индустрије, за прераду сировине се користе механичка прерада и сушење као део термохемијске прераде. Посматрана су чврста дрвна горива (огревно дрво, сечка и пелет), а за коришћење посматрани су сви типови производње топлоте, док се за когенерацију посматрају само процеси који су комерцијално исплативи.

Један од модела производње и коришћења чврстих дрвених горива за производњу топлотне енергије у Европи приказан је на слици 2.3 (LOT 15, 2009).



Слика 2.3 Модел производње и коришћења чврстих дрвених горива у Европи (LOT 15, 2009)

Према моделу са слике 3.3, шумска биомаса се добија проредом или чистом сечом, а основна чврста дрвна горива су: огревно дрво и дрвна сечка (дрвни остаци из шуме). Огревно дрво се после цепања транспортује до крајњег корисника где се складишти и затим користи. Дрвна сечка од остатака из шуме се разликује од производње огревног дрвета по процесу уситњавања. Дрвни остаци

из индустрије се након прераде техничког дрвета користе као сечка или за производњу пелета. Процес производње пелета је значајно сложенији и енергетски захтевнији, а после производње пелети се транспортују и складиште пре транспорта до корисника.

Производња огревног дрвета се обично врши на лицу места у шуми и за то је потребан људски рад и погонско гориво за рад машина и транспортних средстава. Производња дрвне сечке захтева додатну потрошњу енергије, а количине и врста енергента зависе од тога где се процес уситњавања обавља и каква је полазна сировина (огревно дрво, шумски остаци, остаци из прераде дрвета) (Bates, 2009), (Sandilands, 2010).

Утрошак енергије за производњу и транспорт дрвних горива, ослобођена топлота при сагоревању и укупна еквивалентна емисија угљендиоксида нису исти за сва чврста дрвна горива већ се мењају у зависности од начина узгоја, система сече, врсте транспорта, технологије производње горива и начина сагоревања. Најмање енергије захтева огревно дрво, затим следи дрвна сечка, а највише енергије је потребно за производњу пелета (Burschel, 1993).

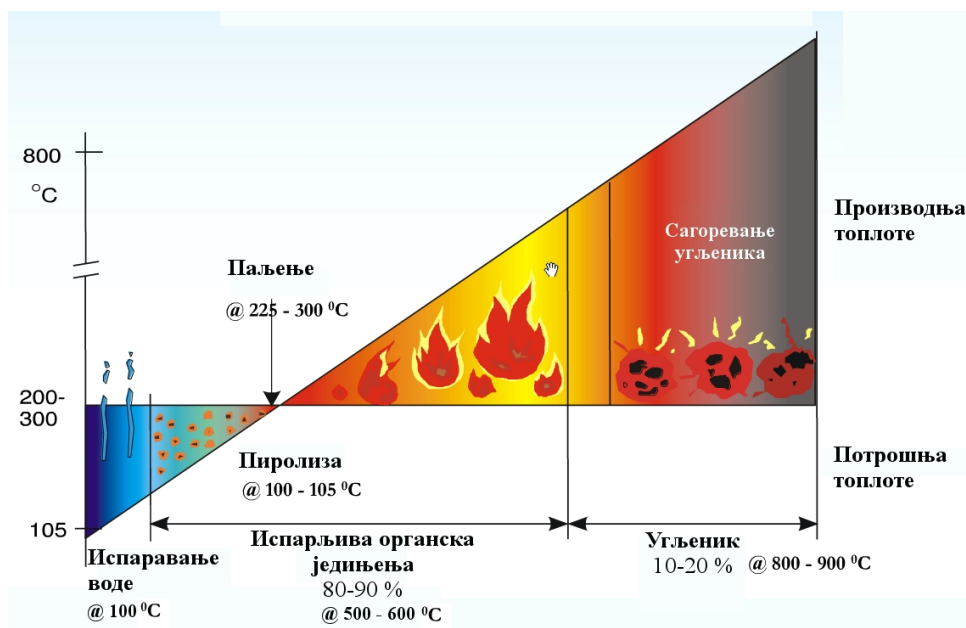
Потрошња енергије потребне за производњу пелета је највећа. Уколико је сировина већ уситњена за њено сушење користи се између 1.000 и 1.200 kWh топлотне енергије по килограму испарене воде из дрвета уз претпоставку да је почетна релативна влага дрвета око 55% (Thek, 2009; MacLean, 2009). Предност је, са гледишта заштите животне средине, што се за потребе сушења најчешће користи дрво као гориво. Коришћење дрвог горива за сушење повећава укупну количину полазне сировине потребне за производњу, али се смањује емисија гасова са ефектом стаклене баште у односу на ситуацију када би се користила фосилна горива. Потрошња електричне енергије при производњи пелета (Risović, 2008) износи 217 kWh по тони произведеног пелета. Од укупно утрошене електричне енергије око 60% користи се на пресовање пелета и око 30% се троши на унутрашњи транспорт. Важно је напоменути да и коришћење електричне енергије има значајан посредан ефекат на обим емисије гасова са ефектом стаклене баште. С обзиром да је учешће фосилних горива у производњи

електричне енергије у Србији високо (Milisavljević, 2009) то значајно утиче на повећање еквивалентне емисије угљендиоксида при производњи пелета.

За транспорт дрвне сировине и чврстих дрвних горива у Србији се најчешће користи камионски превоз. Само при извозу пелета већи произвођачи користе железнички превоз и то приликом извоза у суседне земље. Камионски превоз значајно утиче на повећања фактора еквивалентне емисије CO<sub>2</sub> за чврста дрвна горива, а утицај највише зависи од транспортних дистанци и услова транспорта.

Калоријска вредност дрвних горива зависи од врсте дрвета од кога је гориво произведено, али знатно више од влажности. Влажност огревног дрвета и сечке може бити у широким границама између 20% и 50% релативне влажности, док је за брикете и пелете влажност прописана стандардом и креће се између 8% и 10%. Нето калоријска вредност највише зависи од влажности горива и креће се од 2,16 kWh/kg (за сирово огревно буково дрво) до 4,8 kWh/kg (за пелет) (Obernberger, 2010).

Сагоревањем чврстих горива у пећима и котловима ослобађа се топлотна енергија која се може користити за различите намене. Најчешће се у уређајима врши директно сагоревање, а постоје и уређаји који користе пиролизу и гасификацију дрвета како би се продукти тих процеса такође користили за сагоревање. Процес добијања топлоте може се видети на слици 2.4.



Слика 2.4 Фазе сагоревања дрвета (Hall, 2007)

Сагоревање дрвне биомасе се може поделити на 4 фазе (Nussbaumer, 2004):

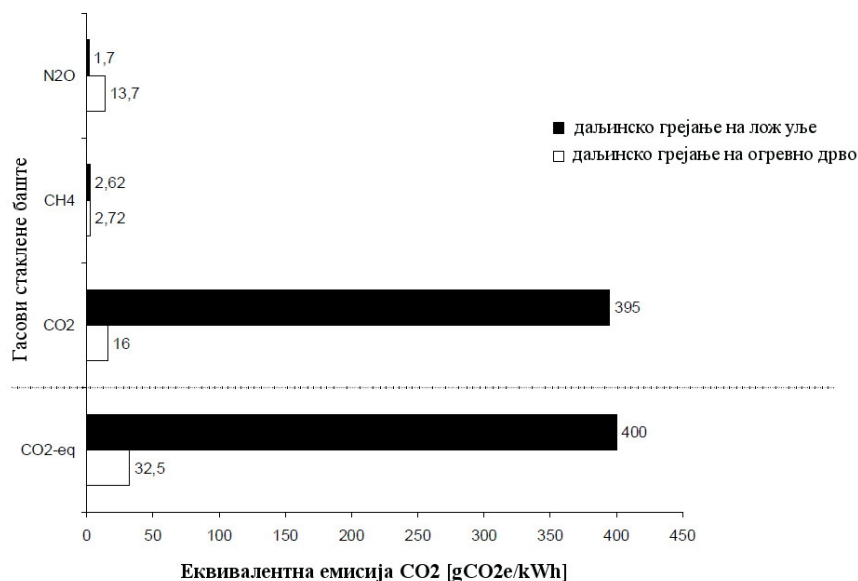
1. сушење;
2. пиролиза;
3. сагоревање угљеника;
4. оксидација гасова.

У процесу сагоревања дрво се суши на температури од 150°C до 600°C и мешањем са примарним ваздухом прелази у другу фазу (пиролизу) где се разлаже на угљенмоноксид, водоник и испарљиве органске гасове. У овом процесу око 85% дрвне материје пређе у гасовите продукте, док осталих 15% чини угљенисано дрво (ћумур). У следећој фази настали гасови оксидишу, односно сагоревају и температура расте на 1100°C до 1200°C. У последњој фази угљеник сагорева и тиме се завршава потпуно сагоревање дрвета. Ове фазе нису стриктно подељене и код савремених котлова и пећи се одвијају истовремено.

Само део расположиве енергије дрвних горива (нето калоријске вредности) се може искористи приликом трансформације у топлотну енергију. Степен искоришћења горива зависи од ефикасности, односно технолошког нивоа и стања пећи и котлова и креће се од 10% до 95% (LOT 15, 2009). Зато су котлови и пећи још један промењиви чинилац у ланцу који може значајно утицати на коначне енергетске, еколошке и економске ефекте коришћења дрвних горива и њихову конкурентност у односу на фосилна горива. Аутоматизацијом процеса сагоревања и дозирања и бољом припремом дрвних горива, ефикасност котлова се повећала са просечних 55% (1980.) до 90% (2000.) (Lasselsberger, 2001). Ови подаци упућују на то да би се заменом постојећих котлова модернијим, пре свега у погонима дрвне индустрије, значајно повећала енергетска ефикасност и смањила еквивалентна емисија CO<sub>2</sub> у атмосферу.

У зависности од свих наведених чинилаца могуће је направити утицај коришћења чврстих дрвних горива на животну средину преко утрошене енергије и емисије гасова стаклене баште (CO<sub>2</sub>e).

На слици 2.5 упоредно је приказана емисија гасова стаклене баште за даљинско грејање када се користе лож уље или огревно дрво (Jungmeier, 2000).

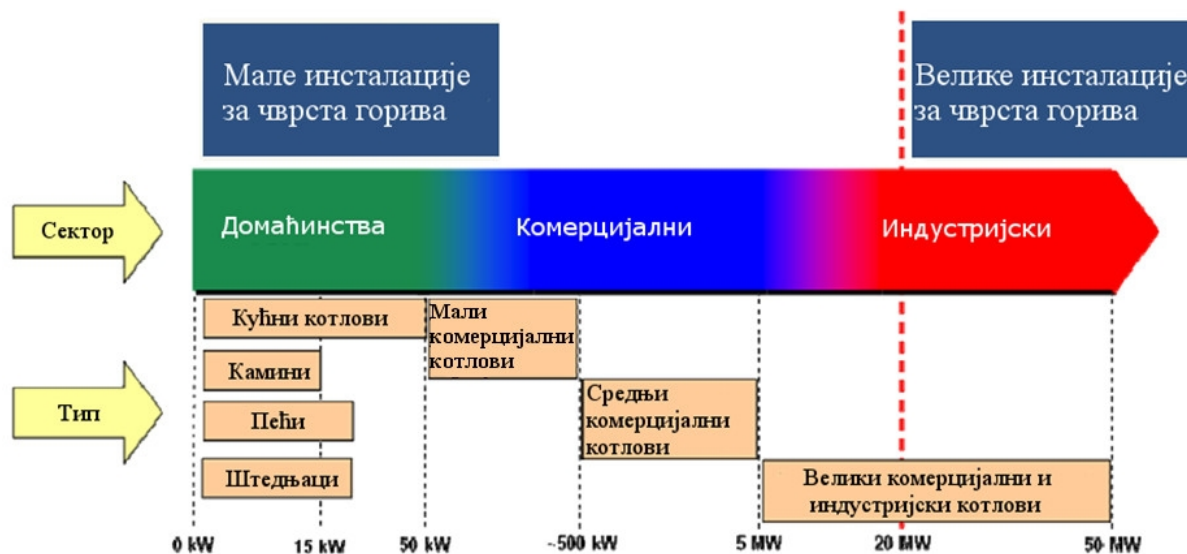


Слика 2.5 Емисија  $CO_2$ е код даљинског грејања при коришћењу лож уља и огревног дрвета (Jungmeier, 2000)

На слици 2.5 се може видети да по произведеној јединици топлотне енергије сагоревање огревног дрвета има за више од 12 пута мању емисију гасова стаклене баште у односу на сагоревање лож уља.

#### Уређаји за сагоревање чврстих дрвних горива

Подела уређаја који се користе за добијање топлотне енергије из чврстих горива представљена је сликом 2.6. Инсталације у којима се добија топлотна енергија из чврстих горива деле се на мале, средње и велике. У Србији су ретки примери инсталација које спадају у групу великих инсталација, тако да ће у овој дисертацији истраживање бити базирано на малим и средњим инсталацијама.



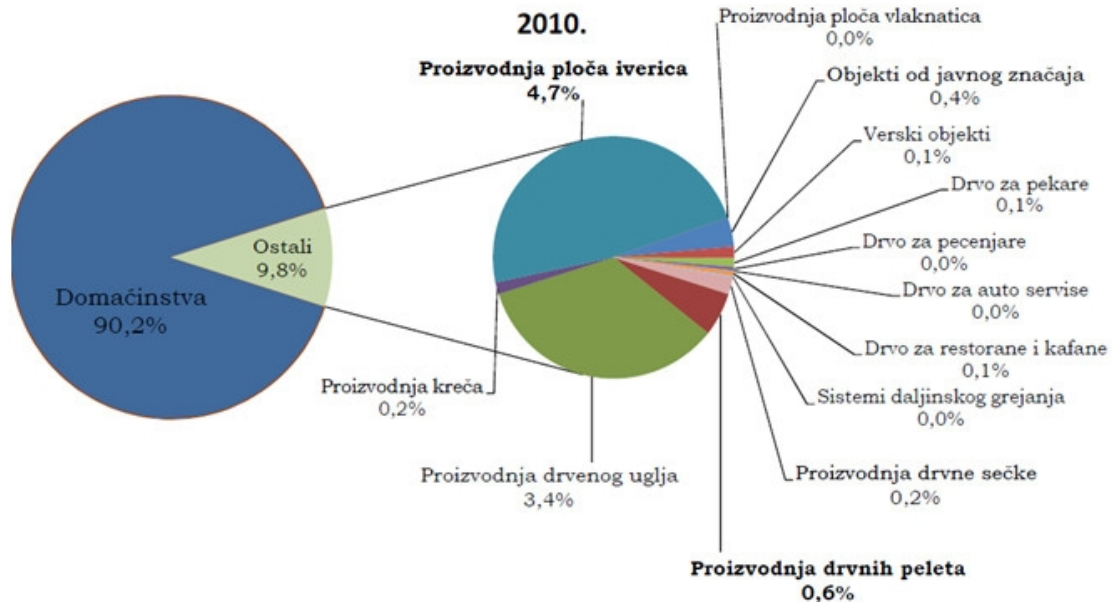
Слика 2.6 Подела уређаја за производњу топлотне енергије (LOT 15, 2009)

Коришћење топлотне енергије може бити директно (пећи) и индиректно (котлови), а поред тога уређаји који се користе за добијање топлотне енергије из чврстих горива могу се користити за кување (штедњаци), декоративно (нпр. камини), за производњу процесне топлотне енергије и за сагоревање отпада. Када се чврста дрвна горива користе за добијање топлотне енергије у малим и средњим инсталацијама, најчешће се користе за грејање објеката, кување и комерцијалне сврхе.

## 2.5 Производња чврстих дрвних горива у Србији

Према истраживањима (Glavonjić, 2011a,b), у Србији се укупно потроши око 7,4 милиона  $m^3$  дрвета, а од тога домаћинства искористе 6,4 милиона  $m^3$  за грејање и кување. Према истом извору, дрво као извор енергије учествује у финалној потрошњи енергије са око 13,6% и да коришћењем дрвета у домаћинствима емисија  $CO_2e$  је мања за око 7 милиона тона у односу на случај када би била коришћена искључиво фосилна горива. Ова количина огревног дрвета је значајно виша у односу на званичну статистику (Билтен, 2013). Сличне анализе су вршене и у суседним државама (пример Црна Гора; Danon et al., 2010). У енергетском смислу дрвна биомаса представља потенцијал од око 1,37 милиона тона еквивалентне нафте.

На слици 2.7 приказано је коришћење огревног дрвета у Србији за 2010. годину (Glavonjić, 2011b).



Слика 2.7 Коришћење огревног дрвета у Србији (Glavonjić, 2011b)

На слици 2.7 се може видети да се највише огревног дрвета користи за грејање и кување у домаћинствима (90,2%), а да се преосталих 9,8% користе за производњу плоча иверица и влакнатица (4,7%), а преосталих 5,1% за производњу осталих врста чврстих горива и за грејање различитих објеката.

У последњих неколико година, осим производње горива као што су огревно дрво и дрвени угаљ, интензивно се развија и производња брикета и пелета. У 2010. години око 400.000 кубних метара дрвета је искоришћено за производњу дрвеног угља (ћумур) (63%), пелета (16%), док су брикети и сечка имали најмање учешће (10%) (Glavonjić, 2011b).

Огревно дрво се у домаћинствима у Србији најчешће користи на неефикасан начин (Ока, 2010). О томе ће бити више резултата кад буде завршен пројекат „Ефикасно коришћење огревног дрвета у домаћинствима“ које спроводи немачка организација за међународну сарадњу GIZ, у оквиру Програма развоја одрживог биоенергетског тржишта у Србији. Пројекат се спроводи у Власотинцу, Лесковцу, Ужицу и Бајиној Башти. Критеријум за избор ових места био је проценат коришћења чврстих горива која се користе у домаћинствима.



### 3. Предмет и циљ истраживања

Дугорочно и глобално посматрано, потребе за дрветом као сировином у дрвној индустрији и енергетском сектору стално ће расти. Растућа свест о опасности које прете од климатских промена, нестабилне цене фосилних горива и потреба за сигурним енергетским изворима, основни су разлози за повећање коришћења дрвета као горива (Lindholm, 2010). Одлука већина земаља у свету да се употреба горива на бази дрвета подстиче заснована је на следећим претпоставкама:

- Дрво је (условно) обновљив извор енергије. Претпоставка важи само уз услов да је годишња потрошња дрвета за све намене, па и за производњу енергената, мања од годишњег прираста дрвета у шумама на истој територији. Ова претпоставка је у Србији испуњена јер већ низ година постоји позитивна разлика између годишњег етата и обима сеча, што потврђују званични статистички подаци (Билтен, 2013) и Национална инвентура шума Републике Србије (Банковић и сар., 2009).
- Дрво је (условно) CO<sub>2</sub> неутрално гориво. Да би овај услов био испуњен потребно је да укупна дрвна маса и површине под шумом, расту како би се при сагоревању дрвних горива ослобођени CO<sub>2</sub> могао апсорбовати за раст шуме, односно повећала дрвна маса која у том процесу настаје. Да није тако, део емисије настале при сагоревању дрвета остајао би трајно у атмосфери повећавајући већ високу концентрацију CO<sub>2</sub>. Овај услов је у Србији углавном испуњен, с обзиром да је испуњена претходна претпоставка.
- Да се при производњи дрвних горива не користе фосилна горива, односно да се сва потребна енергија за узгој, сечу, транспорт, припрему и производњу дрвних горива обезбеди из обновљивих извора. Овај услов није у потпуности испуњен нигде у свету па ни у Србији. У производњи дрвних горива се директно или индиректно троше и одређене количине фосилних горива, тако да су дрвна горива, без обзира што спадају у обновљива, „оптерећена“ одређеном количином гасова са ефектом стаклене баште.

Предмет истраживања ове дисертације су производња и коришћење чврстих дрвних горива за добијање топлотне и електричне енергије у условима који важе у Србији коришћењем анализа животних циклуса. Животним циклусом чврстих дрвних горива анализира се потрошња и структура утрошене енергије и емисија гасова са ефектом стаклене баште при њиховој производњи.

Претпоставке (хипотезе) од којих се пошло у истраживању:

1. Одрживо коришћење дрвних горива не нарушава равнотежу у природном циклусу угљеника већ га само убрзава.
2. Дрвна горива су према свим показатељима конкурентна конвенционалним (фосилним) горивима.
3. Годишње количине дрвне биомасе које се користите у Србији за енергију (срачунате према међународно признатој методологији) су респектабилне.
4. Дрвна биомаса за енергију се у Србији у великој мери користи на енергетски и еколошки неефикасан начин.
5. Производња чврстих дрвних горива (сечке, брикета и пелета) у Србији је тек у развоју што даје могућност да се на њу утиче са становишта бољег искоришћења расположивог потенцијала.
6. Квалитет чврстих дрвних горива на тржишту у Србији је углавном нижи у односу на европске стандарде.
7. Садашње учешће фосилних горива у производњи чврстих дрвних горива у Србији може бити смањено.
8. Укупни ефекти замене фосилних горива дрвним горивима се могу значајно увећати доградњом или заменом постојећих пећи и котлова.

Прва хипотеза потврђује се кроз претходна истраживања образложењем да су шуме резервоари угљендиоксида и да тако играју велику улогу у смањењу концентрације овог једињења у атмосфери, али да је то смањење само привремено и пасивно решење. Дугорочно гледано, коришћењем дрвне биомасе као горива смањује се коришћење фосилних горива и убрзава се кружење угљендиоксида у атмосфери у односу на природно разлагање.

Трећа хипотеза је потврђена кроз резултате истраживања (Glavonjić, 2011a,b) који су приказани у предходним истраживањима. У Србији се укупно потроши око 7,4

милиона  $m^3$  дрвета, а од тога домаћинства искористе 6,4 милиона  $m^3$  за грејање и кување. Према истом извору, дрво као извор енергије учествује у финалној потрошњи енергије са око 13,6% и да коришћењем дрвета у домаћинствима емисија  $CO_2$  је мања за око 7 милиона тона у односу на случај када би била коришћена искључиво фосилна горива...

Пета хипотеза је потврђена кроз приказане резултате истраживања (Ellul, 2012) у уводу дисертације. Истраживање потврђује да се 90% дрвне биомасе у Србији користи у виду огревног дрвета. Преосталих 10% чине производња осталих врста чврстих дрвних горива (брикети, пелети, ђумур).

Шеста хипотеза се није могла директно потврдити или оповргнути. За квалитет чврстих дрвних горива на домаћем тржишту довољна је декларација произвођача која није издата од стране сертификованих лабораторије и квалитет домаћег горива није могуће поредити са европским стандардима. У Србији је тек недавно комплетирана збирка стандарда из одласти чврстих горива и тек од скоро постоји акредитована лабораторија за њихово испитивање.

Циљ истраживања је формирање јединственог модела који би обухватио све битне факторе који утичу на потрошњу енергије и емисије гасова са ефектом стаклене баште у производњи чврстих дрвних горива. Формирани модел би служио за оцену производње појединих чврстих дрвних горива и њиховог коришћења (сагоревања) са енергетског и еколошког становишта.

Обухваћени су следећи фактори који утичу на потрошњу енергије при производњи чврстих дрвних горива и ефекте њиховог сагоревања:

- почетна влажност дрвних горива
- степен припреме горива
- сушење дрвета (природно и вештачко)
- транспорт
- карактеристике котлова и пећи у којима се користе дрвна горива

Наведени фактори су често међусобно зависни и предложени модел би требао да омогући да се варирањем ових фактора истражи њихов утицај на карактеристике производних циклуса посматраних горива.

Да би се то остварило било је потребно урадити следеће:

- Извршити индентификацију фактора у животном циклусу чврстих горива на бази дрвета и анализирати њихов утицај на емисију гасова са ефекима стаклене баште и
- Предложити одговарајућа решења за ефикасније и еколошки прихватљивије коришћење потенцијала дрвне биомасе, производњу дрвних горива и њихово сагоревање.

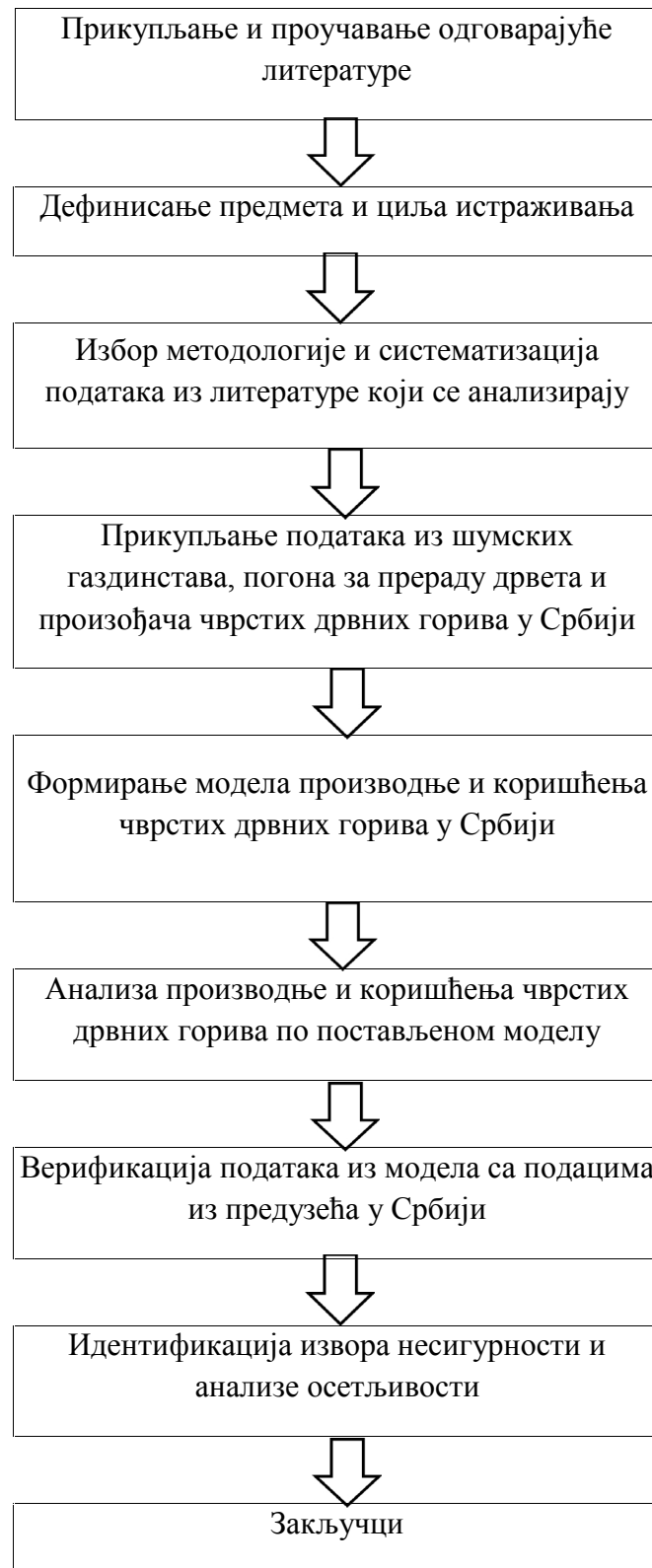
#### **4. Методе истраживања**

За потребе реализације дефинисаног програма истраживања усвојена је методолошка основа која се састоји од општих и посебних научних метода истраживања. Од општих научних метода у раду су коришћене метода анализе, индукције, дедукције, синтезе и генерализације. Од посебних научних метода коришћена је метода моделовања кроз методологију оцењивања животног циклуса (LCA) чврстих дрвних горива. Прикупљање одговарајућих података спроведено је применом метода и техника испитивања. Потребни подаци за истраживање прикупљени су из статистичких публикација, стручних и научних часописа и база података на интернету који су наведени су у поглављу Литература. Осим из наведених извора, подаци за производњу чврстих дрвних горива у Србији прикупљени су анкетирањем шумских газдинстава, произвођача дрвне сечке и пелета, као и организација које се баве транспортом ових производа. Прикупљени подаци статистички су обрађени у програму MS EXCEL, а резултати статистичке обраде употребљени су као улазне вредности за сопствени модел и програм SimaPro 8.0.1.

Методологија оцене животног циклуса производа (LCA) састоји се из три дела.

- Први део се односи на формирање модела производње и коришћења одабраних дрвних горива (огревног дрвета, сечке и пелета) у Србији као основе за оцењивање њиховог животног циклуса.
- Други део обухвата израчунавање потребних количина енергије за производњу одабраних чврстих дрвних горива и одговарајуће емисије гасова са ефектом стаклене баште са циљем утврђивања односа уложене и расположиве енергије чврстих дрвних горива и утицај процеса производње тих горива на животну средину.
- Трећи део подразумева идентификацију извора несигурности и анализе осетљивости у животним циклусима дрвних горива, на промене спољних фактора.

Програм истраживања ове дисертације представљен је шематски на шеми 4.1.



Шема 4.1 Програм истраживања докторске дисертације

#### 4.1 Оцењивање животног циклуса

Оцењивање животног циклуса (LCA) представља аналитички инструмент у области заштите животне средине који, коришћењем различитих приступа, омогућава боље разумевање и поређење различитих производа или услуга. Посматрани животно циклуси могу бити:

- са потпуним приступом који прати производ од настанка до престанка коришћења методама ”од колевке до гроба” или „од колевке до колевке“,
- са парцијалним приступом којим је могуће оценити делове животног циклуса производа методама „од колевке до капије“ и „од капије до капије“.

LCA анализира све или више фаза животног циклуса производа, узима у обзир различите утицаје тих фаза на животну средину и природне ресурсе, оцењује и анализира и интерпретира резултате.

LCA је развијен као алат за индустрију за доношење одлука о изради и квалитету производа. Први LCA (1969-1972) направљен је за отпад и материјале за паковање и био је фокусиран на природне ресурсе и заштиту животне средине. Са првом нафтном кризом (1973) почеле су да се раде студије за производњу и коришћење горива, мада се у овим студијама више анализирају енергетски биланси (Baumann & Tillman, 2004). Процедуре и методолошки приступ коришћења LCA стандардизован је 1997. године (ISO 14 040), а издала га је Светска организација за стандардизацију (International Organization for Standardization, ISO)

Методологија анализе животног циклуса дата је стандардима:

- SRPS ISO 14040:2008 – Оцењивање животног циклуса – Принципи и оквир;
- SRPS ISO 14044 :2009 – Оцењивање животног циклуса – Захтеви и упутства за примену (који замењује SRPS ISO 14041:1998, SRPS ISO 14042: 2000 и SRPS ISO 14043: 2000)

Серијом стандарда ISO 14040 успостављен је флексибилан оквир под којим се LCA студија спроводи на практичан и технички поуздан начин. Јединствена метода за спровођење LCA студије не постоји. У истраживању је могућа флексибилност приликом спровођења LCA студије која зависи од специфичности

самог посматраног производа или услуга. Процена животног циклуса подразумева поједностављивање сложених система, као и субјективне процене, што уз примене различитих LCA метода за исти производ могу дати неупоредиве податке.

ISO организација дефинише студију оцењивања животног циклуса као: ”технику која проучава аспекте заштите животне средине и могуће утицаје на животну средину током целокупног животног века производа” кроз:

- израду инвентара релевантних улаза и излаза датог система производа,
- вредновање потенцијалних утицаја на животну средину датих улаза и излаза и
- интерпретацију резултата инвентара анализе и процене утицаја у односу на постављене циљеве студије.

Стандард SRPS ISO 14040 пружа принципе и оквире за оцењивање животног циклуса. Оцењивање животног циклуса - техника оцењивање животног циклуса јесте инструмент који узима у обзир све операције везане за један производ или услугу. Овим стандардом дефинисане су четири фазе које студија LCA треба да има:

1. Дефинисање циља, подручја примене, и обима животног циклуса. У овој фази се одређује детаљност студије, као и основне методе и поступци при обради података. У дефинисању циља одређују се функције система, функционалне јединице система, дефинишу се границе система и процедуре распореда.
2. Анализа инвентара животног циклуса LCI (енгл. Life cycle inventory). У овој фази се прикупљају улазни и излазни подаци свих процеса који учествују у производном ланцу посматраног производа.
3. Оцењивања утицаја животног циклуса - LCIA (енгл. Life cycle impact assessment). У овој фази успостављају се релације, односно повезаност појединих улаза и излаза са утицајима на животну средину. Циљ LCIA фазе је испитивање система производа из перспективе утицаја на животну средину. Врло је битно добро одредити методе вредновања величина добијених у LCI, јер од тога зависи резултат који се добија.



4. Интерпретације резултата примене животног циклуса производа. У овој фази се врши систематски поступак за идентификовање, проверу, квалификовање и оцењивање информација добијених на основу резултата анализе инвентара животног циклуса и/или оцењивања утицаја животног циклуса система производа. Фаза интерпретације треба да донесе резултате који су конзистентни са дефинисаним циљем и предметом и који објашњавају ограничења и обезбеђују препоруке. То је заправо процес балансирања важности утицаја одређених ефеката које производ или услуга продукује на животну средину .

На крају се дају закључна разматрања урађене анализе, која треба да дају потпуну и што мање пристрасну оцену целе студије везано за намену производа који се оцењује.

Програми који се користе за прорачун LCA су: **Bees** (NIST – National Institute of Standards and Technology), **EcoCalculator** (The Athena Institute) **ECO-it** (Pré Consultants BV), **EcoLab version** (Nordic Port AB), **GaBi 4** (PE Product Engineering GmbH), **PEMS** (Pira International), **Sima Pro** (Pré Consultants BV), **Umberto** (IFU Institut für Umweltinformatik, Hamburg GmbH), **GEMIS** (Global Emission Model for Integrated Systems)

За потребе истраживања у овој дисертацији коришћен је програм **Sima Pro 8.0.1**. фирме PRé Consultants bv, Холандија, који је водећи светски програм за прикупљање, анализу и праћење одрживости производа или услуга. Овај програм се користи у научне сврхе за истраживања , у индустрији и консултантским предузећима.

Програм садржи 10 база података инвентара животног циклуса (LCI), а у овом истраживању коришћена је швајцарска база података Ecoinvent v3.0. Ова база садржи преко 10.000 процеса из области енергетике, пољопривреде, транспорта, биогорива, грађевинског материјала, материјала за паковање итд.

#### **4.2 Формирање модела производње и коришћења чврстих дрвних горива**

Производња чврстих дрвних горива захтева улагање одређене количине енергије и тиме утиче на загађивање животне средине. Да би се добила слика о томе

колико се енергије, односно горива троши и колико се тиме утиче на животну средину, потребно је дефинисати границе истраживања.

На слици 4.1 представљен је општи модел производње дрвних горива, односно кружење гасова са ефектом стаклене баште који су представљени као еквивалентна емисија угљендиоксида ( $\text{CO}_2\text{e}$ ).



Слика 4.1 Општи модел производње дрвних горива и кружење гасова стаклене баште

Шума као екосистем одржава равнотежу у кружењу  $\text{CO}_2$ . Коришћењем дрвета као горива кружење  $\text{CO}_2$  се убрзава и проширује ван граница шумског екосистема, али овај процес остаје  $\text{CO}_2$  „неутралан“ и не утиче на повећање концентрације гасова са ефектом стаклене баште у атмосфери. Тек, уколико се у појединим сегментима производње дрвних горива користе фосилна горива њихова емисија утиче на повећање концентрације гасова стаклене баште у атмосфери.

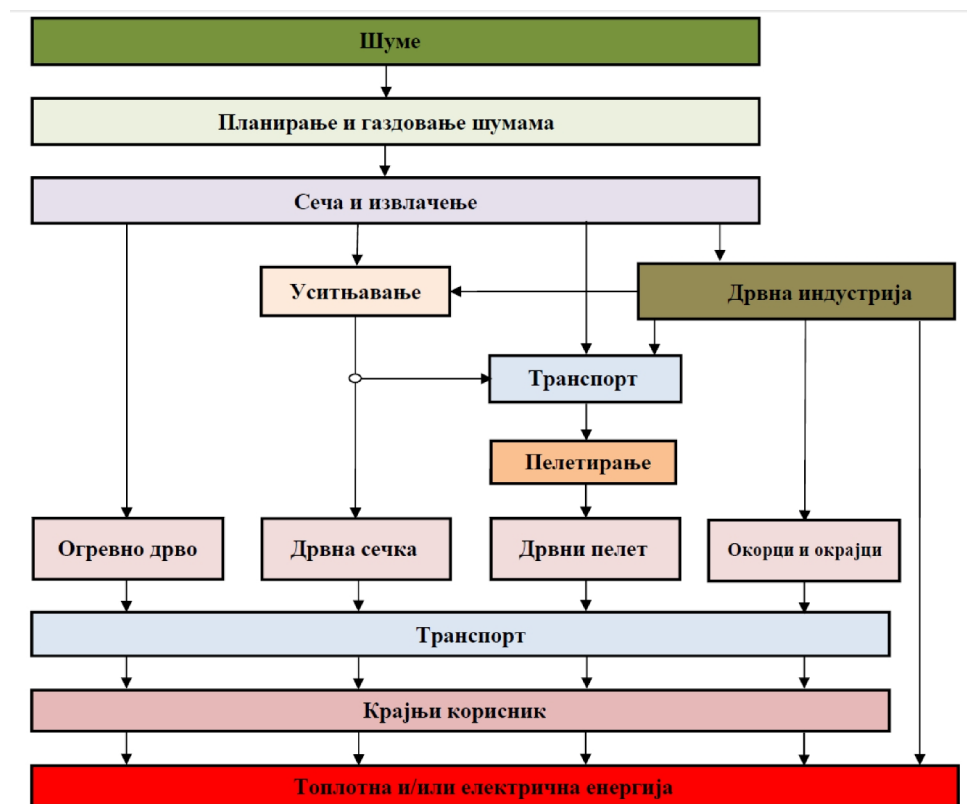
Формирани модел приказује битне делове производње и коришћења чврстих дрвних горива у Србији. Због тога је битно дефинисати све процесе који чине овај модел. Неки од ових процеса могу бити исти за већину посматраних чврстих дрвних горива, а неки могу бити специфични само за одређено гориво.

Модел производње чврстих дрвних горива који је усвојен за потребе ове дисертације састоји се од следећих процеса:

- Планирање и газдовање шумама,
- Сеча и извлачење,

- Уситњавање,
- Пелетирање,
- Транспорт,
- Употреба:
  - производња топлотне енергије,
  - комбинована производња топлотне и електричне енергије.

Предложени општи модел производње и коришћења чврстих дрвних горива у Србији приказан је на слици 4.2 на којој се види како су међусобно повезане целине модела.



Слика 4.2 Предложени општи модел производње и коришћења чврстих дрвних горива у Србији

У предложеном моделу приказани су токови производње три врсте чврстих дрвних горива и то за: огревно дрво, сечку и пелет. Разматран је само један подмодел за производњу огревног дрвета, четири подмодела за проиводњу сечке и два подмодела за производњу пелета. У модел су укључени и дрвни остаци из дрвне индустрије, али само као сировина за сечку и пелет.

У формираном моделу основни извор сировине за производњу чврстих дрвних горива је биомаса из шуме (огревно дрво, дрво лошијег квалитета и шумски остаци). Дрвни остаци из механичке прераде дрвета, који су део извора дрвне биомасе из шуме, посматрају се као допунски извор за производњу чврстих дрвних горива и настали су као остатак током израде производа од дрвета из техничког дрвета.

Код сировине која долази из шуме, први процес представља „Планирање и газдовање шумама“ који обухвата активности: дугорочно планирање, рад на нези, заштити и обнављању постојећих шума, оснивање нових шума итд. После шумарства следи процес „Сече и извлачења“ шумских сортимената. У овом процесу активности су: обарање стабала, израда дрвних сортимената и њихово извлачење до шумског стоваришта на тврдом путу. Ове прве две операције заједничке су за све врсте горива, осим за сечку добијену од шумских остатака код које се не рачуна шумарство.

У производњи дрвне сечке након сече и извлачења сировине врши се њено „Уситњавање“ машинама дробилицама, осим код подмодела где се уситњавање врши на месту коришћења дрвне сечке. У процесу „Пелетирања“ уситњавање је део тог процеса, а активности у овом процесу су: уситњавање, сушење, пресовање и хлађење.

Процес „Транспорта“ произведених чврстих дрвних горива до крајњег корисника врши се камионским превозом. Код дрвних пелета дрвна сировина се транспортује до производног погона (осим када се пелет производи од дрвних остатака на месту настајања сировине).

Дрвна сировина која долази из погона дрвне индустрије има нешто другачија својства у односу на сировину која долази директно из шуме. Сировину чине пре свега дрвни остаци који могу бити крупни или ситни, влажни или суви, третирани или нетретирани другим хемијским једињењима. Карактеристике зависе из ког дела процеса прераде дрвета долази.

Да би се добила права слика колико у добијеној енергији има енергије из других горива, потребно је знати ефикасност коришћења чврстих дрвних горива у процесу „Употреба“. У овом моделу је усвојена претпоставка да се чврста дрвна

горива могу користити на два начина: за производњу топлотне енергије сагоревањем у пећима и котловима и комбиновану производњу топлотне и електричне енергије (когенерација).

За сваку ову целину одређене су потрошње горива (врсте и количине по операцијама), а преко нето калоријске вредности употребљених горива, добијена је утрошена енергија и емисија CO<sub>2</sub>e (табела 4.1). На основу добијених вредности израчунати су следећи показатељи за посматране врсте чврстих дрвних горива:

1. укупна емисија еквивалентног CO<sub>2</sub> у производњи чврстих дрвних горива,
2. однос уложене енергије и енергије из добијених горива (EROI),
3. нето енергија горива (NEROI) и ефекти коришћења расположивих ресурса,
4. резултати анализе животног циклуса горива (LCA).

Производња чврстих дрвних горива у Србији је стандардизована серијом стандарда који су преузети од европских стандарда. Према SRPS EN 14588:2010 дрвна горива су врсте биогорива чије порекло директно или индиректно потиче из дрвне биомасе. Чврста дрвна горива (fuelwood, energy wood) према истом стандарду су дрвна горива код којих је дрво као материја сачувало своју структуру. Обе ове дефиниције усвојене су из FAO терминологије за биоенергију (FAO, 2004). Дефинисање чврстих дрвних горива и модели који су коришћени у овом истраживању дати су на основу производње тих горива у Србији.

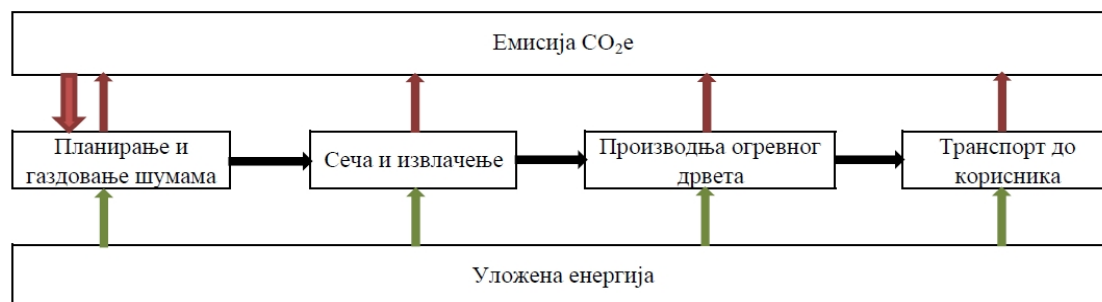
Сваки подмодел је направљен тако да је прилагођен за коришћење програма Sima Pro, којим се израчунавају ефекти LCA конкретног горива на животну средину.

#### 4.2.1 Огревно дрво

Огревно дрво се према стандарду SRPS EN 14588:2010 дефинише као „сечено и понекад цепано чврсто дрвно гориво спремно за коришћење у уређајима за сагоревање дрвета као што су пећи, камини и котлови“, уз напомену да огревно дрво углавном има уједначену дужину у опсегу од 150 mm до 1.000 mm. Стандард SRPS EN 14961:2010 дефинише карактеристике огревног дрвета као горива и то по врсти дрвета, димензијама (дужина и пречник у cm), влажности и начину мерења (запремински: просторни m<sup>3</sup>, насипни m<sup>3</sup> и масени: kg). Карактеристике које нису обавезне по овом стандарду су: густина енергије (kWh/kg или

kWh/насипни  $m^3$ ), процентуално учешће цепаница, учешће трулежи у сировини и о квалитету чела цепаница (глатка или храпава и једнака или неједнака).

Подмодел производње огревног дрвета представљен је на слици 4.3 на којој су приказани процеси производње овог горива.



Слика 4.3 Подмодел „Огревно дрво“ - производња огревног дрвета

Огревно дрво представља традиционално гориво. Најчешће дужине у којима се данас производи и дистрибуира су: 1,0 m; 0,5 m; 33 cm и 25 cm. За ефикасно сагоревање пожељно је да садржај воде у огревном дрвету буде испод 25%, што се постиже природним сушењем.

#### 4.2.2 Дрвна сечка

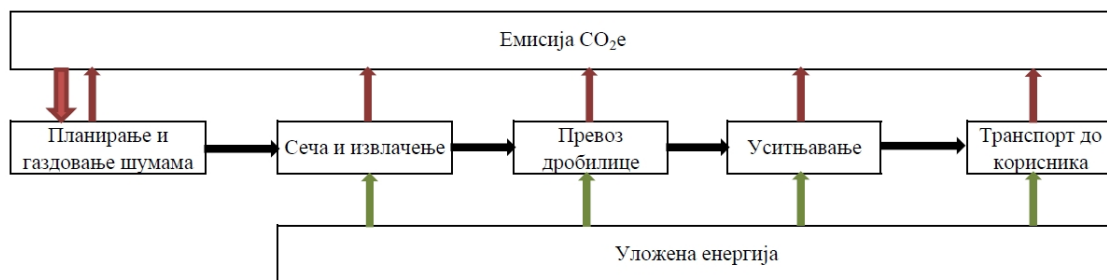
Дрвна сечка је „уситњена дрвна биомаса у форми комадића са дефинисаним димензијама произведен уситњавањем оштрим алатом као што су ножеви“, са напоменом да дрвна сечка има неправилан облик са типичном дужином од 5 mm до 50 mm и малом дебљином у поређењу са осталим димензијама (SRPS EN 14588:2010). Карактеристике дрвне сечке се дефинишу по димензијама, влажности, проценту пепела, може да садржи податак о количини азота и хлора, доњу топлотну моћ (MJ ili kWh) по јединици пријема (запремински: просторни  $m^3$ , насипни  $m^3$  и тежински: kg). При дефинисању својства дрвне сечке може се добити податак о насипној маси ( $kg/m^3$ ) и тачки топљења пепела (SRPS EN 14961:2010, табела 5).

Дрвна сечка која се добије ситњењем крупних остатака из пиланске прераде дрвета назива се дрвна сечка из индустрије. Сечка се, као гориво, користи у аутоматизованим котловима и пећима и пружа једнаки комфор и практичност као мазут, лож уље, течни нафтни гас или природни гас.

Основни недостатак сечке као горива је ниска густина енергије. Због мале насипне густине за складиштење сечке потребно је двоструко више простора него за складиштење целаног дрвета исте калоријске вредности.

У раду су размотрена четири различита циклуса производње сечке у зависности од сировине која се користи (огревно дрво, шумски остатак, остатак из прераде дрвета) и локације где се уситњавање обавља, да ли се производи мобилним или стационарним дробилицама.

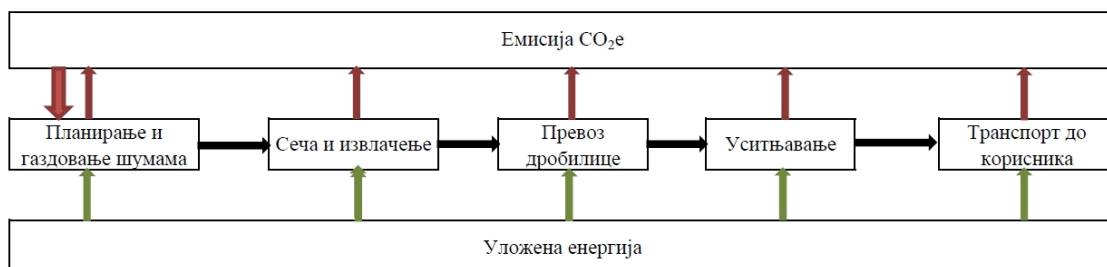
Мобилне дробилице се користе за производњу сечке на терену и код овог начина производње узета су два примера: производња сечке од шумских остатака и од огревног дрвета. Мобилне дробилице користе дизел као погонско гориво. Подмодел производње дрвне сечке од шумских остатака представљен је шематски на слици 4.4.



Слика 4.4 Подмодел „Сечка<sub>1</sub>“ - производња сечке од шумских остатака мобилним дробилицама

Са слике 4.4 се види да се у подмоделу Сечка<sub>1</sub> приликом израчунавања потребне енергије не узима у обзир део енергије који се троши у планирању и газдовању шумама, па према томе у том сегменту нема ни емисије гасова стаклене баште.

На слици 4.5 представљен је подмодел производње сечке од огревног дрвета.

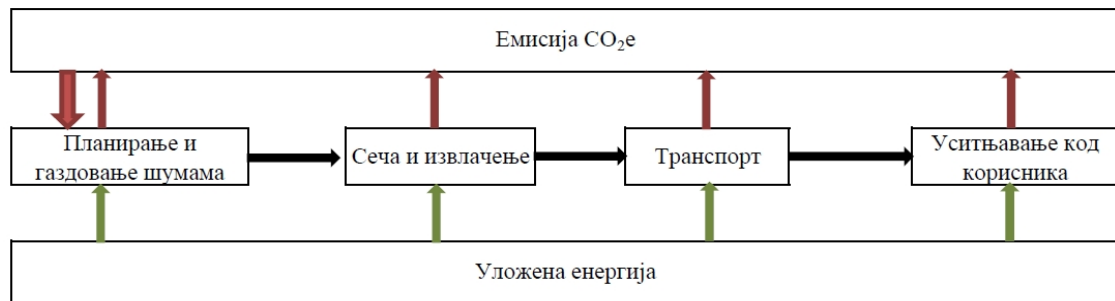


Слика 4.5 Подмодел „Сечка<sub>2</sub>“ - производња сечке од огревног дрвета мобилним дробилицама

За разлику од претходног, у подмоделу *Сечка<sub>2</sub>* укључен је утрошак енергије у планирању и газдовању шумама и одговарајућа емисија гасова са ефектом стаклене баште која се том приликом јавља.

Код коришћења стационарних дробилица, сировина се довози до места где се налази дробилица и за овај случај узети су примери када се производи сечка од огревног дрвета и од дрвних остатака из дрвне индустрије.

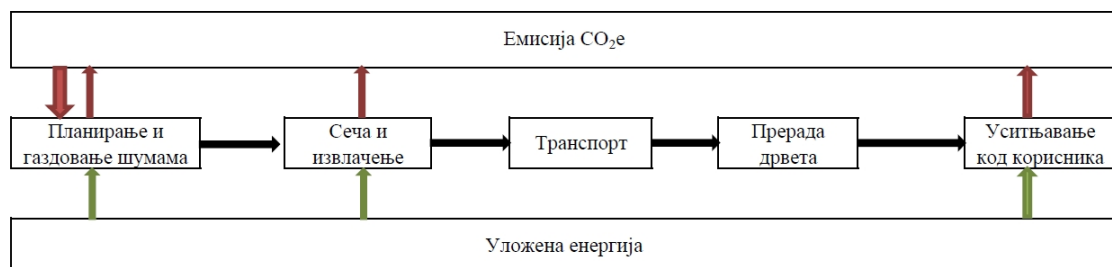
На слици 4.6 приказан је подмодел *Сечка<sub>3</sub>* за производњу сечке коришћењем стационарних дробилица на електрични погон где је полазна сировина огревно дрво.



Слика 4.6 Подмодел „Сечка<sub>3</sub>“ - производња сечке од огревног дрвета стабилним дробилицама

Подмодел са слике 4.6 представља ситуацију када се сировина (огревно дрво) довози до потрошача где се ситни и сечка користи у котловима. У овом подмоделу је усвојена претпоставка да се огревно дрво природно суши на шумском путу и просушено транспортује до корисника.

На слици 4.7 приказан је подмодел *Сечка<sub>4</sub>* за производњу сечке од дрвних остатака из дрвне индустрије.



Слика 4.7 Подмодел „Сечка<sub>4</sub>“ - производња сечке од дрвних остатака на месту коришћења



Подмодел на слици 4.7 се разликује у односу на претходни по томе што се, при прављењу енергетског биланса, не рачунају енергије утрошене за транспорт до пилане и обраду трупца у сортименте. Ситни дрвни остаци се директно ложе, а крупније остатке потребно је пре ложења уситнити. Овај подмодел се односи на коришћење крупних дрвних остатака у погонима дрвне индустрије за добијање процесне топлотне енергије или когенерацију.

#### 4.2.3 Дрвни пелет

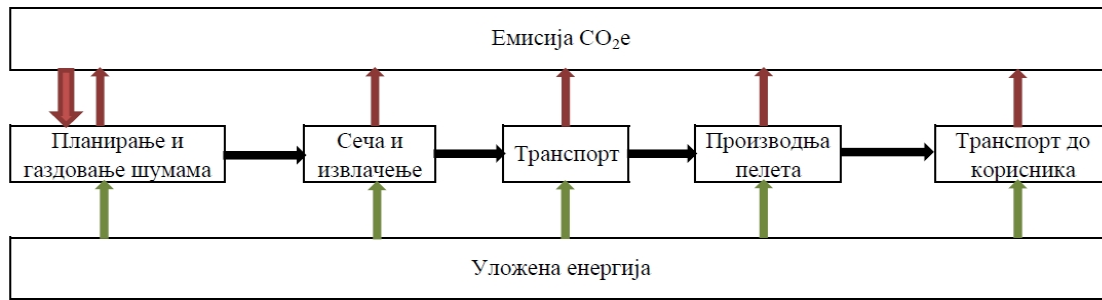
Пелет се дефинише као “ пресовано биогориво направљено од прашкасте биомасе са или без адитива, најчешће цилиндричног облика различите дужине, најчешће од 3,15 mm до 40 mm, ломљених крајева“, са напоменом да се углавном праве у матрици, да је влажност пелета углавном мања од 10% (SRPS EN 14588:2010). Дрвни пелет се дефинише по димензијама (пречник, дужина), влажности (до 10% или до 15%), садржају пепела, механичкој чврстоће (ситњење услед абразије при транспорту), количини прашине, количини адитива, насипној маси ( $\text{kg/m}^3$ ), калоријској вредности (MJ или kWh) по јединици тежине (kg) (SRPS EN 14961:2010, табела 4). Пелет се још може дефинисати и по количини сумпора, азота и хлора, као и по тачки топљења пепела.

Поступак пелетирања је технолошки процес, који се састоји из више фаза које се морају извршавати одређеним редоследом. Технолошки процес се састоји из следећих фаза:

1. пријем и складиштење сировине;
2. уситњавање;
3. сушење;
4. просејавање и одстрањивање страних тела, попут камења, метала итд.;
5. фино млевање;
6. пресовање;
7. хлађење пелета;
8. поновно просејавање ради одстрањивања измрвљених комада;
9. складиштење;
10. паковање;
11. дистрибуција;

Поред високог садржаја енергије пелет је гориво које захтева најмање складишне просторе у односу на остала чврста дрвна горива. Сировине од које се производи пелет у Србији су огревно дрво и дрвни остаци, па су на основу улазне сировине направљена два подмодела производње пелета.

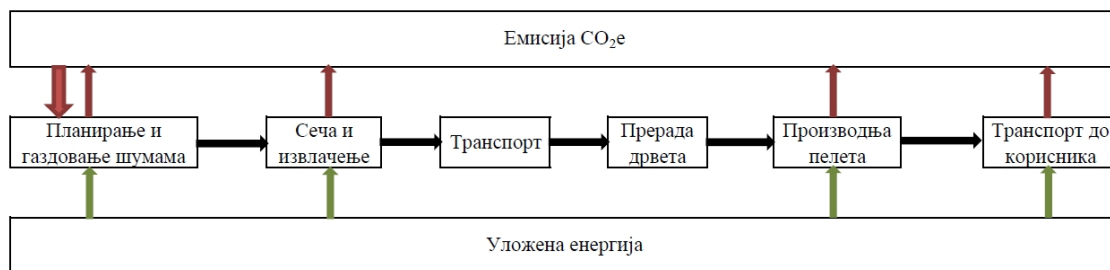
На слици 4.8 представљен је подмодел производње дрвних пелета од огревног дрвета.



Слика 4.8 Подмодел „Пелет<sub>1</sub>“ - производња дрвних пелета од огревног дрвета

Подмодел *Пелет<sub>1</sub>* у себи садржи све процесе који се користе у производњи чврстих дрвних горива. Кроз овај подмодел може се видети утицај појединих процеса на укупни утрошак енергије и емисије CO<sub>2</sub>e.

Подмодел *Пелет<sub>2</sub>* представљен је на слици 4.9 и приказује производњу дрвних пелета од дрвних остатака из механичке прераде дрвета.



Слика 4.9 Подмодел „Пелет<sub>2</sub>“ - производња пелета од дрвних остатака

Подмодел *Пелет<sub>2</sub>* подразумева производњу пелета од дрвних остатака насталих механичком прерадом техничког дрвета, уз претпоставку да су погони на истој локацији.

Производња пелета захтева значајне количине топлотне енергије за фазу сушења дрвне сировине. У постављеним подмоделима производње пелета топлотна енергија се добија сагоревањем дела дрвне сировине, што повећава количину сировине потребне за производњу пелета.

Употреба електричне енергије највише оптерећује емисију гасова стаклене баште у производњи пелета. Когенеративном производњом топлотне и електричне енергије могуће је смањити укупну емисију CO<sub>2</sub>e. У оквиру когенерацијске производње топлотне и електричне енергије капацитет се дефинише потребом за топлотном енергијом за фазу сушења дрвне сировине при производњи пелета.

### 4.3 Потенцијал глобалног загревања

Утицај фосилних горива утрошених за производњу дрвних горива може се оценити потенцијалом глобалног загревања (Global Warming Potential - GWP) емисије CO<sub>2</sub> као и неких других гасова као што су CH<sub>4</sub> и NO<sub>2</sub> (Forster et al, 2007). GWP посматра утицај на глобално загревање које неко једињење има у неком периоду у односу на утицај емисије угљендиоксида за исти период. Пример за то су метан (CH<sub>4</sub>) који има 25 пута већи утицај или азот-диоксид (NO<sub>2</sub>) који има чак 298 пута већи утицај на глобално загревање него CO<sub>2</sub> (Forster et al, 2007).

Прорачун израчунавања GWP усвојен је од стране Међувладиног панела за климатске промене - IPCC (2001). GWP се дефинише као однос интегралања радијационе апсорпције у времену за тренутну вредност 1 kg посматране супстанце у односу на 1 kg референтног гаса.

$$GWP(x) = \frac{\int_0^{TH} a_x \cdot [x(t)] dt}{\int_0^{TH} a_r \cdot [r(t)] dt} \quad 4.1$$

Где је: TH – временски период за који се посматра (временски хоризонт), a<sub>x</sub> – ефикасност радијације посматране супстанце (нпр. Wm<sup>-2</sup> kg<sup>-1</sup>), x(t) – време потребно да се та супстанца разложи, a<sub>r</sub> – ефикасност радијације референтног гаса (нпр. CO<sub>2</sub>)

Потенцијал глобалног загревања зависи од временског периода посматрања утицаја ових гасова на стварање ефекта сталене баште. Најчешће се користе временски периоди од 20, 100 и 500 година. Већина гасова са ефектом стаклене баште постепено се разлажу и имају све мањи утицај, а један део гасова се значајно спорије разлаже и због тога је потребно узети дужи период посматрања. У овом истраживању користи се временски период од 100 година (GWP 100).

Табела 4.1 Вредности GWP за различите гасове и периоде посматрања

Име	Хемијска ознака	Временски период посматрања утицаја (GWP)		
		20 година	100 година	500 година
Угљендиоксид	CO <sub>2</sub>	1	1	1
Метан	CH <sub>4</sub>	72	25	7.6
Азот субоксид	N <sub>2</sub> O	289	298	153

Извор: (Forster et al, 2007)

Нето калоријска вредност горива узети су из литературе (Staffell, 2011). Вредности еквивалентне емисије угљендиоксида при производњи и транспорту чврстих дрвених горива узети су из базе података Ecoinvent (2014), који се користе и у програму SimaPro за прорачуне утицаја производње на животну средину. У табели 4.2 дати су параметри за прорачуне у овом истраживању.

Табела 4.2 Енергетске вредности и емисија CO<sub>2</sub>e за горива коришћена у производњи чврстих дрвених горива

Гориво	Енергија		CO <sub>2</sub> e kg/kWh
	kWh/kg	kWh/L	
Бензин	12,26	9,08	0,2532
Бензин - 2-тактна мешавина	12,26	9,08	0,2944
ТНГ	12,86	6,85	0,2532
Дизел, грађевинске машине	11,92	9,98	0,3418
Дрво из шуме котао до 50 kW	3,01		0,0502
Дрво из индустрије до 1000 kW			0,0530
Лигнит	2,2		0,4109
Електрични микс - високи напон			0,9756
Електрични микс - средњи напон			0,9781
Електрични микс - ниски напон			1,0312

Извор: Staffell (2011); Ecoinvent база података (2014)

У табели 4.2 може се приметити да су вредности за коришћење бензина и течног нафтног гаса (ТНГ) исте по килограму горива из разлога што не постоје вредности везане за коришћење течног нафтног гаса у моторима са унутрашњим сагоревањем, што је у овом истраживању потребно. Електрични микс важи за Србију и односи се на производњу, увоз и извоз електричне енергије.

#### 4.4 Однос уложене енергије и енергије добијених горива (EROI)

На основу прорачунате уложене енергије, потребне за производњу огревног дрвета, дрвне сечке или пелета, могуће је добити однос којим се дефинише енергетска исплативост производње неког горива.

Однос добијене и уложене енергије (EROI) исказује се формулом (Forster et al, 2007):

$$\text{EROI} = \frac{\text{Потенцијална енергија горива}}{\text{Потребна/уложена енергија}} \quad (4.2)$$

Добијеним бројем (EROI) могуће је боље сагледавање енергетске трансформације дрвета у дрвно гориво (Forster et al, 2007). Иако је EROI добар показатељ, не треба да буде једини који се користи при избору поступка у производњи горива на бази дрвета (Forster et al, 2007).

#### **4.5 Нето произведена енергија из чврстих дрвних горива (NEROI)**

При коришћењу чврстих дрвних горива јавља се разлика у ефикасности добијања енергије, првенствено због различите влажности, али и због различите гранулације, могућности дозирања, врсте сагоревања итд.

Однос нето произведене топлотне и/или електричне енергије и утрошене енергије за производњу чврстих дрвних горива приказан је преко показатеља нето EROI (NEROI).

$$\text{NEROI} = \frac{\text{Произведена енергија}}{\text{Уложена енергија}} \quad (4.3)$$

Овде ће се посматрати два случаја коришћења чврстих дрвних горива:

- при сагоревању у котловима и пећима
- при коришћењу когенерационим постројењима

#### **4.6 Ефикасност коришћења расположивих ресурса**

Показатељ потрошње шумске дрвне биомасе и остатака из дрвне индустрије за производњу јединице топлотне енергије назван је ефикасност коришћења расположивих ресурса ( $E_k$ ). Овај показатељ је реципрочна вредност произведене топлотне енергије по  $1 \text{ m}^3$  сировине. На вредност  $E_k$  утиче влажност горива (на запреминску тежину и нето калоријска вредност дрвног горива) и сезонска ефикасност уређаја у коме се сагорева дрвно гориво.

#### **4.7 Стандарди коришћени у истраживању**

Стандарди везани за LCA су већ представљени у тачки 4.1, док су у овој тачки дати стандарди који се односе на производњу чврстих биогорива у које спадају

чврста дрвна горива и стандарди везани за коришћење чврстих дрвних горива у котловима и пећима.

*Стандарди који се односе на чврста дрвна горива*

Европски комитет за стандардизацију, CEN (TC335) је комитет који развија нацрте стандарда како би се описале све врсте чврстих биогорива у Европи, укључујући дрвну сечку, дрвне пелете и брикете, цепанице, пиљевину и бале сламе. Две најзначајније техничке спецификације које се развијају тичу се класификације и спецификације (CEN/TS 14961) и осигурања квалитета за чврста биогорива (CEN/TS 15234). Класификација чврстих биогорива темељи се на њиховом пореклу и извору. Следи попис најважнијих техничких спецификација које је припремио Одбор CEN 335, а који је усвојен од стране Института за стандардизацију Србије:

1. SRPS EN 14588:2010 Чврста биогорива – Терминологија, дефиниције и описи
2. SRPS EN 14961:2010 Чврста биогорива – Спецификације и класе горива
3. SRPS EN 15234:2006 Чврста биогорива – Осигурање квалитета горива
4. SRPS EN 14774-1:2009 Чврста биогорива – Одређивање садржаја влаге – Метода сушења у сушници – Први део: Укупна влага – референтна метода
5. SRPS EN 14774-2:2009 Чврста биогорива – Одређивање садржаја влаге – Метода сушења у сушници – Други део: Укупна влага – поједностављена метода
6. SRPS EN 14774-3:2009 Чврста биогорива – Одређивање садржаја влаге – Метода сушења у сушници –Трећи део: Влага у узорку за општу анализу
7. SRPS EN 14778-1:2005 Чврста биогорива – Узорковање – Први део: Методе за узимање узорака
8. SRPS EN 14918:2009 Чврста биогорива–Метода за одређивање калоријске вредности
9. SRPS EN 15103:2009 Чврста биогорива – Метода за одређивање насипне густине
10. SRPS EN 15296:2006 Чврста биогорива – Прорачун анализа различитих основа

## 5. Карактеристике дрвне сировине и прорачун потрошње енергије у производњи и транспорту чврстих дрвних горива

У овом поглављу представљена је анализа инвентара животног циклуса LCI, односно прикупљени су улазни и излазни подаци потребни за прорачун свих процеса који учествују у ланцу производње чврстих дрвних горива.

Границе посматрања производње чврстих дрвних горива дате су у поглављу методологија рада (видети слику 4.2). Истраживања су ограничена на производњу чврстих дрвних горива од дрвета букве из државних шума. Буква је најзаступљенија врста у шумама Србије и шумска газдинства, за која су обрађени подаци, производе претежно букове сортименте (видети табелу 5.5). Такође, производња пелета у Србији у највећој мери се базира на буковој сировини (видети поглавље 5.6). Ограничење на државне шуме је усвојено због тачности прикупљених података, што се пре свега односи на потрошњу горива потребних за процес Планирање и газдовање шумама.

### 5.1 Својства материјала истраживања

У шумском фонду Србије, према Банковићу и сар. (2009), доминира буква која у укупној запремини учествује са 40,5 %, а у запреминском прирасту са 30,6 %. Из рода *Fagus*, у Србији најзаступљенија је мезијска буква (*Fagus toesiaca* Domin, Maly/Czeczott.) (Јовановић, 2000). Поред мезијске букве у Србији јављају се европска буква (*Fagus sylvatica* L.) и источна буква (*Fagus orientalis* L.).

Својства буковог дрвета као сировине која су битна за ово истраживање су: густина, влажност и нето калоријска вредност дрвета.

#### *Густина дрвета*

Према Шошкићу и Поповићу (1992) густина буковог дрвета у апсолутно сувом стању износи  $0,696 \text{ g/cm}^3$ , густина коре је  $0,743 \text{ g/cm}^3$ , док је запреминско учешће коре 6,19%. Према Павићу (1965) највећу густину има кора, затим дрво грана, следи дрво дебла, а најмању густину има дрво корена. Према истом аутору, просечна густина дрвета дебла варира у зависности од станишта креће се од 0,639

$\text{g/cm}^3$  до  $0,682 \text{ g/cm}^3$  у апсолутно сувом стању. За испитана пробна стабла из Домене (Огледно добро Шумарског факултета Универзитета у Београду „Мајданпечка домена“, одељење 72) средња густина коре износи  $0,770 \pm 0,010 \text{ g/cm}^3$ , дрвета грана  $0,695 \pm 0,001 \text{ g/cm}^3$ , дрвета дебла  $0,682 \pm 0,002 \text{ g/cm}^3$ , и дрвета корена  $0,601 \pm 0,0028 \text{ g/cm}^3$  (Павић, 1965).

У бази података „Ecoinvent“, која се користи за европске прорачуне LCA, густина букве је  $0,650 \text{ g/cm}^3$ .

С обзиром да су у раду коришћени подаци из шумских газдинстава из Источне Србије, за густину дрвета букве у апсолутно сувом стању усвојена је вредност од  $0,690 \text{ g/cm}^3$  (просечна вредност густине грана и дебла пробних стабала из Мајданпечке домене).

#### *Влажност дрвета*

Влажност дрвета се може изразити на два начина: влажност у односу на масу сувог или влажног дрвета. Када се рачуна у односу на масу апсолутно сувог дрвета, онда се назива апсолутна влажност дрвета (означава се са „M“), а уколико се рачуна у односу на влажно дрво, онда је то релативна влажност дрвета (означава се са „u“). Оба начина изражавања влажности се користе равноправно, али се апсолутна влажност најчешће среће када се говори о влажности производа од дрвета, док се релативна влажност најчешће користи код горива на бази дрвета.

Просечна апсолутна влажност букве у шуми према Тодоровићу (2006) је 82,14%, а Поповић и сар. (2003), испитујући макроскопске карактеристике букве са територије источне Србије дошли су до податка да је просечна апсолутна влажност стабала букве, сечених у октобру, 90,84%. База података Ecoinvent-а даје следеће апсолутне влажности на шумском стоваришту: обловина (техничко дрво) има 70%, а остало индустријско и огревно дрво, као и шумски остаци имају 80% влаге. Влажност сечке произведене у шуми је 80%, а резана грађа, споредни пилански производи и кора имају 70% влажности. Код природно сушеног огревног дрвета, резане грађе и споредних пиланских производа апсолутна влажност је 20%. Код вештачки сушене резане грађе и споредних производа апсолутна влажност је 10%. На основу ових података усвојене су влажности сировине (табела 5.1).



Табела 5.1 Усвојена апсолутна влажност букове сировине за производњу чврстих дрвних горива

Врста сировине	Шума	Просушено	Примарна прерада дрвета	Сушено
Техничко дрво	70	20	70	10
Огревно дрво	80	20	-	-
Дрвна сечка	80	20	40	10
Кора	80	20	70	-
Споредни производи примарне прераде дрвета	-	20	70	10

Промена запремине при урезању за сушење дрвета од почетних 80% на 20% апсолутне влаге урачуната је смањење од 12%.

#### *Нето калоријска вредност дрвета*

Нето калоријска вредност горива дефинише се као однос ослобођене количине топлотне енергије при потпуном сагоревању у јединици масе горива и изражава се у kWh/kg или MJ/kg. Разликују се бруто и нето калоријска вредност горива. Бруто калоријска вредност горива је теоријска вредност и одговара оној количини топлоте која би се ослободила при потпуном сагоревању јединице масе у идеалним условима и без присуства влаге у гориву. Нето калоријска вредност горива одговара вредности топлотне моћи умањене за ону количину топлоте која је потребна да се влага присутна у гориву и влага која настаје у процесу сагоревања преведе у парно стање. Због различите влажности чврстих дрвних горива у истраживању је потребно одредити нето калоријску вредност.

Према Павићу (1965) бруто калоријска вредност коре и ксилема букве варира у зависности од станишта између 5,521 kWh/kg и 5,639 kWh/kg. Према овом аутору, бруто калоријска вредност опада са повећањем надморске висине, дрво корена (5,593 kWh/kg) и грана (5,574 kWh/kg) имају већу бруто калоријску вредност од дрвета дебла, док кора (5,521 kWh/kg) и дрво гранчица (5,466 kWh/kg) имају мање вредности. Према истраживањима Данона и Дедића (1995) бруто калоријска вредност дрвета лажне срчевине износи 5,717 kWh/kg, белјике 5,373 kWh/kg и коре 4,985 kWh/kg.

За потребе истраживања усвојена је вредност бруто калоријске вредности буковог дрвета од 5,5 kWh/kg.

Енергија која је потребна за испаравање једног килограма воде износи 2.500 kJ под нормалним условима (притисак ваздуха 1 bar). На то треба додати и енергију

потребну за ослобађање везане воде из дрвета. Према Данону и Ранисављевићу (1992) енергија потребна за додатно испаравање је 314 kJ по килограму испарене воде. Узимајући све наведено, према Данону и Дедићу (1995), нето калоријска вредност дрвета се рачуна формулом:

$$H_d = \frac{1}{1 + M} \cdot [H_g - 0,694 \cdot (M + 9 \cdot H)] \quad [\text{kWh} / \text{kg}] \quad (5.1)$$

При чему је:  $H_d$  – нето калорисјка вредност горива;  $H_g$  – бруто калоријска вредност горива [kWh/kg];  $M$  – релативна влажност горива [%];  $H$  – масено учешће водоника у елементарном саставу дрвета [%].

Према стандарду SRPS EN 14918: 2009 којом се утврђује метода одређивања калоријске вредности чврстих биогорива, прорачун нето калоријске вредности врши се на следећи начин:

При константној запремини формулом:

$$H_d = [H_g - 206,0 \cdot w(H)_d] \cdot (1 - 0,01 \cdot M) - 23,05 \cdot M \quad (5.2)$$

односно, при константном притиску:

$$H_d = [H_g - 212,2 \cdot w(H)_d - 0,8(w(O)_d + w(N)_d)] \cdot (1 - 0,01 \cdot M) - 24,43 \cdot M \quad (5.3)$$

У оба случаја нето калоријска вредност се изражава у MJ/kg. Остале вредности у формулама су:  $w(H)_d$  - процентуално масено учешће водоника;  $w(O)_d$  - процентуално масено учешће кисеоника;  $w(N)_d$  - процентуално масено учешће азота у апсолутно сувом дрвету.

Према SRPS EN 14918 стандарду, процентуално учешће хемијских елемената дрвне биомасе (осим угљеника) који утичу на нето калоријску вредност дати су у табели 5.2.

Табела 5.2 Процентуално учешће хемијских елемената у дрвету

	H % (m/m) daf*	O % (m/m) daf*	N % (m/m) daf*	S % (m/m) daf*
дрво без коре	6,2	43	0,1	0,02
цело дрво	6,2	42	0,2	0,02
шумски остаци	6,1	41	0,5	0,04
кора	6,1	40	0,4	0,1

\*daf – (dry and ash free) суво и без пепела

Извор: SRPS EN 14918, Анекс X

Према Данону и Дедићу (1995), елементарни хемијски састав буковог дрвета је такав да угљеника има највише (48,5%), затим кисеоника (45,2%) и на крају водоника (6,3%), док остали елементи нису приказани.

Како су подаци врло блиски, у раду ће се користити формула 5.2 за прорачун нето калоријске вредности са подацима о количини водоника из табеле 5.2. Прорачун се изражава у MJ, али ће бити приказан у kWh како би био поредив са осталим подацима у раду (односно ове две јединице је  $1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$ ).

Претварање из апсолутне у релативну влажност дрвне сировине дато је у табели 5.3 у којој су, поред влажности, дате и густине и нето калоријска вредност буковог дрвета при тој влажности.

Табела 5.3 Вредности апсолутне и релативне влажности, густине и нето калоријске вредности буковог дрвета

Апсолутна влажност (u) [%]	Релативна влажност (M) [%]	Густина дрвета [g/cm <sup>3</sup> ]	Нето калоријска вредност [kWh/kg]
0	0	0,690	5,145
10	9,1	0,759	4,619
20	16,7	0,828	4,179
40	28,6	0,966	3,491
70	41,2	1,173	2,762
80	44,4	1,242	2,576

Влажност чврстих дрвених горива има утицаја на гориве карактеристике, односно на нето калоријску вредност горива.

Утицај влажности горива на нето калоријску вредност, вредност калоријске вредности по запремини и тежини сировине од које се добија гориво дати су у табели 5.4.

Табела 5.4 Утицај влажности на нето калоријску вредност горива

Влажност u [%]	Сировина m <sup>3</sup> /t	Hd MWh/t	Потенцијална енергија сировине		
			MWh/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /MWh	%
80	0,949	2,576	2,715	0,368	100,00
70	1,004	2,763	2,752	0,363	98,66
40	1,220	3,491	2,863	0,349	94,85
20	1,423	4,179	2,937	0,341	92,45
10	1,552	4,619	2,976	0,336	91,23

Из табеле 5.4 се види да са смањењем влажности горива смањује се количина сировине која је потребна по јединици топлотне енергије (нето калоријској вредности горива).

## 5.2 Планирање и газдовање шумама

Подаци добијени за производњу огревног дрвета букве добијени су из три шумска газдинства источне Србије: Јужни Кучај (седиште у Деспотовцу), Северни Кучај (Кучево) и Тимочке шуме (Бољевац). Ова три шумска газдинства газдују на 160.635 хектара, што је 13,45% од државних и 284.045 хектара приватних шума, односно у процентима 26,84%. Шуме у овим газдинствима су превасходно изданацке и због тога имају лошију сортиментну структуру.

Просечно учешће сортимената у шумама у источној Србији је следеће: 42,5% чини техничко дрво (трупци за прераду), 46,6% је удео огревног дрвета и 10,9% су шумски остаци.

Табела 5.5 Структура сортимената на подручју Источне Србије

Сортименти	Јединица мере	2012			Укупно
		Јужни Кучај	Северни Кучај	Тимочке шуме	
Техничко дрво	m <sup>3</sup>	21.167	20.996	30.900	<b>73.063</b>
Огревно дрво	m <sup>3</sup>	53.120	55.735	69.460	<b>178.315</b>
Дрвни остатак из шуме	m <sup>3</sup>	7.056	8.674	12.545	<b>28.275</b>
Укупно	m <sup>3</sup>	81.343	85.405	112.905	<b>279.653</b>

*Извор: прикупљени подаци анкетом из наведених шумских газдинстава*

Послове које обављају ова, али и сва друга шумска газдинства у ЈП „Србијашуме“ су нега, заштита и обнављање постојећих шума, оснивање нових шума, као и дугорочно планирање и контрола рационалног коришћења шумског подручја за који су надлежни. Енергенти који су утрошени при раду шумских газдинстава

користе се само за горе наведене послове, који ће се у даљем тексту дефинисати као Планирање и газдовање шумама (видети табелу 5.6).

Производња и транспорт сортимената, према садашњој подели рада у ЈП Србијашуме, не улазе у делокруг њиховог посла, тако да сеча, привлачење и транспорт у шуми раде предузећа која су специјализована за ту врсту делатности.

Табела 5.6 Годишња потрошња енергената у шумским газдинствима

Врста горива	Јединица мере	2012			Укупно
		Јужни Кучај	Северни Кучај	Тимочке шуме	
Дизел	L	47.398	47.073	63.119	<b>157.590</b>
ТНГ	L	61.591	6.193	18.489	<b>86.273</b>
Бензин	L	7.155	37.529	33.073	<b>77.757</b>
Огревно дрво	m <sup>3</sup>	300	260	355	<b>915</b>
Електрична енергија	kWh	150.000	205.228	224.119	<b>579.347</b>

Извор: прикупљени подаци анкетом из наведених шумских газдинстава

Према подацима из табеле 5.6 посматрана шумска газдинства користе фосилна горива, огревно дрво и електричну енергију. Фосилна горива се користе за моторна возила, огревно дрво се користи за загревање просторија, док се електрична енергија користи делом за грејање, а делом при коришћењу електричних уређаја.

Просечне потрошње енергије и емисије CO<sub>2</sub>e у 2012. години у планирању и газдовању шумама у ШГ „Северни Кучај“, „Јужни Кучај“ и „Тимочке шуме“ дате су у табели 5.7. Потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e је подељена по врстама горива која се користе за радове у шумарству и дата су по 1 m<sup>3</sup> дрвних сортимената (без дрвних остатака из шуме).

Табела 5.7 Енергије и емисија CO<sub>2</sub>e у шумарству за 1 m<sup>3</sup> произведених дрвних сортимената

Гориво	јединица	количина	Енергија kWh/m <sup>3</sup>	Емисија kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>
Дизел	L	0,63	6,26	2,14
ТНГ	L	0,34	2,35	0,59
Бензин	L	0,31	2,81	0,71
Ел. енергија	kWh	2,3	2,3	2,48
Дрво	m <sup>3</sup>	0,0032	9,21	0,58
УКУПНО			22,93	6,50
Фосилна горива			13,72	5,926

Извор: прорачун аутора према подацима из табела 4.2, 5.5 и 5.6

Из табеле 5.7 се види да се највише енергије добија сагоревањем погонских горива (50%), затим дрвета (40%), док је најмање учешће електричне енергије (10%). Електрична енергија се у Србији производи већим делом из лигнита, тако да је (индиректна) емисија CO<sub>2</sub>е велика (видети табелу 4.1). Учешће у емисији CO<sub>2</sub>е погонских горива је 53%, електричне енергије 38%, док је дрвета 9%.

### 5.3 Сеча и извлачење дрвета

Операције сече и извлачење дрвних сортимената из шуме за ЈП „Србијашуме” врше специјализована предузећа.

Постоје различите методе извлачења дрвних сортимената из шуме. У Србији се због специфичности терена на којима се налазе шуме користи такозвани класичан или сортиментни вид извлачења, који се састоји од следећих операција: обарање стабла моторном тестером, уклањање грана, израда огревног дрвета од дебеле грањевине, кројење трупаца (све операције се врше моторном тестером), привлачење (специјализованим тракторима са чекрком или анималима) и слагање сортимената на привременом стоваришту поред пута.

Операције сече и извлачење дрвних сортимената захтевају употребу моторних тестера, трактора и/или запрега, камиона за превоз произведених дрвних сортимената из шуме и превозних средстава за људство које ради на терену. Према нормативима (Николић и Јездић, 2003), потрошња бензина и уља у моторним тестерама, које се користе за обарање стабала и производњу шумских сортимената, зависи од врсте сортимената који се производе (техничко или огревно дрво) и од врсте дрвета које се обрађује. У табели 5.8 су дати подаци о нормативној потрошњи при производњи сортимената од букве и храста, који су најзаступљеније врсте у шумама у Србији.

Табела 5.8 Потрошња бензина и уља при раду моторне тестере по врсти дрвета

Врста	Сортименти	Потрошња бензина [L/m <sup>3</sup> ]	Потрошња уља [L/m <sup>3</sup> ]
Буква	Техничко дрво	0,20	0,10
	огревно дрво	0,30	0,14
Храст	Техничко дрво	0,25	0,11
	огревно дрво	0,35	0,16

Извор: Николић и Јездић, 2003

Највећа количина уља се користи за подмазивање ланца, док се много мањи део користи при прављењу мешавине за рад тестере (око 2%) који сагори при раду и тако директно учествује на емисију CO<sub>2</sub>e. Усвојена потрошња горива при раду моторне тестере је 0,2 L/m<sup>3</sup> бензина за техничко дрво и 0,3 L/m<sup>3</sup> за огревно дрво, која је увећана за 2% због додавања уља за прављење мешавине за двотактне моторе. За шумске остатке се не усваја потрошња горива, јер они настају као вишак у производњи техничког дрвета и огревног дрвета (Николић и Јездић, 2003).

Привлачење сортимената се врши на неколико начина: тракторима са чекрком или запрегом. У истраживању је усвојена претпоставка да се техничко дрво привлачи тракторима са чекрком, док се огревно дрво и шумски остаци привлаче запрегама. Према нормама (Николић и Јездић, 2003), потрошња дизела је око 0,8 L/kW по радном сату трактора.

Следећа операција која захтева потрошњу фосилних горива је утовар сортимената на камионе. Усвојена просечна потрошња горива при утовару је дата у табели 5.9 (Николић и Јездић, 2003).

Табела 5.9. Усвојена потрошња енергије при утовару шумских сортимената

Операција	Потрошња дизела	
	[L/m <sup>3</sup> ]	[kWh/m <sup>3</sup> ]
Утовар техничког дрвета на камион са утоварном руком	0,42	4,22
Утовар огревног дрвета на камион са утоварном руком	1,8	18,02

Извор: Николић и Јездић (2003)

Према формули 5.4 потрошња горива се израчунава за рад трактора са чекрком при извлачењу техничког дрвета до чврстог пута:

$$G_{\text{трактор}} = C_u \cdot \frac{G_{\text{трактор}} \cdot P_{\text{трактор}}}{V_{\text{трактор}}} = \left[ \frac{\text{L}}{\text{m}^3} \right] = 1.01 \cdot \frac{0.08 \cdot 40}{2.875} = 1.124 \frac{\text{L}}{\text{m}^3} \quad (5.4)$$

Где је:  $G_{\text{трактор}}$  – потрошња трактора при привлачењу по 1 m<sup>3</sup> шумских сортимената [L/m<sup>3</sup>];  $C_u$  – коефицијент повећања потрошње при сагоревању моторног уља (1%),  $C_{\text{lub}}=1.01$ ;  $G_{\text{трактор}}$  – потрошња горива на сат при раду трактора према норми,  $G_{\text{трактор}}= 0.08$  L/kW;  $P_{\text{трактор}}$  – просечна снага мотора трактора,  $P_{\text{трактор}} = 40$  [kW];  $V_{\text{трактор}}$  – запремина сортимената које трактор привуче за сат времена рада према норми 2,875 m<sup>3</sup>/h или 23 m<sup>3</sup> за осам сати рада.

Транспорт радника је још један чинилац у потрошњи горива, јер су локације на којима се производе дрвни сортименти удаљене од насељених места. Дистанца која се усваја у овом раду је од административне зграде шумског газдинства до производне локације. Радници се превозе теренским возилима до места сече. Просечна дистанца од управне зграде шумске администрације до места сече ( $D_{\text{ster}}$ ) је 10 km према добијеним нормама из посматраних шумских газдинстава. Потрошња горива за превоз теренским возилима по шумским путевима ( $G_{\text{a,ter}}$ ) је 25 L/100 km. Да би се израчунала потрошња горива по произведеној запреминској јединици дрвног сортимента, усвојена је дневна норма екипе која се превози и она износи ( $N_e$ ) за сечу и привлачење 40 m<sup>3</sup>. Потрошња горива за транспорт радника може се израчунати формулом:

$$G_{\text{ter}} = C_u \cdot \frac{G_{\text{a,ter}}}{100} \cdot \frac{2 \cdot D_{\text{ster}}}{N_e} \left[ \text{L} / \text{m}^3 \right] = 1.02 \cdot \frac{25}{100} \cdot \frac{2 \cdot 10}{40} = 0.13 \text{ L} / \text{m}^3 \quad (5.5)$$

Збирна потрошња горива и емисија CO<sub>2</sub>e при сечи и привлачењу дата је у табели 5.10.

Табела 5.10 Потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e при сечи и извлачењу дрвних сортимената

Сортименти	Јединица	Моторна тестера	Привлачење	Утовар	Транспорт радника	Укупно
Трупци	[lit/m <sup>3</sup> ]	0,20* <sup>1</sup>	1,12 <sup>6)</sup>	0,42**	0,13**	
	[kWh/m <sup>3</sup> ]	1,85	11,22	4,19	1,30	18,56
	[gCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> ]	472	3.000	1.121	347	4.941
Огревно дрво	[lit/m <sup>3</sup> ]	0,306*	0	1,8**	0,13**	
	[kWh/m <sup>3</sup> ]	2.78	0	17,96	1,30	22,04
	[gCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> ]	708	0	4.805	347	5.860
Дрвни остаци из шуме	[lit/m <sup>3</sup> ]	0	0	1,8**	0,13**	
	[kWh/m <sup>3</sup> ]	0	0	17,96	1,30	19,26
	[gCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> ]	0	0	4.805	347	5.152

\*Бензин; \*\*Дизел; Напомена: Трупци се привлаче тракторима са чекрком, а огревно дрво и шумски остаци анималима.

Из табеле 5.10 се може видети да се најмање енергије троши на сечу и извлачење трупаца, шумски остаци имају нешто већу вредност, док се највише енергије троши код производње огревног дрвета. Вредности емисије CO<sub>2</sub>e имају исти однос као и потрошња енергије, јер се у свим случајевима користе течна фосилна горива. Вредности из табеле су ниже у односу на литературне податке (Sandilands et al., 2011) где је вредност емисије за операције сече и привлачења 8,2 kg CO<sub>2</sub>e за



1 m<sup>3</sup> за огревно дрво. Разлика настаје у процесу сече и извлачења, који се у посматраним газдинствима обавља ручно, док се у коришћеној литератури обавља механизацијом. Други могући разлог је то што у процесу Сеча и извлачење није урачуната потрошња горива за уређивање инфраструктуре, а која је у овом моделу садржана у процесу Планирање и газдовање шумама.

Потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e за сечу и извлачење груписане су по дрвним производима, а вредности су израчунате према подацима из табеле 5.10. Вредности за техничко дрво, огревно дрво и шумске остатке дате су за 1 m<sup>3</sup> у табели 5.11.

Табела 5.11 Сеча и извлачење шумских сортимената

Гориво		Јединица	Техничко дрво	Огревно дрво	Дрвни остаци
Дизел	Енергија	kWh/m <sup>3</sup>	16,71	19,26	19,26
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>	5,712	6,584	6,584
Бензин	Енергија	kWh/m <sup>3</sup>	1,85	2,78	0
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>	0,545	0,818	0

Извор: прорачун према табели 5.10

Рачунање потрошње енергије за производњу чврстих дрвних горива из шумских остатака је нешто другачије него за остале шумске производе и разликује се по томе што код њих није урачуната вредност за сечу, а вредности за привлачење су исте као код огревног дрвета.

#### 5.4 Дрвни остаци из прераде дрвета

Прерада дрвета се у Србији дефинише као привредна грана која има претежно примарну прераду дрвета, док финална прерада није развијена према могућностима домаће сировине и заснива се на производњи плочастог и тапацираног намештаја (Шошкић, 2003).

Од процеса прераде дрвета зависи какви су дрвни остаци који могу да се користе за производњу чврстих дрвних горива. Дрвни остаци из прераде дрвета могу бити хемијски третиран и нетретиран. У овом раду ће се због прорачуна користити само сировина која је хемијски нетретирана.

Основна подела прераде дрвета је на механичку и механичку прераду. У хемијској преради дрвета дрвна сировина се хемијски третира (осим коре) и самим тим остаци из производње нису погодни за производњу чврстих дрвних горива.

Механичка прерада дрвета се дели на примарну и финалну прераду. Примарна прерада дрвета користи дрвне сортименте из шуме као сировину и производи дрвне производе који се користе у финалној преради дрвета или у грађевинарству. Примарна прерада дрвета се дели на пиланску прераду, производњу љуштеног и сеченог фурнира и производњу плочастих материјала. Код пиланске прераде дрвета и производње љуштеног и сеченог фурнира дрвни остаци су хемијски нетретирани и погодни су за добијање чврстих дрвних горива, док се код производње плочастих материјала користе средства за лепљење и један део тих средстава остаје у остацима. Остаци из примарне прераде дрвета могу бити влажни или суви, а влажност зависи од места настанка, односно процеса који се користи. Према димензијама дрвни остаци могу бити крупни и ситни.

Финална прерада дрвета се дели на: производњу дрвеног намештаја, производњу плочастог и тапацираног намештаја, дрво у грађевинарству и остале производе од дрвета намењених за крајњу потрошњу. У финалној преради дрвета дрвни остаци могу бити помешани са разним средствима за брушење, лепљење и заштиту дрвета и најчешће су суви.

Учешће других материја у дрвним остацима компликује прорачун емисије CO<sub>2</sub>e и због тога су се у овом истраживању користили подаци за нетретирано дрво. Пиланска прерада дрвета производи највеће количине нетретираних дрвних остатака и представља основ за истраживање производње чврстих дрвних горива од дрвних остатака.

Остаци из дрвне индустрије у Србији се користе на два начина:

- производња процесне топлотне енергије за сопствене потребе и
- продаја као огревно дрво, дрвна сечка или као сировина за производњу пелета.

Према литературним наводима (Raumer, 2006), дрво из производње није оптерећено енергијом која је коришћена при производњи дрвних производа. То се објашњава тиме што се тим процесима нису добијала горива, већ производи који су због тога и оптерећени утрешком те енергије при производњи. Са друге стране,

дрвни остаци и даље имају уложену енергију у шумарству, сечу и извлачења, енергијом која је потребна при манипулацији у оквиру погона, као и енергијом која је потребна да се сировина припреми за сагоревање. Према литератури (Popadić et al., 2014) квантитативно искоришћење сировине при пиланској преради дрвета је од 56,79% до 60,63%, учешће надмере је од 9,28% до 10,20%, док дрвни остатак има учешће од 29,56% до 30,20% у структури искоришћења трупаца. У оквиру дрвних остатака половину чине крупни (од 13,77% до 16,31% у укупном искоришћењу), а другу половину ситни остатак (од 14,70% до 16,70% у укупном искоришћењу). Крупни остатак се мора пре употребе уситнити у сечку, а ситни остаци могу директно да се користе.

### 5.5 Производња дрвне сечке

Дрвна сечка је чврсто гориво које се добија уситњавањем и као такво је погодно за аутоматско дозирање и сагоревање. Добија се уситњавањем дрвних остатака из шуме, огревног дрвета и дрвних остатака из прераде дрвета. За уситњавање се најчешће користе мобилне дробилице које имају сопствени погон или користе погон возила која их вуку (нпр. трактор преко кардана), а ако се производе на одређеној локацији онда се користе стационарне дробилице које имају погон на електричну енергију.

Табела 5.12 Потрошња горива при производњи дрвне сечке

Операција	Потрошња енергије				Референце
	Дизел		Електрична енергија		
	L/m <sup>3</sup> (дрво)	kWh/m <sup>3</sup> (дрво)	kWh/m <sup>3</sup> (дрво)	kWh/t (пелете)	
Примарно уситњавање са мобилном дробилицом	2,32	23,15			
Финално са примарним уситњавањем са мобилном дробилицом	3,57	35,64			Iwaoka et al. 2010.
Финално уситњавање мобилном дробилицом без примарног уситњавањем	7,13	71,17			
Финално уситњавање стабилном дробилицом без примарног уситњавања	2,29	22,88			
Електрична дробилица модел 1			10,11	13,14*	Risović et al. 2008.
Електрична дробилица модел 2			8,13	10,57*	

Из табеле 5.12 се може видети да дробилице које користе дизел имају већу потрошњу енергије по јединици производа у односу на дробилице са погоном на електричну енергију и да двофазно уситњавање смањује потрошњу енергије.

У истраживању су усвојене две претпоставке: производња дрвне сечке на шумском стоваришту и производња дрвне сечке код корисника. У првом случају користе се мобилне дробилице које имају погон на дизел мотор, док у другом случају дробилице користе електричну енергију за погон. Усвојена потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e дата је табели 5.13

Табела 5.13 Усвојена потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e при производњи сечке

Операција	Потрошња енергије	Емисија CO <sub>2</sub> e
	[kWh/m <sup>3</sup> ]	[kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> ]
Уситњавање – мобилна дробилица	23,15	7,913
Уситњавање – електрична дробилица	13,14	12,852

Усвојена просечна специфична потрошња енергије стационарних дробилица је за више од 40% мања од потрошње мобилних дробилица, али је еквивалентна емисија гасова са ефектом стаклене баште, услед неповољних карактеристика енергетског система Републике Србије, за 40% већа него код мобилних дробилица.

Производња дрвне сечке као производа у Србији је у фази развоја. У Србији је у 2013. години производило 14 произвођача сечке који је испоручују фабрикама које производе плоче иверице, пелете и другим комерцијалним потрошачима (Glavonjić, 2014). Подаци који се могу добити од произвођача су приближни, али се могу узети као основа при прорачуну у моделу.

Према подацима једног од произвођача, који је током ових истраживања анкетирани, а који производи и продаје сечку, релативна влажност произведене дрвне сечке, у зависности од врсте дрвета и годишњег доба, се креће од 23% до 46%, а најчешће од 25% до 32%.

Код производње дрвне сечке могућа су два случаја: уситњавање на месту где се налази дрвна сировина и уситњавање на захтев корисника. У првом случају, мобилне дробилице прелазе просечне дистанце од 300 km. У другом случају најчешће се користе стационарне дробилице са погоном на електричну енергију, а

сировина се допрема до корисника где се врши уситњавање, при чему је просечна удаљеност са које се сировина допрема око 100 km.

Дрвна сечка се превози камионским превозом до потрошача, а један камион може да превезе до 28 тона. Количина зависи од влажности дрвне сечке и од дестинације (при извозу максимално се утовара 26 тона). Удаљеност корисника у Србији је од 35 km до 430 km, а средња транспортна дистанца за сечку је 270 km.

### 5.6 Производња дрвних пелета

Укупна енергија потребна за производњу једне тоне дрвних пелета зависи од бројних фактора. Потрошња највише зависи од карактеристика полазне сировине, њене влажности и врсте сушаре које се користе за сушење уситњеног дрвета. Остали фактори мање утичу на потрошњу енергије. У табели 5.14 дати су литературни подаци о потрошњи енергије у различитим фазама производње дрвних пелета.

Табела 5.14 Потрошња топлотне и електричне енергије у производњи пелета

Операција	Oberberger, Thek 2010.		Risović et al. 2008		MacLean et al. 2009		An Pa 2010	
	Топлота [kWh/t]	Ел. ен. [kWh /t]	Топлота [kWh /t]	Ел. ен [kWh /t]	Топлота [kWh /t]	Ел. ен kWh /t]	Топлота [kWh /t]	Ел. ен [kWh /t]
Сушење	1.200*	24			889		294**	
Уситњавање		19		13				
Пелетирање		51		139				
Хлађење		2						
Остало		18		74				
УКУПНО	1.200	114		217***	1	131	294	136

\* топлота по тони испарене воде; \*\* сушење скоро суве тилевине; \*\*\* без потрошње електричне енергије потребне за рад сушаре.

У табели 5.14 се може видети да нема великих разлика у наведеним просечним потрошњама електричне енергије. Једино се разликује податак из литературе (Risović et al., 2008) где је потрошња без погона сушара скоро дупло већа у односу на податке из осталих извора. Разлика у потрошњи топлотне енергије настаје услед различитих влажности сировине која је сушена.

На основу литературних података направљен је модел потрошње енергије у производњи пелета у Србији, а на основу врсте и влажности сировине.

- Сушење – у литератури се наводи да је потрошња топлотне енергије између 1.000 и 1.200 kWh по тони испарене воде из сировине (Obernberger, Thek, 2010.). Потрошња зависи од типа сушаре која се користи, односно њене ефикасности. Усвојена вредност за потрошњу топлотне енергије за сушење је  $1.200 \text{ kWh}/t_{\text{vode}}$ . Да би се израчунала потрошња топлотне енергије потребно је знати колико воде треба да се испари за произведену тону дрвних пелета. Сушаре користе за свој рад и електричну енергију. У истраживању је усвојена потрошња електричне енергије  $24 \text{ kWh}/t_{\text{pelleta}}$  (Obernberger, Thek, 2010);
- Уситњавање – сува дрвна сечка се додатно уситњава. Потребна електрична енергија за тај део процеса производње је такође усвојена из литературе (Obernberger & Thek, 2010) и она износи  $18,61 \text{ kWh}/t_{\text{sirovine}}$ ;
- Пресовање – потрошња електричне енергије за производњу једне тоне пелета усвојена је из литературе (Risović et al., 2008) и износи  $139 \text{ kWh}/t_{\text{pelleta}}$ . Разлог за овакав избор је тај што су аутори истраживања обавили при пресовању дрвета букве, што одговара овом моделу.
- Хлађење – температура пелета после пресовања је висока и потребно их је охладити како би имали добра механичка својства. Потрошња електричне енергије за хлађење није велика и она износи  $2 \text{ kWh}/t_{\text{pelleta}}$ . Овај податак је такође усвојен из литературе (Risović et al., 2008).
- Остали потрошачи – овде су пре свега битни транспортери, али и остали потрошачи који не учествују директно у производњи пелета. Потрошња је усвојена на нивоу од  $74 \text{ kWh}/t_{\text{pelleta}}$ , која је дата у литератури (Risović et al., 2008).

Подаци везани за уситњавање и пелетирање узети су из рада у којем су измерене вредности за букву у Хрватској (Risović et al., 2008), док су остале потребне вредности узете из литературе која се бави целим процесом производње пелета у Аустрији (Obernberger & Thek, 2010).

Усвојени подаци за подмодел потрошње енергије у производњи дрвних пелета дати су у табели 5.15

Табела 5.15 Потрошња енергије и емисија  $CO_2e$  у производњи пелета

Фазе производње	Потрошња енергије		Емисија $CO_2e$	
	Топлотна енергија [kWh/t <sub>vode</sub> ]	Електрична енергија [kWh/t <sub>pelet</sub> ]	Топлотна енергија [kgCO <sub>2</sub> e/ t <sub>vode</sub> ]	Електрична енергија [kgCO <sub>2</sub> e/ t <sub>pelet</sub> ]
Сушење	1.200	24*	9	22*
Уситњавање		19**		17
Пелетирање		139		130
Хлађење		2		2
Остало		74		69

\*уtroшена електрична енергија је по количини испарене воде из дрвета,

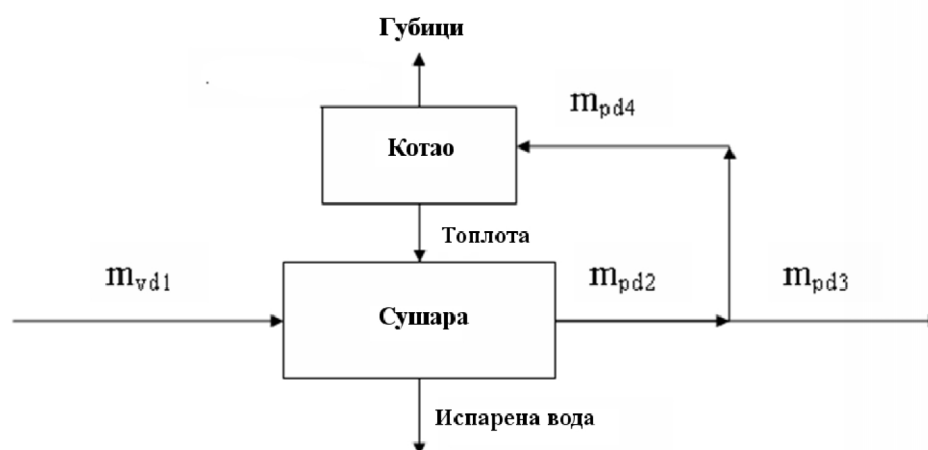
\*\*уtroшена енергија је по тони сировине.

На основу података из табеле 5.15 може се закључити да је директна емисија  $CO_2e$  мала услед коришћења дрвне сировине као горива за сушење, док је индиректна емисија велика због коришћења електричне енергије. На основу овог модела, извршен је прорачун потрошње енергије и емисије  $CO_2e$  при производњи пелета у зависности од почетне влажности сировине.

#### Прорачун потребне количине сировине за производњу пелета

Сушење дрвне сировине је једна од фаза производње пелета. У предложеним подмоделом производње пелета потребно је за фазу сушења обезбедити топлотну енергију која се најчешће производи сагоревањем дела дрвне сировине која се користи у производњи пелета.

На слици 5.1 приказан је дијаграм сушења дрвне сировине у производњи пелета.



Слика 5.1 Дијаграм тока сушења дрвне сировине у производњи пелета

Са слике се види да у сушару улази сечка која може бити различите релативне влаге ( $m_{vd1}$ ), а да из сушаре излази сува сечка ( $m_{pd2}$ ). Влажност ове сечке је

прописана технологијом производње пелета и износи 10% релативне влаге. Део осушене сечке ( $m_{pd4}$ ) се користи за ложење котла који снабдева сушару топлотном енергијом, а остатак ( $m_{pd3}$ ) се користи за производњу пелета.

Потребна количина топлотне енергије за сушење сведена на тону произведених пелета зависи пре свега од влажности улазне сировине, али и од врсте дрвета које се користи за производњу пелета, од нето калоријске вредности дрвета и ефикасности котла и преноса топлотне енергије.

Релативна влажност дрвета рачуна се према формули:

$$M = \frac{m_v - m_s}{m_v} \cdot 100 [\%] \quad (5.6)$$

У прорачуну релативне влажности  $m_v$  је маса влажног дрвета, а  $m_s$  маса дрвета у апсолутно сувом стању.

Маса дрвне сировине након сушења ( $m_{pd2}$ ) једнака је разлици масе влажне сировине пре сушења ( $m_{vd1}$ ) и масе испарене воде из дрвета ( $m_{iv}$ ), односно:

$$m_{pd2} = m_{vd1} - m_{iv} [t] \quad (5.7)$$

Маса испарене воде из дрвета се одређује разликом масе воде у дрвету ( $m_{v1}$ ) при влажности  $M_1$  и масе воде у осушеном дрвету ( $m_{v2}$ ) са влажношћу  $M_2$ .

$$m_{iv} = m_{v1} - m_{v2} [t] \quad (5.8)$$

Масе воде у влажном и осушеном дрвету могу се представити формулама 5.9 и 5.10.

$$m_{v1} = M_1 \cdot m_{vd1} [t], \quad (5.9)$$

$$m_{v2} = M_2 \cdot m_{pd2} [t], \quad (5.10)$$

Одавде следи да је:

$$\begin{aligned} m_{iv} &= m_{v1} - m_{v2} = M_1 \cdot m_{vd1} - M_2 \cdot m_{pd2} = \\ &= M_1 \cdot m_{vd1} - M_2 \cdot (m_{vd1} - m_{iv}) = M_1 \cdot m_{vd1} - M_2 \cdot m_{vd1} + M_2 \cdot m_{iv} = \\ &= m_{vd1} \cdot (M_1 - M_2) + M_2 \cdot m_{iv} [t] \end{aligned} \quad (5.11)$$

Након сређивања добијеног израза добија се израз за масу испарене воде:

$$m_{iv} = \frac{m_{vd1} \cdot (M_1 - M_2)}{(1 - M_2)} [t] \quad (5.12)$$



На основу претходног израза може поставити израз за масу осушеног дрвета на излазу из сушаре:

$$m_{pd2} = m_{vd1} - \frac{m_{vd1} \cdot (M_1 - M_2)}{(1 - M_2)} = m_{vd1} \cdot \left[ 1 - \frac{(M_1 - M_2)}{(1 - M_2)} \right] \quad [t] \quad (5.13)$$

Од укупне количине осушеног дрвета највећи део се користи за производњу пелета ( $m_{pd3}$ ), а мањи део се троши за рад сушаре ( $m_{pd4}$ ). Количина дрвета за рад сушаре зависи од количине воде коју треба испарити ( $m_{iv}$ ) и потребне количине топлоте ( $e$ ) за испаравање јединице масе воде. Потребна количина топлотне енергије за сушење ( $E_{pt}$ ) рачуна се на следећи начин:

$$E_{pt} = m_{iv} \cdot e \quad \left[ \frac{kWh}{t_{iv}} \right] \quad (5.14)$$

Количина дрвета коју треба утрошити за рад сушаре, односно сагорети у котлу може се израчунати на основу следећег израза:

$$m_{pd4} = m_{iv} \cdot \frac{e}{H_d \cdot \eta_k} = \frac{m_{vd1} \cdot (M_1 - M_2)}{(1 - M_2)} \cdot \frac{e}{H_d \cdot \eta_k} \quad [t] \quad (5.15)$$

Где је  $H_d$  – нето калоријска вредност дрвета које се користи за ложење котла који снабдева сушару топлотом [kWh/t];  $\eta_k$  - степен искоришћења котла [%]

Количина дрвета расположива за производњу пелета може се израчунати на основу следећег израза:

$$\begin{aligned} m_{pd3} &= m_{pd2} - m_{pd4} = m_{vd1} \cdot \left[ 1 - \frac{(M_1 - M_2)}{(1 - M_2)} \right] - m_{iv} \cdot \frac{e}{H_d \cdot \eta_k} = \\ &= m_{vd1} \cdot \left[ 1 - \frac{(M_1 - M_2)}{(1 - M_2)} \right] - \frac{m_{vd1} \cdot (M_1 - M_2)}{(1 - M_2)} \cdot \frac{e}{H_d \cdot \eta_k} = \\ &= m_{vd1} \cdot \left[ 1 - \frac{(M_1 - M_2)}{(1 - M_2)} \cdot \left( 1 + \frac{e}{H_d \cdot \eta_k} \right) \right] \quad [t] \end{aligned} \quad (5.16)$$

Претходни израз даје везу између количине влажног дрвета на улазу у сушару и количине дрвета расположиве за производњу пелета. Одговарајућим прерачунавањем може се добити израз за израчунавање потребне количине дрвне сировине уколико се зна потребна количина осушеног дрвета:

$$m_{vd1} = \frac{m_{pd3}}{\left[ 1 - \frac{(M_1 - M_2)}{(1 - M_2)} \cdot \left( 1 + \frac{e}{H_d \cdot \eta_k} \right) \right]} \quad [t]; \quad (5.17)$$

Код прорачуна потребне количине дрвне сировине могуће је користити апсолутну влажност дрвета и тада је формула:

$$m_{vd1} = \frac{m_{pd3} \cdot (1 + u_1)}{(1 + u_2) - (u_2 - u_1) \cdot \frac{e}{H_d \cdot \eta_k}} \quad [t] \quad (5.18)$$

С обзиром да се дрвна сировина набавља у запреминским јединицима, за претварање количине дрвне сировине из јединице масе у запремину користи се следећа формула:

$$V_{vd1} = \frac{m_{vd1} \cdot \beta_v \cdot (1 - M_1)}{m_s} \quad [m^3] \quad (5.19)$$

Где је  $\beta_v$  – запреминско утезање дрвета.

У табели 5.16 дата је количина сировине потребна за производњу једне тоне пелета, при чему је израчуната и количина сировине потребне за сушење. Прорачун је извршен за различите почетне влажности, а крајња влажност сировине је увек 10%, ефикасност производње топлотне енергије је  $\eta=81\%$ , а топлота потребна за испаравање 1 тоне воде је  $e=1.200 \text{ kWh}$ .

Табела 5.16 Утицај влажности на количину дрвне сировине за производњу пелета

Пошетна влажност сировине, $u$	Укупна сировина у производњи пелета	Сировина потребна за сушење сировине	
		$m^3/t_{\text{pelet}}$	%*
80	1,948	0,396	20
70	1,881	0,329	17
40	1,701	0,149	9
20	1,598	0,046	3
10	1,552	0	0

\*процент од укупне количине

Из табеле 5.16 се види да се 20% сировине користи као гориво за топлотну енергију потребну за сушење дрвне сировине влажности 80%. Са смањивањем влажности дрвне сировине смањује се и удео дрвне сировине која је потребна за процесну топлотну енергију за фазу сушења, тако да при 20% влажности сировине треба свега 3% више сировине.

Потрошња електричне и топлотне енергије и емисија CO<sub>2</sub>e у производњи пелета за постављене подмоделе приказана је у табели 5.17

Табела 5.17 Потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e у зависности од влажности сировине и подмодела производње пелета

Влажност сировине [%]		80		70		40		20	
		kWh/t	kgCO <sub>2</sub> e	kWh/t	kgCO <sub>2</sub> e	kWh/t	kgCO <sub>2</sub> e	kWh/t	kgCO <sub>2</sub> e
	Ел. Енергија	297,13	290,63	294,55	288,10	287,58	281,28	283,59	277,38
Пелет <sub>1</sub>	Дрво	956,92	50,76	794,15	42,12	359,16	19,05	112,51	5,97
	Укупно	1254,05	341,38	1088,70	330,23	646,74	300,34	396,10	283,35
	Ел. Енергија			278,01	271,924	271,98	266,027	268,53	262,652
Пелет <sub>2</sub>	Дрво			794,15	42,12	359,16	19,05	112,51	5,97
	Укупно			1072,16	314,05	631,14	285,08	381,04	268,62

У табели 5.17 се види да електрична енергија мање утиче на потрошњу енергије, а више на емисију гасова стаклене баште.

Да би се потврдили резултати добијени коришћењем наведеног подмодела потрошње енергије при производњи дрвних пелета искоришћени су подаци из два погона за пелетирање из Србије. У обе посматране производње збирно је приказана укупно утрошена енергија, која је упоређена са резултатима добијеним коришћењем подмодела производње пелета.

У првој посматраној производњи (Производња I) постоје две дробилице са различитим погонима. Прва дробилица се користи за уситњавање метарског дрвета и погони је електромотор, док се друга дробилица користи за уситњавање вишеметарског дрвета и користи дизел гориво за рад. На крају фазе уситњавања постоји млин чекићар који уситњава на ивер потребних димензија. Овај млин се погони електромотором.

У посматраној 2012. години произведено је око 35.309 тона пелета из 64.717 m<sup>3</sup> буковог огревног дрвета, 55 тоне букове пиљевине и 1.240 m<sup>3</sup> четинарског дрвета. Од наведене количине сировине део се после процеса сушења одваја за производњу топлотне енергије. Према наведеним количинама дрвне сировине и произведених пелета и на основу претходних једначина, добија се да је просечна апсолутна влажност сировине износила 65%.

Табела 5.18 приказује просечне вредности и процентуалне потрошње енергије и емисије CO<sub>2</sub>e по тони пелета.

Табела 5.18 Јединична потрошња енергента у Производња I за 2012. годину

Врста горива	Потрошња				
	Годишња потрошња [kWh]	Енергија [kWh/t <sub>pelet</sub> ]	Процентуално учешће у укупној енергији [%]	Еквивалентна емисија [kgCO <sub>2</sub> e/t <sub>pelet</sub> ]	Процентуално учешће у укупној емисији CO <sub>2</sub> e [%]
Електрична енергија	7.691.538	236	22,0	231	80,8
Дизел	1.235.758	34	3,2	11,8	4,1
Бензин	39.369	1	0,1	0,3	0,1
Течни нафтни гас (ТНГ)	187.002	5	0,5	1,3	0,4
Дрво (сушење)	28.067.205	795	74,2	42,2	14,6
Укупно	37.220.872	1.071	100,0	286,5	100

Извор: подаци из анкете у предузећу Производња I

Према подацима из табеле 5.18 нису исти релативни односи између потрошње енергије и емисије гасова са ефектом стаклене баште у атмосферу за горива која се користе у производњи. Највише енергије се производи из дрвета (око 74%) које се користи за сушење, а учешће у емисији CO<sub>2</sub>e је свега (око 15%). Код електричне енергије ситуација је обрнута, при чему је њено учешће у укупној потрошњи енергије 22%, а емисија CO<sub>2</sub>e је 81%.

Други анализирани погон производње пелета (Производња II) је мањег капацитета и подаци који су добијени нису раздвојени по фазама производње, већ су дати збирно по врсти утрошеног горива. У 2012. години произведено је 8.747 тона пелета. Сировина која је коришћена је била разноврснија него у предходном примеру, па је у наведеној години утрошено 8.551 m<sup>3</sup> буковог огревног дрвета, 3.217 m<sup>3</sup> окорака из пилане, 3.843 тона букове сирове пиљевине и 1.011 m<sup>3</sup> меког дрвета (мешано дрво тополе и дрво четинара). Део наведене количине сировине се одваја за производњу топлотне енергије. Према наведеним количинама дрвне сировине и произведених пелета и на основу претходних једначина, добија се да је просечна апсолутна влажност сировине 70%.

Табела 5.19 приказује просечне вредности и процентуална потрошња енергије и емисије CO<sub>2</sub>e по тони произведеног пелета.

Табела 5.19 Просечна потрошња енергената у Производња II за 2012. годину

Врста горива	Потрошња				
	Годишња потрошња [kWh]	Енергија [kWh/t <sub>pellet</sub> ]	Процентуално учешће у укупној енергији [%]	Еквивалентна емисија [kgCO <sub>2</sub> e/t <sub>pellet</sub> ]	Процентуално учешће у укупној емисији CO <sub>2</sub> e [%]
Електрична енергија	2.225.500	254	23,6	248,9	83,4
Дизел	178.954	20	1,9	7,0	2,3
Дрво (сушење)	7.032.564	804	74,6	42,6	14,3
Укупно	9.437.018	1.078	100	298,5	100

Извор: подаци из анкете у предузећу Производња II

Према подацима из табеле 5.19 добијене вредности потрошње енергије и емисије CO<sub>2</sub>e врло сличне са подацима који су приказани у табели 5.18.

Поређењем података о утрошеној енергији подмодел производње пелета и посматраних погона, може се видети велика сличност у потрошњи енергије, док је у подмоделима нешто већа емисија CO<sub>2</sub>e због већег учешћа електричне енергије у укупном билансу.

## 5.7 Транспорт

Произведени дрвни сортименти у шуми, који су допремљени на стовариште поред пута, транспортују се до крајњег корисника (огревно дрво или сечка). Такође, произведени дрвни пелети транспортују се до крајњег корисника, али разлика у односу на транспорт огревног дрвета и дрвне сечке је да могу да се транспортују камионима који превозе и другу врсту робе, док су камиони за дрвне сортименте из шуме и дрвну сечку наменски. Због тога се код транспорта огревног дрвета и дрвне сечке мора урачунати двострука транспортна дистанца, док се код транспорта дрвних пелета у прорачуну се користи само дистанца од произвођача до потрошача.

За транспорт дрвних горива највише се користи камионски превоз. Према статистичким подацима, у Европи друмски превоз у транспорту дрвета учествује са 70% у Немачкој и скоро 100% у Великој Британији (EFI, 2011). Подаци из ове студије дати су по тони дрвета које је транспортовано и по јединици тона-километар (вредност која се односи на транспорт 1 тоне робе за пређени 1 километар). Просечне транспортне дистанце према истој студији биле су око 100

km. Просечне потрошње горива за камионски транспорт биле су у Француској за целулозно дрво 0,45 l/km, за трупце 0,55 l/km и за сечку 0,35 l/km. У Немачкој просечна потрошња горива при транспорту дрвета је 0,45 l/km и потрошња мазива 0,0005 l/km. У Шведској за камионе који су просечно транспортовали 25 t дрвета потрошња горива је 0,58 l/km, односно 0,54 l/km када се враћају празни. На бази ових података добијено је да је потрошња по 0,25 kWh/tkm, али да је та вредност у пракси нешто већа и износи 0,305 kWh/tkm. У Великој Британији потрошња горива при транспорту дрвета је око 3,5 kWh по пређеном километру (EFI, 2011).

Транспорт чврстих дрвених горива у Србији се обавља скоро искључиво камионским превозом. Потрошња горива и мазива у камионском транспорту према Николићу и Јездићу (2003) је дата у табели 5.20.

Табела 5.20 Потрошња горива и уља за транспорт камионима

Врста превозног средства	Потрошња горива [L/km]	Потрошња мазива [L/km]	Коефицијент корекције – квалитет пута				
			Земљани пут	Макадам	Локални пут	Регионални пут	Аутопут
Камион	0,24	0,006					
Камион са приколицом	0,30	0,007	2,5	1,5	1,3	1	0,9

Извор: Николићу и Јездићу (2003)

У табели 5.20 су дати коефицијенти корекције у зависности на којој врсти пута се врши транспорт. Однос утрошеног горива при транспорту на шумском и асфалтном путу је 2,5. При томе потребно је напоменути да при раду мотора део уља (мазива) се сагори и то утиче на емисију CO<sub>2</sub>e, односно њен прорачун.

За прорачун потрошње горива у транспорту један део података је преузет из литературе, док је други део прикупљен из предузећа која се баве превозом чврстих дрвених горива.

Потрошња у камионском транспорту огревног дрвета одређује се формулом:

$$K_{\text{дрво}} = C_u \cdot \frac{G_{\text{кам}} \cdot P_{\text{кам}} \cdot 2 \cdot D_{\text{дрво}}}{V_{\text{кам}}} \left[ \text{L} / \text{m}^3 \right] = 1,01 \cdot \frac{0,3 \cdot 180}{30} \cdot 2 \cdot 160 = 5,76 \text{ L} / \text{m}^3 \quad (5.20)$$

Транспорт дрвне сечке и пелета се прорачунава са једном дистанцом и мери се по масеној уместо по запреминској јединици, па је потрошња израчуната по тони превезених пелета.

$$K_{\text{сечка}} = C_u \cdot \frac{G_{\text{кам}} \cdot P_{\text{кам}} \cdot 2 \cdot D_{\text{S}_{\text{pellet}}}}{M_{\text{кам}}} \left[ \text{L} / \text{m}^3 \right] = 1,01 \cdot \frac{0,3 \cdot 180}{100} \cdot \frac{2 \cdot 270}{25} = 11,66 \text{ L} / \text{t} \quad (5.21)$$

$$K_{\text{pellet}} = C_u \cdot \frac{G_{\text{кам}} \cdot P_{\text{кам}} \cdot 2 \cdot D_{\text{S}_{\text{pellet}}}}{M_{\text{кам}}} \left[ \text{L} / \text{m}^3 \right] = 1,01 \cdot \frac{0,3 \cdot 180}{100} \cdot \frac{600}{25} = 12,96 \text{ L} / \text{t} \quad (5.22)$$

Где је:  $K_{\text{drvo}}$  – потрошња камиона при транспорту  $1 \text{ m}^3$  шумских сортимената  $[\text{L}/\text{m}^3]$ ;  $K_{\text{pellet}}$  – потрошња камиона при транспорту  $1 \text{ t}$  пелета  $[\text{L}/\text{t}]$ ;  $C_u$  – коефицијент повећања потрошње при сагоревању моторног уља (1%);  $G_{\text{кам}}$  – потрошња горива према норми -  $0.24 \text{ L}/\text{kW}/100 \text{ km}$  (Николић, Јездић, 2003.);  $P_{\text{кам}}$  – просечна снага мотора камиона  $180 \text{ kW}$ ;  $D_{\text{S}_{\text{drvo}}}$  – средња транспортна дистанца превоза огревног дрвета -  $160 \text{ km}$ ;  $D_{\text{S}_{\text{сечка}}}$  – средња транспортна дистанца превоза сечке -  $270 \text{ km}$ ;  $D_{\text{S}_{\text{pellet}}}$  – средња транспортна дистанца превоза дрвних пелета -  $600 \text{ km}$ ;  $V_{\text{кам}}$  – запремина сортимената које камион транспортује -  $30 \text{ m}^3$ ;  $M_{\text{кам}}$  – маса сечке или пелета које камион транспортује -  $25 \text{ t}$ .

У табели 5.21 приказан је усвојена потрошња горива за камионски превоз чврстих дрвних горива

Табела 5.21 Усвојена потрошња горива, односно енергије и емисије  $\text{CO}_2\text{e}$  при транспорту чврстих дрвних горива

Операција	Потрошња горива		Емисија $\text{CO}_2\text{e}$
	[L]	[kWh]	[kgCO <sub>2</sub> e]
Транспорт огревног дрвета [ $\text{m}^3$ ]	5,76	57,48	19,648
Транспорт дрвне сечке [t]	11,66	116,37	39,798
Транспорт дрвних пелета [t]	12,96	129,34	44,220

Подаци из табеле 5.21 се не могу поредити због различитог начина прорачуна потрошње горива при камионском транспорту, као и вредности које се користе при том прорачуну.

Поред потрошње горива при превозу, један део горива се утроши на утовар и истовар материјала. Према литератури (Iwaoka et al., 2010), енергија која се утроши при утовару и истовару огревног дрвета или дрвне сечке је  $18 \text{ kWh}/\text{m}^3$ , односно при утовару и истовару пелета потребно је  $23,42 \text{ kWh}/\text{t}$ .

## 5.8 Производња топлотне енергије

Производња топлотне енергије из чврстих дрвених горива захтева анализу великог броја фактора који могу да утичу на ефикасност њиховог коришћења. Према литератури (ЛОТ 15, 2009) најважнији фактори су: начин сагоревања, димензионисање система у складу са потребама, могућност (аутоматског) контролисања процеса сагоревања, контрола (аутоматска) протока ваздуха неопходног за сагоревање, мануелно или аутоматско дозирање горива, тип горива, карактеристике горива, карактеристике димњака, начин коришћења инсталације од стране корисника и време рада инсталације. На слици 5.2 приказан је поступак избора као и фактора који утичу на избор малих котлова и пећи за чврста дрвна горива.



Слика 5.2 Поступак избора малих котлова и пећи које користе дрвно гориво

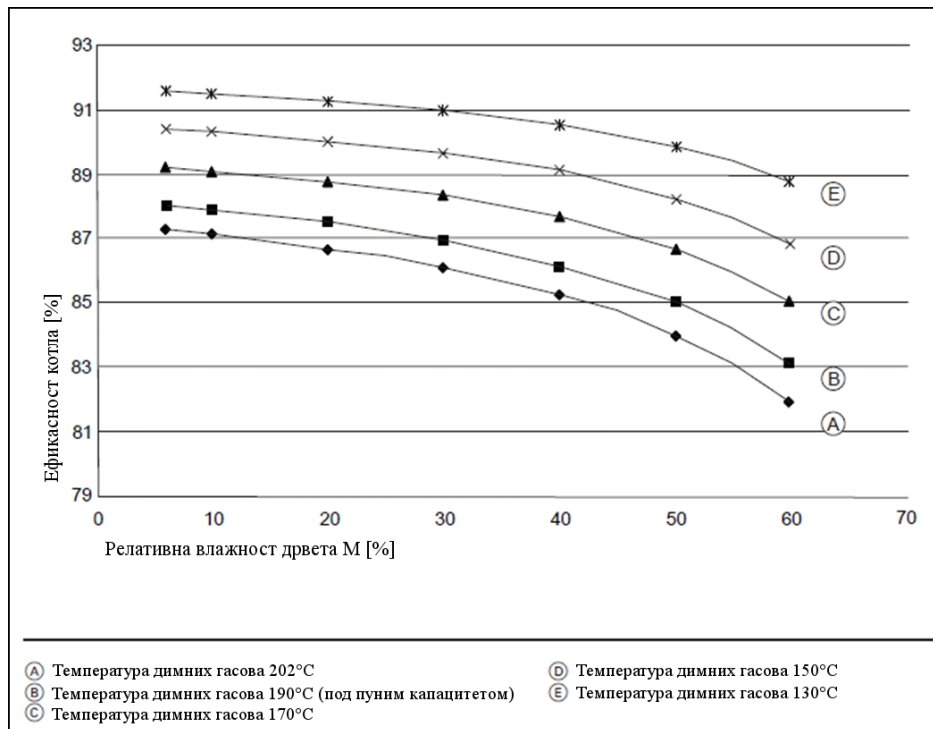
Карактеристике горива које утичу на ефикасност инсталација за производњу топлотне енергије су (ЛОТ 15, 2009.): калоријска вредност, садржај пепела, садржај влаге, проценат испарљивих органских материја, проценат чврстог



горивог остатка, гранулометријски састав горива, температура топљења пепела и вредности садржаја сумпора и хлора.

Ефикасност котла представља однос произведене топлотне енергије и потенцијалне енергије горива које се користи. Разлику између ове две вредности чине губици који могу бити: топлотни губици у димним гасовима, вишак ваздуха у димним гасовима, непотпуно сагоревање горива и спољашње хлађење уређаја за сагоревање.

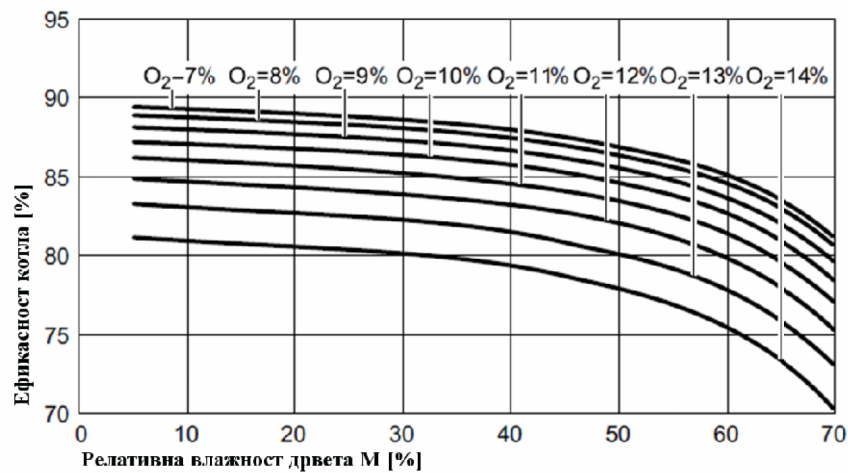
Утицај влажности дрвета и температуре димних гасова на ефикасност котла приказан је на графикону 5.1. Вредности које су дате на слици важе за котлове са покретном решетком средње снаге који користе дрвну сечку и pellet (Viessmann - Mawera Pyroflex FSB)



Графикон 5.1 Утицај влажности горива и температуре димних гасова на ефикасност котла (Viessmann - Mawera Pyroflex FSB)

Графикон 5.1 приказује да са повећањем влажности дрвених горива опада ефикасност котла. Смањењем температуре димних гасова повећава се ефикасност котла и овај фактор више утиче на ефикасност у односу на влажност горива.

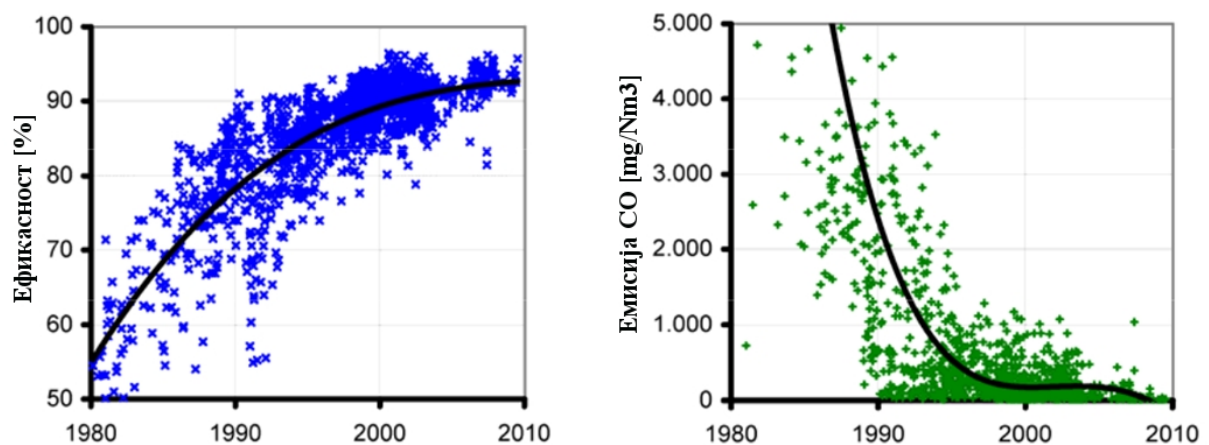
На графикону 5.2 приказан је утицај учешћа кисеоника у димним гасовима на ефикасност котла. Такође, подаци важе за котлове Viessmann - Mawera Pyroflex FSB.



Графикон 5.2 Утицај вишка кисеоника у димним гасовима на ефикасност котла (Viessmann - Mawera Pyroflex FSB)

На графикону 5.2 може се видети да повећано учешће кисеоника у димним гасовима смањује ефикасност котла.

На слици 5.3 приказан је утицај технолошког унапређења котлова и пећи на њихову ефикасност и на емисију угљенмоноксида.



Слика 5.3 Утицај технолошког унапређења котлова и пећи на повећање ефикасности и смањење емисије CO (Schwarz et al., 2011)

У табели 5.22 дати су подаци о ефикасности и емисији гасова са ефектом стаклене баште у атмосферу код котлова и пећи који су стари 20-30 година према (LOT 15, 2009).

Табела 5.22 Ефикасност малих котлова и пећи и вредности емисије честица и штетних гасова

Врста уређаја	Ефикасност [%]	СО [mg/m <sup>3</sup> ]	Испарљиве органске материје [mg/m <sup>3</sup> ]	NO <sub>x</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	Честице [mg/m <sup>3</sup> ]
Отворени камини	5-40	6.000-37.500	300-1.500	<200	150-1.500
Затворени камини	40-60	6.000-17.500	200-500	<200	90-120
Класични штедњаци	50-60	8.000-20.000	300-900	<200	100-200
Штедњаци за централно грејање	50-65	10.000-20.000	300-900	<200	100-200
Каљева пећ	60-75	10.000-17.500	250-750	<200	90-150
Класичне пећи	50-70	4.000-15.000	200-500	<200	90-120
Савремене пећи	50-70	4.000-15.000	200-500	<200	90-120

Извор: LOT 15 (2009)

Процењена ефикасност и средња снага уређаја који се тренутно користе у 27 европских земаља дата је у табели 5.23 према (LOT15, 2009).

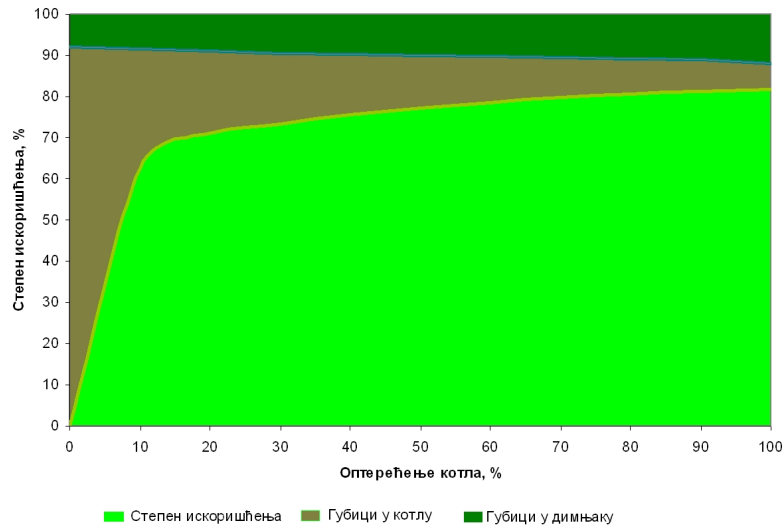
Табела 5.23 Просечне вредности за Европску унију при коришћењу котлова и пећи

Врста уређаја	Просечна снага [kWh]	Процењена ефикасност [%]	Просечно време рада у години [h]
Пећ на огревно дрво	8	50	337
Пећ на пелет	25	80	403
Кућни котао на огревно дрво	29	75	478
Котао средњег капацитета	110	80	651

Извор: LOT 15 (2009)

Поред ефикасности уређаја за сагоревање, који се мери на номиналном оптерећењу, битан параметар коришћења котлова и пећи је сезонска ефикасност коришћења горива. У прорачун сезонске ефикасност коришћења горива, поред свих губитака који се јављају при производњи топлотне енергије, улазе губици услед релативног оптерећења током сезоне грејања у зависности од потребе за топлотном енергијом.

На графикону 5.3 приказан је степен искоришћења у зависности од оптерећења уређаја за сагоревање.



Графикон 5.3 Релативно оптерећење котла током сезоне грејања (UNDP, 2014)

На графикону 5.3 су приказане вредности за сезонско искоришћење код грејања објеката, док је код индустријских котлова мања разлика између сезонске ефикасности горива и ефикасности уређаја за сагоревање.

У табели 5.24 дате су вредности за сезонску ефикасност котлова и пећи и емисију угљенмоноксида, испарљивих органских материја и честица.

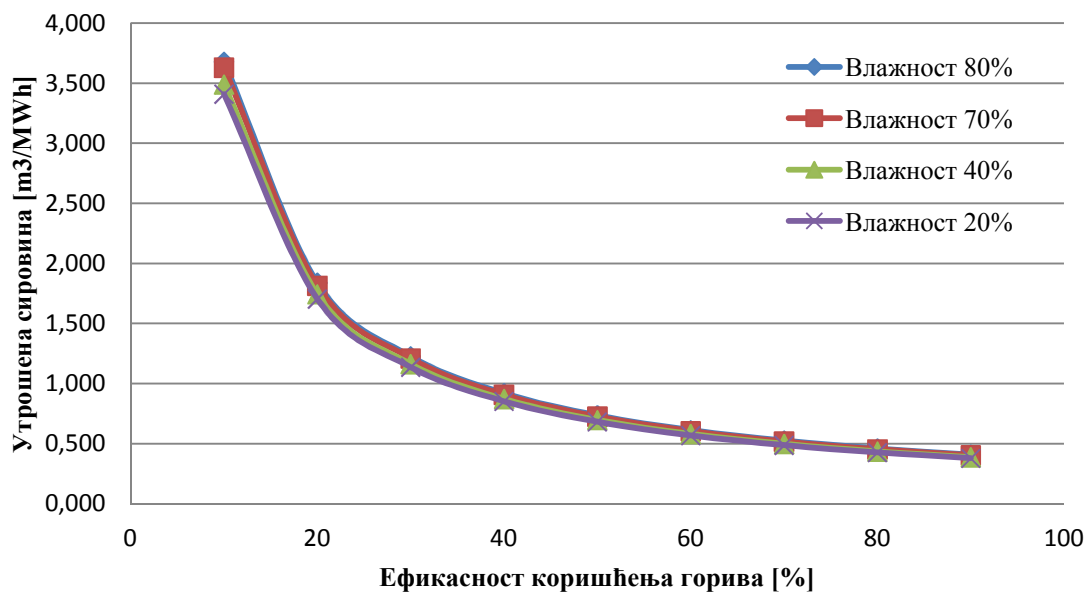
Табела 5.24 Усвојене вредности сезонске ефикасности коришћења горива

Врста уређаја	Сезонска ефикасност уређаја [%]	CO [mg/m <sup>3</sup> ]	Испарљиве органске материје [mg/m <sup>3</sup> ]	Честице [mg/m <sup>3</sup> ]
Пећ на огревно дрво	47	4.800	240	240
Пећ на пелет	64	300	30	30
Кућни котао на огревно дрво	55	2.400	120	120
Кућни котао на пелет	70	1.200	60	60
Индустријски котао	81	1.200	60	60

Извор: LOT 15 (2009)

Усвојене вредности сезонске ефикасности коришћења горива су вредности које су процењене за чланице Европске уније. У Србији се користе старији уређаји са мањом ефикасношћу, али због недостатка података узете су наведене вредности. Топлотна енергија која ће се израчунати усвојеним вредностима је представља будуће стање које треба да се оствари у Србији осавремењавањем уређаја за сагоревање.

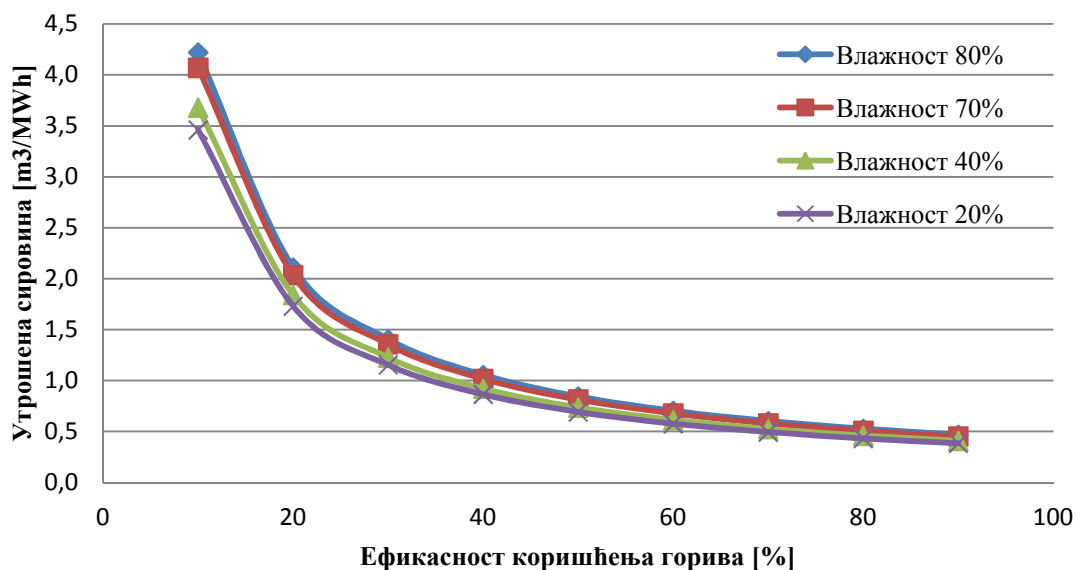
На графикону 5.4 приказан је утицај ефикасности коришћења чврстих дрвних горива на потрошњу дрвне сировине по MWh произведене топлоте за гревно дрво и сечку са различитим влажностима.



Графикон 5.4 Потрошња дрвне сировине по MWh произведене топлотне енергије за гревно дрво и сечку

Графикон 5.4 приказује да влажност дрвета скоро да нема утицаја на промену потрошње сировине, већ да ефикасност коришћења има велики утицај на ову промену.

Код пелета овај утицај је нешто мало другачији због потрошње дрвне сировине за сушење у процесу производње пелета и представљен је графиконом 5.5.



Графикон 5.5 Потрошња дрвне сировине по MWh произведене топлоте за пелет

Графикон 5.5 има сличну зависност између утрошене сировине и ефикасности коришћења горива као и на предходном графикону, али да већа почетна влажност полазне дрвне сировине више утиче на њену потрошњу.

### 5.9 Когенеративна производња топлотне и електричне енергије

Когенерација (Combined Heat and Power - CHP) је поступак истовремене производње електричне и корисне топлотне енергије у јединственом процесу. Првобитно је замишљен као могућност да се искористи „отпадна“ топлотне енергија настала у „класичној“ производњи електричне енергије. Ова топлотна енергија се директно или индиректно користи највише за грејање станова и/или јавних објеката, а нешто ређе у другим производним процесима. Основна предност когенерације је повећана ефикасност коришћења енергента у односу на конвенционалне термоелектране. Увођење когенерације има смисла само у процесима који имају константну и уједначену потребу за топлотном енергијом.

Друга могућност, која све више добија на популарности, је уградња когенерацијских постројења у погоне за производњу топлотне енергије за техничке процесе или грејање станова, јавних објеката, болница. Произведена електрична енергија би се могла користити за сопствене потребе или продају. У случају да се као гориво користе обновљиви извори производња, односно продаја

електричне енергије је симулисана повлашћеним (вишим) тарифама које обезбеђује држава (Furtula et al., 2011).

Тренутно постоје бројне технологије које се користе за когенерациону производњу топлотне и електричне енергије (Kiehne et al., 2008; Thek & Obernberger, 2004.). При избору технологија за когенерацију приоритет би требало да имају технологије које су већ проверене и које су у комерцијалној употреби. Са гледишта капацитета погона препоручују се различите технологије:

- до 100 kW<sub>el</sub>, препоручена технологија је процес са Стирлинг мотором;
- од 200 до 2.000 kW<sub>el</sub>, препоручују се парне турбине и мотори или ORC турбине (органски Ранкинов циклус). Обе ове технологије су већ увелико на тржишту;
- за веће од 2.000 kW<sub>el</sub>, што спада у опсег великих когенерацијских постројења, највећу примену имају класичне парне турбине.

Остале технологије као што су: гасификација са гасним мотором или турбином, Калина циклус, гориве ћелије и остале су у фази развоја и очекује се да ће бити у наредним годинама комерцијално исплативе.

С обзиром, да у време израде овог рада, у Србији није било когенеративних постројења која користе чврста дрвна горива, коришћени су подаци из ранијих истраживања (Danon et al., 2012) и подаци су дати у табели 5.25.

Табела 5.25 Основни подаци о когенеративним постројењима на дрвну биомасу

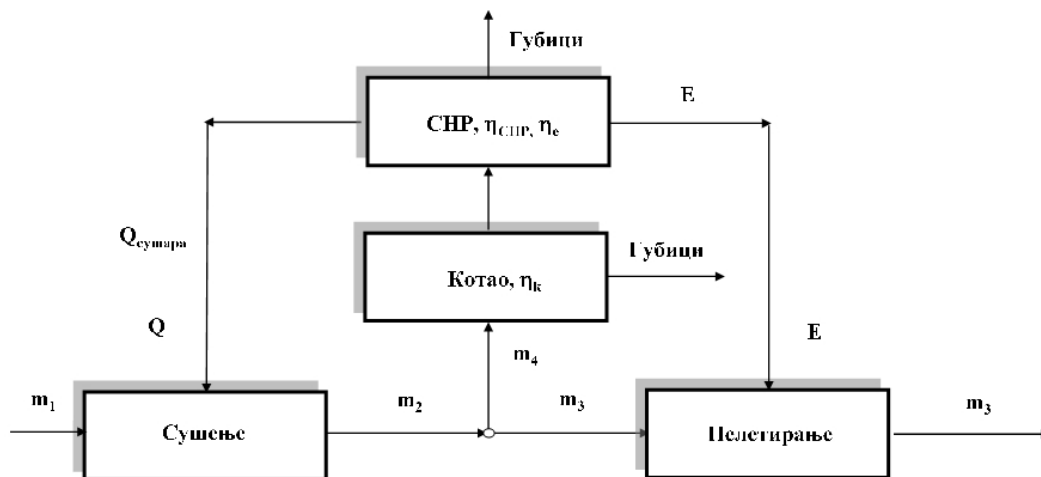
Параметри	Јединице	Стирлинг мотор *	ОРЦ турбина *	Парни мотор **	Парна турбина **	Гасни мотор *
Снага погона енергија горива	– kW <sub>Hd</sub> ***	635	4.333	6.127	7.608	2.182
Производња електричне ен.	kW <sub>el</sub>	70	650	625	500	600
Производња топлотне енергије	kW <sub>t</sub>	500	3.250	4.400	5.555	790
Улазна енергија горива везана за топлотну ен. ****	kWh <sub>Hd</sub> /a	3.431.818	22.792.208	30.000.000	37.875.000	5.386.364
Улазна енергија горива везана за електричну ен. *****	kWh <sub>Hd</sub> /a	568.182	5.064.935	6.762.000	7.766.000	7.704.545
Укупна улазна енергија	kWh <sub>Hd</sub> /a	4.000.000	27.857.143	36.762.000	45.641.000	13.090.909

\* Oberberger i Thek (2008.); \*\* SSET (2012), TCST (2008); \*\*\* Hd – нето калоријска вредност; \*\*\*\* Потрошња под пуним оптерећењем, ефикасност коришћења постројења 0,88; \*\*\*\*\* Ефикасност под пуним оптерећењем ( $\eta_{STE}=0,74$ ,  $\eta_{ORC}=0,77$ ,  $\eta_{SE}=0,55$ ,  $\eta_{ST}=0,39$ ,  $\eta_{Gas}=0,47$ );

Улазне енергије сировине везане за производњу топлотне и електричне енергије, поред називне снаге постројења, основа су за прорачунавања утрошене енергије и емисије CO<sub>2</sub>e по произведеном kWh енергије. У раду је претпостављено да когенерационо постројење ради 6.000 сати под пуним оптерећењем.

Коришћење когенерације у процесу производње пелета захтева већу потрошњу дрвне сировине за производњу топлотне енергије да би се вишак те енергије искористио за производњу електричне енергије. Повећање топлотне енергије, односно количине сировине добија се односом укупне улазне енергије и улазне енергије везане за произведену топлотну енергију у когенеративним постројењима.

На слици 5.4 приказан је начин на који се користи когенеративна производња топлотне и електричне енергије у производњи пелета.



Слика 5.4 Дијаграм производње топлотне и електричне енергије у производњи пелета

Масено повећање потрошње дрвне сировине може се израчунати формулом:

$$m_1 = \left[ \frac{m_3}{1 - \frac{(M_1 - M_2)}{(1 - M_2)} \cdot \left( 1 + \frac{e}{Nd(1 - \epsilon_e) \cdot \eta_{СНР}} \right)} \right] [t] \quad (5.23)$$

Где је:  $\epsilon_e$  – ефикасност производње електричне енергије и  $\eta_{СНР}$  – ефикасност когенеративног постројења. Остале вредности су исте као у формули 5.17.



Запремина сировине која је потребна за производњу пелета рачуна се према формули 5.19.

Укључивање когенерације у производњи пелета захтева додатну количину сировине да би се део топлотне енергије трансформисао у електричну енергију. Од ефикасности трансформације зависи потрошња дрвне сировине, што се може видети у табели 5.26. Вредности које су израчунате обезбеђују довољну количину топлотне енергије, док количина произведене електричне енергије зависи од посматране технологије.

Табела 5.26 Потрошња дрвне сировине при коришћењу когенерације у производњи пелета [ $m^3/t$ ]

Влажност сировине [%]	Стирлинг мотор	ОРЦ турбина	Парни мотор	Парна турбина	Гасни мотор
80	1,985	2,013	2,014	2,004	2,850
70	1,911	1,932	1,934	1,926	2,551
40	1,713	1,721	1,722	1,719	1,930
20	1,602	1,604	1,605	1,604	1,660

Из табеле 5.26 се види да највећу потрошњу има когенерација са гасним мотором, а најмању когенерација са Стирлинг мотором.

## 6. Резултати истраживања

Резултати истраживања приказани су у два одвојена дела. У првом делу дати су резултати који се односе на енергију потребну за производњу појединих врста чврстих дрвних горива (огревно дрво, дрвна сечка и дрвни пелет), као и одговарајуће емисије гасова са ефектом стаклене баште, односно резултати „од колевке до капије“ (“cradle to gate“ LCA).

У другом делу су приказани резултати истраживања о могућим ефектима коришћења дрвних горива за производњу топлотне енергије и/или електричне енергије, односно резултати „од колевке до гроба“ (“cradle to grave” LCA).

### 6.1 Производња чврстих дрвних горива

#### 6.1.1 Огревно дрво

Огревно дрво је један од основних дрвних сортимената, који има широку примену као гориво у Србији. Према табели 5.1 апсолутна влажност сировог огревног дрвета је 80%, а природним сушењем може се смањити до 20%.

У табели 6.1 приказани су подаци добијени истраживањем о потрошеној енергији и емисији CO<sub>2e</sub> за производњу огревног дрвета према подмоделу *Огревно дрво* (видети слику 4.4).

Табела 6.1 Потрошња енергије и емисија CO<sub>2e</sub> за производњу у подмоделу *Огревно дрво при почетној влажности сировине*

Влажност [%]		Јединица	Планирање и газдовање шумама	Сеча и извлачење	Укупно
80	Енергија	kWh/m <sup>3</sup>	22,93	22,04	44,97
	Емисија	kg CO <sub>2e</sub> /m <sup>3</sup>	6,28	7,40	13,68
80	Енергија	kWh/t	21,76	20,91	42,67
	Емисија	kg CO <sub>2e</sub> /t	5,96	7,02	12,98

Извор: прорачун аутора

У табели 6.1 дате су вредности за потрошњу енергије и емисије гасова са ефектом стаклене баште за 1 m<sup>3</sup> огревног дрвета, односно 1 тоне огревног дрвета влажности 80% које су сличне јер је запремиснка маса при тој влажности 1.054. kg/m<sup>3</sup>.

У табели 6.2 приказане су прорачунате вредности потрошње енергије и емисија гасова са ефектом стаклене баште за просушено огревно дрво различите влажности.

Табела 6.2 Потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e за производњу у подмоделу Огревно дрво - различите влажности дрвног горива

Влажност [%]		Јединица	Укупно производња
70	Енергија	kWh/t	45,15
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	13,74
40	Енергија	kWh/t	54,84
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	16,69
20	Енергија	kWh/t	63,99
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	19,47

Извор: прорачун аутора

У табели 6.2 може се видети да укупно утрошена енергија за производњу 1 тоне огревног дрвета расте са смањењем влажности, због смањења запреминске масе при сушењу. Сразмерно енергији расте и емисија CO<sub>2</sub>e.

Поред производње, на повећање потрошње енергије и емисију CO<sub>2</sub>e утиче и транспорт огревног дрвета до корисника. Транспорт огревног дрвета у Србији врши се искључиво друмским превозом.

У табели 6.3 дати су збирни подаци о потрошеној енергији за производњу и транспорт огревног дрвета. Прорачун је направљен са средњом транспортном дистанцом од 160 km. Она је израчуната на основу података о испорукама огревног дрвета из посматраних шумских газдинстава. У прорачуну је узето двострука средња транспортна дистанца, јер је усвојена претпоставка да се камиони враћају празни.

Табела 6.3 Укупна потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e за подмодел Огревно дрво – за различите влажности

Влажност [%]		Јединица	Производња	Транспорт 320 km	Укупно
80	Енергија	kWh/t	42,67	54,53	97,19
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	12,98	18,64	31,62
70	Енергија	kWh/t	45,15	57,70	102,85
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	13,74	19,72	33,46
40	Енергија	kWh/t	54,84	70,09	124,93
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	16,69	23,96	40,64
20	Енергија	kWh/t	63,99	81,78	145,77
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	19,47	27,96	47,43

Извор: прорачун аутора

У табели 6.3 може се видети да су утрошена енергија и емисија гасова са ефектом стаклене баште значајно већи у транспорту него у производњи огревног дрвета. Детаљнија анализа утицаја различитих транспортних дистанци на потрошњу енергије и емисију CO<sub>2</sub>e за огревно дрво и остала чврста дрвна горива приказана је у поглављу 7 (Анализа резултата истраживања).

У табели 6.4 приказане су две вредности односа и енергије произведених горива и уложене енергије (EROI) за подмодел *Огревно дрво*: прва вредност се односи само на производњу огревног дрвета, а друга вредност се односи на укупну утрошену енергију укључујући и транспорт до потрошача. Пример рачунања вредности EROI за огревно дрво (производња и транспорт) просушеног до влажности 40%:

$$EROI = \frac{H_d}{E_p} = \frac{3.491}{124,93} = 27,94 \quad 6.1$$

При чему је: H<sub>d</sub> – нето калоријска вредност за одређену влажност горива [kWh/t]; E<sub>p</sub> – утрошена енергија за производњу и транспорт огревног дрвета до потрошача [kWh/t].

У табели 6.4 приказане су вредности EROI за производњу и транспорт огревног дрвета.

Табела 6.4 Вредности EROI за подмодел *Огревно дрво* – за различите влажности

Влажност [%]	20	40	70	80
Нето калоријска вредност [kWh/t]	4.179	3.491	2.763	2.576
EROI (производња)	65,30	63,66	61,20	60,38
EROI (производња и транспорт)	28,67	27,94	26,86	26,50

*Извор: прорачун аутора*

Према табели 6.4 транспорт има велики утицај на ефикасност трансформације горива, односно да се EROI смањује од 2 до 2,5 пута када се производњи огревног дрвета дода и транспорт до купца у зависности од влажности дрвне сечке. Такође, може се видети да са смањењем влажности расте вредност EROI, односно повећава се енергетска вредност огревног дрвета по јединици масе.

### 6.1.2 Дрвна сечка

Производња дрвне сечке се разликује од производње огревног дрвета само у последњој фази, односно у уситњавању дрвне сировине, како би се добило гориво које је погодније за коришћење. У процесу уситњавања користе се посебни

уређаји (дробилица), за чији рад је потребна одређена количина енергије, односно погонског горива. У пракси се користе две врсте дробилица: мобилне и стационарне дробилице. Мобилне дробилице имају најчешће погон дизел моторима, док стационарне дробилице углавном користе електричну енергију.

#### Мобилне дробилице

Мобилне дробилице се користе за производњу дрвне сечке од огревног дрвета и шумских остатака на шумском камионском путу или стоваришту.

У табели 6.5 дати су потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e за дрвну сечку од огревног дрвета по фазама производње према подмоделу Сечка<sub>1</sub> (Планирање и газдовање шумама, Сеча и извлачење, Уситњавање) (видети слику 4.5).

Табела 6.5 Потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e за производњу у подмоделу Сечка<sub>1</sub> при почетној влажности сировине

Влажност [%]	Јединица	Планирање и газдовање шумама	Сеча и извлачење	Превоз дробилице	Производња сечке	Укупно	
80	Енергија	kWh/m <sup>3</sup>	22,93	22,04	0,335	23,15	68,46
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>	6,28	7,40	0,1147	7,91	21,71
80	Енергија	kWh/t	21,76	20,91	0,318	21,96	64,95
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	5,96	7,02	0,109	7,51	20,60

Извор: прорачун аутора

У прорачун је урачунат и превоз дробилице. Усвојена је просечна удаљеност коју дробилица треба да пређе од 300 km и да се просечно уситни на једној локацији 1.000 m<sup>3</sup> дрвних остатака из шуме.

Природним сушењем мења се запреминска маса дрвне сечке, а тиме и потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e по 1 тони произведеног дрвног горива, што је представљено у табели 6.6.

Табела 6.6 Потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e за производњу у подмоделу Сечка<sub>1</sub> - за различите влажности

Влажност [%]	Јединица	Укупно	
70	Енергија	kWh/t	68,73
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	21,80
40	Енергија	kWh/t	83,48
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	26,48
20	Енергија	kWh/t	97,41
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	30,89

Извор: прорачун аутора

Према истраживању, сечка се у Србији транспортује на удаљености од 35 km до 430 km, а средња вредност је 270 km (видети тачку 5.5). Утицај транспорта на укупну потрошњу енергије и емисију CO<sub>2</sub>e за подмодел *Сечка<sub>1</sub>* приказан је у табели 6.7.

Табела 6.7 Укупна потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e за подмодел *Сечка<sub>1</sub>* - за различите влажности

Влажност [%]		Јединица	Производња	Транспорт 540 km	Укупно
80	Енергија	kWh/t	64,95	116,37	181,32
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	20,60	39,78	60,38
70	Енергија	kWh/t	68,73	116,37	185,10
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	21,80	39,78	61,58
40	Енергија	kWh/t	83,48	116,37	199,85
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	26,48	39,78	66,26
20	Енергија	kWh/t	97,41	116,37	213,78
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	30,89	39,78	70,67

Извор: прорачун аутора

Према табели 6.7 утицај транспорта опада на укупну потрошњу енергије и емисију CO<sub>2</sub>e и да се код дрвне сировине влажности 80% потроши 1,8 пута више енергије на транспорт у односу на производњу горива, а код сировине влажности 20% овај однос је 1,2 пута већи.

Однос потенцијалне и уложене енергије добијених горива (EROI) за подмодел *Сечка<sub>1</sub>* израчунат је на исти начин као и код огревног дрвета и приказан је у табели 6.8.

Табела 6.8 Вредности EROI за подмодел *Сечка<sub>1</sub>* – за различите влажности

Влажност [%]	20	40	70	80
Нето калоријска вредност [kWh/t]	4.179	3.491	2.763	2.576
EROI (производња)	42,90	41,82	40,20	39,66
EROI (производња и транспорт)	19,55	17,47	14,93	14,21

Извор: прорачун аутора

Према подацима у табели 6.8 EROI се за сечку произведену од огревног дрвета такође смањује од 2 до 2,5 пута уколико се урачуна и транспорт до купца у зависности од влажности дрвне сечке. Уколико се упореде из табеле са подацима за огревно дрво (видети табелу 6.4) види се да је EROI за 30% нижи за дрвну сечку у односу на оне израчунате за огревно дрво.

У табели 6.9 дати су потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e при производњи дрвне сечке од шумских остатака према подмоделу Сечка<sub>2</sub> (видети слику 4.6).

Табела 6.9 Потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e за производњу у подмоделу Сечка<sub>2</sub> при почетној влажности сировине

Влажност [%]	Јединица	Планирање и газдовање шумама	Сеча и извлачење	Превоз дробилице	Производња сечке	Укупно	
80	Енергија	kWh/m <sup>3</sup>	0,00	19,26	0,335	23,15	42,75
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>	0,00	6,58	0,1147	7,91	14,61
80	Енергија	kWh/t	0,00	18,27	0,318	21,96	40,56
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	0,00	6,25	0,109	7,51	13,86

Извор: прорачун аутора

Из табеле 6.9 може се видети да при изради енергетског биланса за дрвни остатак из шуме није узета у обзир енергија за планирање и газдовање шумама, што производњу дрвне сечке од дрвних остатака из шуме изједначава по потрошњи енергије са производњом огревног дрвета.

У табели 6.10 дате су вредности потрошње енергије и емисија CO<sub>2</sub>e за сечку према подмоделу Сечка<sub>2</sub> која је природно просушена на одређену влажност.

Табела 6.10 Потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e за производњу у подмоделу Сечка<sub>2</sub> - за различите влажности сировине

Влажност [%]	Јединица	Укупно	
70	Енергија	kWh/t	42,92
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	14,67
40	Енергија	kWh/t	52,13
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	17,82
20	Енергија	kWh/t	60,83
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	20,79

Извор: прорачун аутора

У табели 6.11 у прорачун потрошње енергије и емисије гасова стаклене баште урачунат је и транспорт сечке са средњом транспортном дистанцом од 270 km и претпоставком да се камион враћа празан. Вредности су израчунате према подмоделу Сечка<sub>2</sub>.

Табела 6.11 Укупна потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e за подмодел Сечка<sub>2</sub> - за различите влажности

Влажност [%]		Јединица	Производња	Транспорт 540 km	Укупно
80	Енергија	kWh/t	40,56	116,37	156,93
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	13,86	39,78	53,64
70	Енергија	kWh/t	42,92	116,37	159,29
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	14,67	39,78	54,45
40	Енергија	kWh/t	52,13	116,37	168,50
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	17,82	39,78	57,60
20	Енергија	kWh/t	60,83	116,37	177,20
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	20,79	39,78	60,57

Извор: прорачун аутора

Транспорт умањује разлику у вредностима између производње сечке од огревног дрвета и шумских остатака. Потрошња енергије су нижи од 15% до 20% (у зависности од влажности) у односу на сечку из огревног дрвета, док је емисија CO<sub>2</sub>e нижа од 16% до 19%.

У табели 6.12 приказане су израчунате вредности EROI за производњу и транспорт сечке од шумског остатка према подмоделу Сечка<sub>2</sub>.

Табела 6.12 Вредности EROI за подмодел Сечка<sub>2</sub> – за различите влажности

Влажност [%]	20	40	70	80
Нето калоријска вредност [kWh/t]	4.179	3.491	2.763	2.576
EROI (производња)	68,70	66,97	64,38	63,52
EROI (производња и транспорт)	23,58	20,72	17,35	16,42

Извор: прорачун аутора

Вредности EROI за производњу једне тоне дрвне сечке од шумских остатака су приближне вредностима које су израчунате за огревно дрво, док су укупне вредности нешто ниже због веће средње транспортне дистанце.

#### Стационарне дробилице

За овај вид производње сечке разматрана су два најчешћа случаја:

- Уситњавање огревног дрвета на локацији корисника (подмодел Сечка<sub>3</sub>) и
- Уситњавање дрвних остатака из погона прераде дрвета који се транспортују до корисника (подмодел Сечка<sub>4</sub>).

Разлике између ова два случаја су у пореклу сировине од које се производи сечка и у средњим транспортним дистанцама.



У табели 6.13 приказани су подаци потрошње енергије и емисије гасова стаклене баште за сечку из подмодела *Сечка<sub>3</sub>* (видети слику 4.7).

Табела 6.13 *Потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e за производњу у подмоделу Сечка<sub>3</sub> при почетној влажности сировине*

Влажност [%]		Јединица	Планирање и газдовање шумама	Сеча и извлачење	Производња сечке	Укупно
80	Енергија	kWh/m <sup>3</sup>	22,93	22,04	13,14	58,11
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>	6,28	7,40	12,85	26,54
80	Енергија	kWh/t	21,76	20,91	12,47	55,13
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	5,96	7,02	12,19	25,18

Извор: прорачун аутора

Према подацима из табеле 6.13 потрошња енергије је мања у односу на производњу дрвне сечке мобилним дробилицама, али да је већа вредност емисије CO<sub>2</sub>e (табела 6.5). Разлика у резултатима објашњава се тиме што електрична енергија која се производи у Србији има значајно већу емисију CO<sub>2</sub>e у односу на дизел гориво које се користи при раду мобилних дробилица.

У табели 6.14 дати су потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e за подмодел *Сечка<sub>3</sub>* када се произведена сечка природно просуши на одређену влажност.

Табела 6.14 *Потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e за производњу у подмоделу Сечка<sub>3</sub> - за различите влажности*

Влажност [%]		Јединица	Укупно
70	Енергија	kWh/t	58,34
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	26,64
40	Енергија	kWh/t	70,87
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	32,36
20	Енергија	kWh/t	82,69
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	37,76

Извор: прорачун аутора

У табели 6.15 приказана је потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e за цео подмодел *Сечка<sub>3</sub>*. За израчунавање потрошње енергије у транспорту узета је двострука средња транспортна дистанца од 160 km.

Табела 6.15 Укупна потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e за подмодел Сечка<sub>3</sub> - за различите влажности

Влажност [%]		Јединица	Производња	Транспорт 320 km	Укупно
80	Енергија	kWh/t	55,13	68,96	124,09
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	25,18	23,57	48,75
70	Енергија	kWh/t	58,34	68,96	127,30
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	26,64	23,57	50,21
40	Енергија	kWh/t	70,87	68,96	139,83
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	32,36	23,57	55,93
20	Енергија	kWh/t	82,69	68,96	151,65
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	37,76	23,57	61,33

Извор: прорачун аутора

Из табеле 6.15 се види да је утрошена енергија при транспорту већа од оне за производњу дрвне сечке, али да је разлика знатно мања у односу на подмодел Сечка<sub>1</sub>. Разлог су различите транспортне дистанце.

У табели 6.16 дате су израчунате вредности EROI за производњу и транспорт једне тоне дрвне сечке произведене од огревног дрвета стабилним дробилицама.

Табела 6.16 Вредности EROI за подмодел Сечка<sub>3</sub> – за различите влажности

Влажност [%]	20	40	70	80
Нето калоријска вредност [kWh/t]	4.179	3.491	2.763	2.576
EROI (производња)	50,54	49,26	47,36	46,72
EROI (производња и транспорт)	27,56	24,97	21,70	20,76

Извор: прорачун аутора

Према подацима из табеле 6.16 ефикасност трансформације (EROI) у производњи дрвне сечке стационарним дробилицама је већа у односу на производњу мобилним дробилицама (видети табелу 6.8). Такође, транспорт мање утиче на смањење EROI због краће усвојене средње транспортне дистанце.

Сировина у подмоделу Сечка<sub>4</sub> је дрвни остатак из механичке прераде дрвета. Дрвни остатак, према својим димензијама може бити крупан и ситан, према влажности може бити влажан, просушен и сув. У енергетски биланс производње сечке, у оквиру погона пиланске прераде дрвета у обзир је узета само потрошња енергије потребна за уситњавање крупних дрвних остатака.

У табели 6.17 дата је потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e за дрвну сечку од дрвних остатака код подмодела Сечка<sub>4</sub> (видети слику 4.7).

Табела 6.17 Потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e за производњу у подмоделу Сечка<sub>4</sub> при почетној влажности сировине

Влажност [%]		Јединица	Планирање и газдовање шумама	Сеча и извлачење	Производња сечке	Укупно
70	Енергија	kWh/m <sup>3</sup>	22,93	18,56	6,57	48,06
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>	6,28	6,26	6,43	18,96
70	Енергија	kWh/t	23,02	18,63	8,84	50,50
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	6,31	6,28	8,65	21,23

Извор: прорачун аутора

Из табеле 6.17 се види да је потрошња енергије мања у односу на производњу сечке из огревног дрвета. Уколико се дрвна сечка произведена од дрвних остатака користи у самом погону за производњу топлотне и/или електричне енергије, у енергетски биланс не улази транспорт до корисника.

Потрошња енергије и емисија гасова са ефектом стаклене баште код просушеног дрвета у подмелу Сечка<sub>4</sub> приказани су у табели 6.18.

Табела 6.18 Потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e за производњу у подмоделу Сечка<sub>4</sub> - за различите влажности

Влажност [%]		Јединица	Укупно
40	Енергија	kWh/t	61,33
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	25,79
20	Енергија	kWh/t	71,57
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	30,09

Извор: прорачун аутора

У случају када се дрвна сечка продаје другим корисницима, онда се укључује транспорт до потрошача. Резултати прорачуна су приказани у табели 6.19.

Табела 6.19 Укупна потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e за подмодел Сечка<sub>4</sub> - за различите влажности сировине

Влажност [%]		Јединица	Производња	Транспорт 540 km	Укупно
70	Енергија	kWh/t	50,50	116,37	166,87
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	21,23	39,78	61,01
40	Енергија	kWh/t	61,33	116,37	177,70
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	25,79	39,78	65,57
20	Енергија	kWh/t	71,57	116,37	187,94
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	30,09	39,78	69,87

Извор: прорачун аутора

У табели 6.20 приказане су вредности EROI за подмодел Сечка<sub>4</sub>, при чему прва вредност приказује овај однос при коришћењу дрвних остатака за производњу

процесне топлотне енергије у самом погону, а друга вредност се односи на ситуацију када се сечка транспортује до другог корисника.

Табела 6.20 Вредности EROI за подмодел Сечка<sub>4</sub> – за различите влажности

Влажност [%]	20	40	70
Нето калоријска вредност [kWh/t]	4.179	3.491	2.763
EROI (производња)	58,39	56,92	54,72
EROI (производња и транспорт)	22,24	19,65	16,56

Извор: прорачун аутора

Вредности EROI из табеле 6.20 су ниже за 15% у односу на вредности за сечку од дрвних остатака из шуме, односно за 5% уколико се рачуна и транспорт до крајњег корисника.

### 6.1.3 Дрвни пелет

Дрвни пелети и брикети су својевремено настали из потребе да се остаци из погона прераде дрвета трансформишу у гориво које ће бити конкурентно на тржишту. Данас, дрвни пелет има много ширу примену од брикета због могућности да може да се користи у пећима и котловима са аутоматским дозирањем горива.

Специфичност производње пелета у Србији је у томе да је основна сировина огревно дрво или вишеметарско дрво, а не дрвни остаци из прераде дрвета. То усложњава процес производње пелета јер се сировина мора обавезно пре пресовања уситнити и осушити.

Структура и карактеристике улазне дрвне сировине за производњу пелета се разликују од фабрике до фабрике. За анализирани производње масено учешће различитих врста сировина за 2012. годину биле су<sup>1</sup>:

- У фабрици пелета која је у раду означена као *Производња I* буково огревно дрво чини 98% дрвне сировине, четинарско дрво 1,2% и свега букова пиљевина, која потиче из погона за прераду дрвета, свега 0,8%.
- У другој, означеној као *Производња II*, буково огревно дрво има учешће од 57%, букова пиљевина учествује са 21%, окорци из прераде дрвета са 17% и меко дрво (лишћара и четинара) са 5%.

<sup>1</sup> Односи учешћа врста сировина дати су на основу масе апсолутно сувог дрвета

Количина сировине која је потребна за производњу једне тоне пелета зависи и од њене почетне влажности. Почетна влажност сировине утиче на додатну количину сировине, односно количину топлотне енергије која је потребна да би се влажна дрвна сировина осушила до потребне влажности. Анализом резултата истраживања из посматраних фабрика пелета утврђено је да је просечна апсолутна влажност сировине на годишњем нивоу била око 70%.

Подаци о утрошеној енергији и емисији гасова стаклене баште за производњу пелета у посматраним постројењима дати су у табели 6.21.

Табела 6.21 Потрошња енергије и емисија  $CO_2e$  у производњи дрвних пелета за посматране производње у Србији

	Јединица	Газдовање шумама	Сеча и извлачење	Превоз сировине	Пелетирање	Укупно
Производња I	Енергија kWh/t	43,13	41,46	55,98	1.071,93*	1.212,49
	Емисија kg $CO_2e$ /t	11,81	13,92	19,135	286,48*	331,35
Производња II	Енергија kWh/t	43,13	38,38	55,98	1.078,89**	1.216,38
	Емисија kg $CO_2e$ /t	11,81	12,91	19,135	298,50**	342,36

\* Табела 5.18; \*\* Табела 5.19; Извор: прорачун аутора

Подаци из табеле 6.21 показују да су, без обзира на разлике у врсти сировине, потрошња енергије и емисија  $CO_2e$  су приближно исте и да на енергетски биланс највише утицаја има сам процес пелетирања.

Укупно уложена енергија у производњу и транспорт произведених пелета у посматраним производњама Србији, као и емисија  $CO_2e$  дати су у табели 6.22. Истраживања су показала да је просечна удаљеност са које се довози сировина 80 km, а да су потрошачи просечно удаљени 600 km.

Табела 6.22 Укупна потрошња енергије и емисија  $CO_2e$  производње са транспортом пелета за посматране производње у Србији

	Јединица	Производња	Транспорт 600 km	Укупно
Производња I	Енергија kWh/t	1.212,49	129,30	1.341,79
	Емисија kg $CO_2e$ /t	331,35	44,20	375,55
Производња II	Енергија kWh/t	1.216,38	129,30	1.345,68
	Емисија kg $CO_2e$ /t	342,36	44,20	386,56

Извор: прорачун аутора

Подаци из табеле 6.22 показују да транспорт има учешће између 9,3 (Производња II) и 9,6 (Производња I) у укупном билансу утрошене енергије и емисије  $CO_2e$ .

У табели 6.23 су дати резултати прорачуна за производњу пелета према подмоделу *Пелет<sub>1</sub>* за различите влажности улазне сировине (видети слику 4.8).

Табела 6.23 Потрошња енергије и емисија  $CO_2e$  за производњу у подмоделу *Пелет<sub>1</sub>* - за различите влажности полазне сировине

Влажност [%]		Јединица	Газдовање шумама	Сеча и извлачење	Транспорт сировине	Пелетирање	Укупно
80	Енергија	kWh/t	44,67	42,93	55,98	1.254,05	1.397,63
	Емисија	kg $CO_2e/t$	12,23	14,42	19,13	341,38	387,17
70	Енергија	kWh/t	43,13	41,46	54,05	1.088,70	1.227,34
	Емисија	kg $CO_2e/t$	11,81	13,92	18,48	330,23	374,44
40	Енергија	kWh/t	39,00	37,49	48,88	646,74	772,11
	Емисија	kg $CO_2e/t$	10,68	12,59	16,71	300,34	340,32
20	Енергија	kWh/t	36,64	35,22	45,92	396,10	513,88
	Емисија	kg $CO_2e/t$	10,04	11,83	15,70	283,35	320,91

Извор: прорачун аутора

Према подацима из табеле 6.23 може се видети да код процеса пелетирања влажност сировине има велики утицај на потрошњу енергије. Ова разлика настаје највише код потрошње топлотне енергије за сушење сировине. С обзиром да се за потребе производње топлотне енергије користи део дрвне сировине, емисија гасова стаклене баште има мању промену у односу на потрошњу енергије.

У табели 6.24 дати су подаци везани за укупни потрошњу енергије и емисије  $CO_2e$  за подмодел *Пелет<sub>1</sub>* за различите влажности улазне сировине.

Табела 6.24 Укупна потрошња енергије и емисија  $CO_2e$  за подмодел *Пелет<sub>1</sub>* - за различите влажности сировине

Влажност [%]		Јединица	Производња	Транспорт 600 km	Укупно
80	Енергија	kWh/t	1.397,63	129,30	1.526,93
	Емисија	kg $CO_2e/t$	387,17	44,20	431,37
70	Енергија	kWh/t	1.227,34	129,30	1.356,64
	Емисија	kg $CO_2e/t$	374,44	44,20	418,64
40	Енергија	kWh/t	772,11	129,30	901,41
	Емисија	kg $CO_2e/t$	340,32	44,20	384,52
20	Енергија	kWh/t	513,88	129,30	643,18
	Емисија	kg $CO_2e/t$	320,91	44,20	365,11

Извор: прорачун аутора

У табели 6.25 дате су вредности EROI за производњу пелета према подмоделу *Пелет<sub>1</sub>* за различите влажности дрвне сировине.

Табела 6.25 Вредности EROI за подмодел Пелет<sub>1</sub> – за различите влажности

Влажност [%]	20	40	70	80
Нето калоријска вредност [kWh/t]	4.179	3.491	2.763	2.576
EROI (производња)	8,99	5,98	3,76	3,30
EROI (производња и транспорт)	7,18	5,12	3,40	3,03

Извор: прорачун аутора

У овом истраживању узета је вредност нето калоријске вредности буковог дрвета од 4.619 kWh/t за апсолутну влажност од 10%.

Производња пелета од дрвног остатка има исте улазне параметре као и производња сечке од исте сировине. Претпоставка је да се производња пелета врши у оквиру пиланске прераде дрвета и да у прорачун не улазе транспорт шумских сортимената до погона, као ни потрошња енергије при пиланској преради дрвета.

У табели 6.26 дати су подаци за потрошњу енергије и емисије CO<sub>2</sub>e за производњу пелета према подмоделу Пелет<sub>2</sub> за различите влажности сировине (видети табелу 4.10).

Табела 6.26 Потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e за производњу у подмоделу Пелет<sub>2</sub> - за различите влажности сировине

Влажност [%]		Јединица	Газдовање шумама	Сеча и извлачење	Пелетирање	Укупно
70	Енергија	kWh/t	43,13	34,91	1.077,10	1.155,14
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	11,81	11,77	322,20	345,79
40	Енергија	kWh/t	39,00	31,57	636,16	706,73
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	10,68	10,64	293,24	314,57
20	Енергија	kWh/t	36,64	29,66	386,09	452,39
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	10,04	10,00	276,77	296,81

Извор: прорачун аутора

Укупне вредности утрошка енергије и емисије CO<sub>2</sub>e за производњу и транспорт до потрошача пелета од дрвних остатака су дати у табели 6.27.

Табела 6.27 Укупна потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e за подмодел Пелет<sub>2</sub> - за различите влажности сировине

Влажност [%]		Јединица	Производња	Транспорт 600 km	Укупно
70	Енергија	kWh/t	1.155,14	129,30	1.284,44
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	345,79	44,20	389,99
40	Енергија	kWh/t	706,73	129,30	836,03
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	314,57	44,20	358,77
20	Енергија	kWh/t	452,39	129,30	581,69
	Емисија	kg CO <sub>2</sub> e/t	296,81	44,20	341,01

Извор: прорачун аутора

У табели 6.28 приказане су вредности EROI за производњу пелета према подмоделу Пелет<sub>2</sub> за различите влажности дрвне сировине.

Табела 6.28 Вредности EROI за подмодел Пелет<sub>2</sub> – за различите влажности

Влажност [%]	20	40	70
Нето калоријска вредност [kWh/t]	4.179	3.491	2.763
EROI (производња)	10,21	6,54	4,00
EROI (производња и транспорт)	7,94	5,52	3,60

Извор: прорачун аутора

Подаци из претходних табела показују да су разлике између подмодела производње пелета у вредностима EROI око 6%, а разлике у емисији гасова стаклене баште око 7% (за влажност улазне сировине од 70%).

## 6.2 Ефекти коришћења чврстих дрвних горива

За добијање комплетне слике о енергетским и еколошким утицајима коришћења чврстих дрвних горива било је потребно проширити претходну анализу и укључити производњу топлотне и електричне енергије, односно урадити „cradle to grave” LCA за посматрана дрвна горива.

### 6.2.1 Производња топлотне енергије из чврстих дрвних горива

У овом подпоглављу приказани су утицаји карактеристика чврстих дрвних горива и уређаја за производњу топлотне енергије (пећи и котлова) на ефикасност енергетске трансформације у топлоту.

#### Огревно дрво

Огревно дрво је најзаступљеније чврсто дрвно гориво у Србији. Користи у домаћинствима за потребе кувања и грејања и ређе у индустријским котловима



због ручног дозирања. У овом истраживању разматран је случај коришћења огревног дрвета у домаћинствима.

Уређаји који користе огревно дрво имају нижу сезонску ефикасност коришћења горива у односу на уређаје који користе пелет или сечку. Сезонска ефикасност коришћења огревног дрвета која се користи у прорачуну је за пећи 47%, док је за котлове 55% (видети табелу 5.24).

У табели 6.29 приказани су подаци о производњи топлотне енергије коришћењем огревног дрвета различите влажности у кућним пећима и котловима. У табели су приказане потрошње енергије за рад пећи и котлова, потрошња енергије за производњу и транспорт горива, произведена топлотна енергија и укупна емисија гасова стаклене баште при коришћењу по јединици масе огревног дрвета.

Табела 6.29 *Ефекти коришћења огревног дрвета за добијање топлоте у кућним пећима и котловима*

Врста уређаја	Влажност горива [%]	Утрошена енергија [kWh/t]			Произведена енергија [kWh/t]	CO <sub>2</sub> e [kg/t]
		Електрична енергија	Производња огревног дрвета	Укупно		
Кућне пећи	80	0	97,19	97,19	1.210	49,62
	70	0	102,85	102,85	1.299	52,78
	40	0	124,93	124,93	1.641	65,06
	20	0	145,77	145,77	1.965	76,66
Кућни котлови	80	0	97,19	97,19	1.416	49,62
	70	0	102,85	102,85	1.520	52,78
	40	0	124,93	124,93	1.921	65,06
	20	0	145,77	145,77	2.300	76,66

*Извор: прорачун аутора*

У табели 6.29 нема потрошње електричне енергије потребне за рад пећи и котлова на огревно дрво јер се претпоставља да се пећи и котлови ручно ложе и управљају. У табели се може видети да са смањењем влажности горива расте енергија која се произведе из те исте количине огревног дрвета.

У табели 6.30 приказани су нето ефекти коришћења огревног дрвета различитих влажности у кућним пећима и котловима. Приказане вредности утрошка енергије, емисије CO<sub>2</sub>e, потрошње горива и дрвне сировине су дати по произведеном MWh топлотне енергије. Задња колона представља однос произведене и уложене

енергије, обележено као NEROI (нето EROI). Пример рачунања вредности NEROI за коришћење огревног дрвета влажности 40% у кућним пећима:

$$NEROI = \frac{E_p}{E_1} = \frac{1,641}{124,93} = 13,14 \quad 6.2$$

При чему је:  $E_p$  – произведена топлотна енергија [kWh/t];  $E_1$  – утрошена енергија за производњу и транспорт огревног дрвета и рад уређаја за сагоревање [kWh/t].

Табела 6.30 Потрошња енергије, емисија CO<sub>2</sub>e, потрошња горива и сировине за произведени MWh топлоте и NEROI коришћењем огревног дрвета

Врста уређаја	Влажност горива [%]	Потрошња енергије [kWh/MWh]	Емисија CO <sub>2</sub> e [kgCO <sub>2</sub> e/MWh]	Потрошња горива [t/MWh]	Потрошња сировине [m <sup>3</sup> /MWh]	NEROI
Кућне пећи	80	80	41	0,827	0,784	12,45
	70	79	41	0,770	0,773	12,63
	40	76	40	0,609	0,743	13,14
	20	74	39	0,509	0,724	13,48
Кућни котлови	80	69	35	0,706	0,670	14,57
	70	68	35	0,658	0,661	14,77
	40	65	34	0,521	0,635	15,37
	20	63	33	0,435	0,619	15,77

Извор: прорачун аутора

Према подацима из табеле 6.30 сви израчунати параметри се смањују са смањивањем влажности дрвета, као и са променом сезонске ефикасности коришћења горива. Уложена енергија у огревно дрво као гориво чини од 6,3% до 8%, а емисија гасова са ефектом стаклене баште су од 35 до 41 kgCO<sub>2</sub>e по MWh произведене енергије. Вредности NEROI су ниже и пропорционалне су вредностима EROI (табела 6.3) и сезонској ефикасности коришћења горива.

#### Дрвна сечка

Уситњавањем дрвне сировине добија се чврсто дрвно гориво које има уједначенији гранулометријски састав, што омогућује аутоматско дозирање у уређајима за сагоревање. Недостатак дрвне сечке је мала насипна маса, односно потребно је више простора за складиштење по јединици масе у односу на огревно дрво и пелет. Мала насипна маса сечке утиче на коришћење тако да се она углавном не користи у домаћинствима већ више у индустријским котловима и даљинским системима грејања.

У табели 6.31 приказани су потрошња енергије, произведена топлотна енергија и емисија CO<sub>2</sub>e при раду индустријског котла у зависности од подмодела производње дрвне сечке и влажности сировине.

Табела 6.31 *Ефекти коришћења дрвне сечке за добијање топлотне енергије у индустријским котловима*

Врста дрвне сировине	Влажност горива [%]	Утрошена енергија [kWh/t]			Произведена енергија [kWh/t]	CO <sub>2</sub> e [kg/t]
		Ел. енергија	Производња сечке	Укупно		
Сечка <sub>1</sub>	80	4,17	156,93	161,10	2.085	75,94
	70	4,48	159,29	163,76	2.238	78,38
	40	5,66	168,50	174,16	2.829	87,85
	20	6,77	177,20	183,97	3.387	96,79
Сечка <sub>2</sub>	80	4,17	181,32	185,49	2.085	82,67
	70	4,48	185,10	189,58	2.238	85,51
	40	5,66	199,85	205,51	2.829	96,50
	20	6,77	213,78	220,56	3.387	106,89
Сечка <sub>3</sub>	80	4,17	124,09	128,26	2.085	71,04
	70	4,48	127,30	131,78	2.238	74,15
	40	5,66	139,83	145,48	2.829	86,18
	20	6,77	151,65	158,42	3.387	97,55
Сечка <sub>4</sub>	80	4,17	50,29	54,46	2.085	43,44
	70	4,48	47,72	52,19	2.238	44,00
	40	5,66	50,50	56,15	2.829	51,48
	20	6,77	61,33	68,11	3.387	62,01

*Извор: прорачун аутора*

Према подацима из табеле 6.31 види се да постоји потрошња електричне енергије која је потребна за рад индустријских котлова (4% произведене енергије).

У табели 6.32 приказани су нето ефекти коришћења дрвне сечке различитих влажности у индустријским котловима.

Табела 6.32 Потрошња енергије, емисија CO<sub>2</sub>e, потрошња горива и сировине за произведени MWh топлоте и NEROI коришћењем сечке у индустријским котловима

Врста дрвне сировине	Влажност горива [%]	Потрошња енергије [kWh/MWh]	Емисија CO <sub>2</sub> e [kgCO <sub>2</sub> e/MWh]	Потрошња горива [t/MWh]	Потрошња сировине [m <sup>3</sup> /MWh]	NEROI
Сечка <sub>1</sub>	80	77	36	0,480	0,455	12,94
	70	73	35	0,447	0,449	13,67
	40	62	31	0,354	0,431	16,24
	20	54	29	0,295	0,420	18,41
Сечка <sub>2</sub>	80	89	40	0,480	0,455	11,24
	70	85	38	0,447	0,449	11,81
	40	73	34	0,354	0,431	13,76
	20	65	32	0,295	0,420	15,35
Сечка <sub>3</sub>	80	62	34	0,480	0,455	16,25
	70	59	33	0,447	0,449	16,98
	40	51	30	0,354	0,431	19,44
	20	47	29	0,295	0,420	21,38
Сечка <sub>4</sub> *	70	24	19	0,447	0,449	42,44
	40	23	17	0,354	0,431	44,01
	20	22	18	0,295	0,420	45,06

\*производња топлотне енергије у погону прераде дрвета; Извор: прорачун аутора

Потрошња горива и потрошња сировине су, према приказаној табели 6.32 пропорционалне за све врсте сировине, док то не важи за потрошњу енергије и емисију CO<sub>2</sub>e по произведеном MWh топлоте. Вредности NEROI расту са смањењем влажности горива, а однос са EROI више није пропорционалан због утрошка енергије потребне за рад индустријских котлова.

#### Дрвни пелет

Дрвни пелет се може користити у пећима и котловима у домаћинствима, као и у индустријским котловима.

У табели 6.33 приказани су: потрошња енергије у производњи пелета, потрошња електричне енергије при раду пећи и котлова, произведена енергија и емисија CO<sub>2</sub>e при сагоревању по јединици масе за подмодел *Пелет<sub>1</sub>*.

Табела 6.33 *Коришћење пелета из подмодела Пелет<sub>1</sub> за производњу топлоте у кућним пећима и кућним и индустријским котловима*

Врста уређаја	Влажност сировине [%]	Утрошена енергија [kWh/t]			Произведена енергија [kWh/t]	CO <sub>2e</sub> [kg/t]
		Ел. енергија	Производња пелета	Укупно		
Кућне пећи	80	11,83	1.527	1.539	2.956	462
	70	11,83	1.357	1.368	2.956	450
	40	11,83	901	913	2.956	421
	20	11,83	643	655	2.956	407
Кућни котлови	80	6,47	1.527	1.533	3.233	456
	70	6,47	1.357	1.363	3.233	445
	40	6,47	901	908	3.233	416
	20	6,47	643	650	3.233	401
Индустријски котлови	80	7,48	1.527	1.534	3.742	457
	70	7,48	1.357	1.364	3.742	446
	40	7,48	901	909	3.742	417
	20	7,48	643	651	3.742	402

Извор: прорачун аутора

Према подацима из табеле 6.33 разлика у утрошеној енергији се мења променом влажности сировине, док при промени уређаја се врло мало мења. Такође, емисија CO<sub>2e</sub> има малу разлику у зависности од врсте уређаја у коме се користи пелет (1%), док се променом влажности сировине емисија може смањити до 12%. Вредности произведене енергије се разликују од врсте уређаја до 21%.

Табела 6.34 *Потрошња енергије, емисија CO<sub>2e</sub>, потрошња горива и сировине за произведени MWh топлоте коришћењем подмодела Пелет<sub>1</sub>*

Врста уређаја	Влажност сировине [%]	Укупно утрошена енергија [kWh/MWh]	Емисија CO <sub>2e</sub> [kgCO <sub>2e</sub> /MWh]	Потрошња пелета [t/MWh]	Потрошња сировине [m <sup>3</sup> /MWh]	NEROI
Кућне пећи	80	520	156	0,338	0,659	1,92
	70	463	152	0,338	0,636	2,16
	40	309	142	0,338	0,575	3,24
	20	222	138	0,338	0,541	4,51
Кућни котлови	80	474	141	0,309	0,602	2,11
	70	422	138	0,309	0,582	2,37
	40	281	129	0,309	0,526	3,56
	20	201	124	0,309	0,494	4,98
Индустријски котлови	80	410	122	0,267	0,521	2,44
	70	365	119	0,267	0,503	2,74
	40	243	111	0,267	0,455	4,12
	20	174	107	0,267	0,427	5,75

Извор: прорачун аутора

Подаци из табеле 6.34 приказују да са повећањем ефикасности уређаја у којима се користе пелети се смањује потрошња енергије за око 21% (при истој влажности), а слична је разлика и код осталих параметара који су дати у овој табели. Поредeћи резултате за различите влажности сировине при коришћењу у кућним пећима потрошња енергије за производњу пелета се смањује, а вредност EROI се повећава за 2,34 пута. Емисија CO<sub>2e</sub> се са смањењем влажности сировине смањује за 1,14 пута, потрошња горива остаје иста, док потрошња сировине се смањује за 1,22 пута. Сличне зависности важе и за кућне и индустријске котлове.

У табели 6.35 приказани су потрошња енергије у производњи пелета, потрошња електричне енергије при раду пећи и котлова, произведена енергија и емисија CO<sub>2e</sub> при сагоревању по јединици масе за подмодел *Пелет<sub>2</sub>* (пелети од дрвних остатака).

Табела 6.35 *Коришћење пелета из подмодела Пелет<sub>2</sub> за производњу топлоте у кућним пећима и кућним и индустријским котловима*

Врста уређаја	Влажност сировине [%]	Утрошена енергија [kWh/t]			Произведена енергија [kWh/t]	CO <sub>2e</sub> [kg/t]
		Ел. енергија	Производња пелета	Укупно		
Кућне пећи	70	11,83	1.284	1.296	2.956	421
	40	11,83	836	848	2.956	395
	20	11,83	582	594	2.956	382
Кућни котлови	70	6,47	1.284	1.291	3.233	416
	40	6,47	836	843	3.233	390
	20	6,47	582	588	3.233	377
Индустријски котлови	70	7,48	1.284	1.292	3.742	417
	40	7,48	836	844	3.742	391
	20	7,48	582	589	3.742	378

*Извор: прорачун аутора*

Поредeћи податке о производњи топлотне енергије из пелета произведеног од огревног дрвета и дрвног остатка, потрошња енергије смањује се за 17% у корист дрвног остатка, а емисија CO<sub>2e</sub> се смањује за око 8% (при истој влажности улазне сировине).

У табели 6.36 приказани су подаци за потрошњу енергије и емисије CO<sub>2e</sub>, потрошња пелета и сировине по произведеном MWh топлотне енергије за подмодел *Пелет<sub>2</sub>*

Табела 6.36 Потрошња енергије, емисија CO<sub>2</sub>e, потрошња горива и сировине за произведени MWh топлоте коришћењем подмодела Пелет<sub>2</sub>

Врста уређаја	Влажност сировине	Укупно утрошена енергија	Емисија CO <sub>2</sub> e	Потрошња пелета	Потрошња сировине	NEROI
	[%]	[kWh/MWh]	[kgCO <sub>2</sub> e/MWh]	[t/MWh]	[m <sup>3</sup> /MWh]	
Кућне пећи	70	438	143	0,338	0,636	2,29
	40	287	134	0,338	0,575	3,51
	20	201	129	0,338	0,541	5,02
Кућни котлови	70	399	129	0,309	0,582	2,51
	40	261	121	0,309	0,526	3,86
	20	182	117	0,309	0,494	5,55
Индустријски котлови	70	345	111	0,267	0,503	2,91
	40	225	104	0,267	0,455	4,46
	20	157	101	0,267	0,427	6,41

Извор: прорачун аутора

Према табели 6.36 потрошња горива и сировине је иста као и код пелета произведених од огревног дрвета, док су потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e нижи за око 5%.

Из наведених података о коришћењу пелета може се закључити да је на крају циклуса коришћења мала разлика између извора сировине за производњу пелета, док влажност сировине више утиче на количину утрошене енергије, а мање на емисију CO<sub>2</sub>e (због коришћења дрвне сировине за сушење). Економска анализа производње и коришћења чврстих дрвних горива није била предмет овог истраживања, тако да друга хипотеза (да су дрвна горива конкурентна фосилним горивима) није ни потврђена оповргнута. Ако се посматра анализа еколошких фактора производње и коришћења, дрвна горива имају знатно боље показатеље којим конкуришу конвенционалним (фосилним) горивима (видите табелу 4.2).

## 6.2.2 Коришћење чврстих дрвних горива у когенеративним постројењима

Примери спрегнуте производње електричне и топлотне енергије и емисије CO<sub>2</sub>e подељена је по врсти инсталација. У табели 6.37 приказани су подаци за све врсте когенерација које се пореде у овом истраживању. Ради лакшег поређења усвојена је апсолутна влажност сечке од 40%, а за пелете 10%. За производњу пелета усвојена је почетна влажност сировине од 70%.

Табела 6.37 Произведена енергија и емисија CO<sub>2</sub>e у когенеративним постројењима за сагоревање 1 тоне чврстог дрвног горива

Врста сировине	Електрична енергија			Топлотна енергија			CO <sub>2</sub> e [kg]
	[kWh]	[kg CO <sub>2</sub> e]	[kg CO <sub>2</sub> e/MWh]	[kWh]	[kg CO <sub>2</sub> e]	[kg CO <sub>2</sub> e/MWh]	
<b>Стирлинг мотор</b>							
<i>Сечка<sub>1</sub></i>	341	11,58	33,97	2.636	69,92	26,53	81,5
<i>Сечка<sub>2</sub></i>	341	12,81	37,58	2.636	77,35	29,35	90,2
<i>Сечка<sub>3</sub></i>	341	11,34	33,28	2.636	68,50	25,99	79,8
<i>Сечка<sub>4</sub></i>	341	6,68	19,60	2.636	40,35	15,31	47,0
<i>Пелет<sub>1</sub></i>	451	64,05	142,06	3.487	386,88	110,94	450,9
<b>ORC турбина</b>							
<i>Сечка<sub>1</sub></i>	416	14,82	35,59	2.514	66,68	26,53	81,5
<i>Сечка<sub>2</sub></i>	416	16,39	39,37	2.514	73,77	29,35	90,2
<i>Сечка<sub>3</sub></i>	416	14,52	34,86	2.514	65,32	25,99	79,8
<i>Сечка<sub>4</sub></i>	416	8,55	20,54	2.514	38,48	15,31	47,0
<i>Пелет<sub>1</sub></i>	551	81,99	148,83	3.326	368,94	110,94	450,9
<b>Парни мотор</b>							
<i>Сечка<sub>1</sub></i>	335	14,99	44,75	2.474	66,51	26,88	81,5
<i>Сечка<sub>2</sub></i>	335	16,58	49,50	2.474	73,57	29,73	90,2
<i>Сечка<sub>3</sub></i>	335	14,68	43,83	2.474	65,15	26,33	79,8
<i>Сечка<sub>4</sub></i>	335	8,65	25,82	2.474	38,38	15,51	47,0
<i>Пелет<sub>1</sub></i>	443	82,94	187,12	3.274	367,99	112,40	450,9
<b>Парна турбина</b>							
<i>Сечка<sub>1</sub></i>	209	13,87	66,41	2.516	67,63	26,88	81,5
<i>Сечка<sub>2</sub></i>	209	15,34	73,47	2.516	74,82	29,73	90,2
<i>Сечка<sub>3</sub></i>	209	13,58	65,06	2.516	66,25	26,33	79,8
<i>Сечка<sub>4</sub></i>	209	8,00	38,32	2.516	39,03	15,51	47,0
<i>Пелет<sub>1</sub></i>	276	76,73	277,71	3.329	374,20	112,40	450,9
<b>Гасни мотор</b>							
<i>Сечка<sub>1</sub></i>	902	47,97	53,17	1.264	33,53	26,53	81,5
<i>Сечка<sub>2</sub></i>	902	53,06	58,82	1.264	37,10	29,35	90,2
<i>Сечка<sub>3</sub></i>	902	46,99	52,08	1.264	32,85	25,99	79,8
<i>Сечка<sub>4</sub></i>	902	27,68	30,68	1.264	19,35	15,31	47,0
<i>Пелет<sub>1</sub></i>	1.194	265,39	222,33	1.672	185,54	110,94	450,9

Извор: прорачун аутора

Укупна емисија гасова стаклене баште за исту врсту горива је иста код свих когенеративних постројења. Овај однос се разликује у односу на врсту инсталације по различитом односу произведене електричне и топлотне енергије. Вредности за *Сечка<sub>4</sub>* узети су за случај када когенеративно постројење ради у погону прераде дрвета, односно на месту где се производи гориво.



У табели 6.38 приказани су подаци о производњи електричне и топлотне енергије сагоревањем једне тоне дрвне сировине (Сечка<sub>3</sub>) влажности 10% у производњи пелета.

Табела 6.38 Произведена енергија и емисија CO<sub>2</sub>e когенерацијом у производњи пелета сагоревањем 1 тоне дрвне сировине (Сечка<sub>3</sub>) влажности 10%

Врста уређаја	Електрична енергија			Топлотна енергија			CO <sub>2</sub> e [kg]
	[kWh]	[kg CO <sub>2</sub> e]	[kg CO <sub>2</sub> e/MWh]	[kWh]	[kg CO <sub>2</sub> e]	[kg CO <sub>2</sub> e/MWh]	
Стирлинг мотор	451	13,79	30,57	3487	76,06	21,81	89,8
ORC турбина	551	17,65	32,03	3326	79,40	23,88	97,0
Парни мотор	443	17,85	40,27	3274	79,20	24,19	97,0
Парна турбина	276	16,51	59,77	3329	80,53	24,19	97,0
Гасни мотор	1194	40,66	34,06	1672	39,93	23,88	80,6

Извор: прорачун аутора

Према подацима из табеле 6.38 највише електричне енергије би се произвело коришћењем гасног мотора, док би најмања производња била коришћењем парне турбине.

#### Производња пелета са когенерацијом

Укључивање когенерације у производњу пелета захтева додатну количину сировине да би се део топлотне енергије трансформисао у електричну енергију. Од ефикасности трансформације зависи потрошња дрвне сировине, што се може видети у табели 6.39. Пример коришћења когенерације у производњи пелета подразумева да се производи потребна количина топлотне енергије потребне да се осуши дрвна сировина за производњу пелета, да се произведена електрична енергија користи у процесу пелетирања и да делом замени електричну енергију из мреже.

Табела 6.39 Потрошња дрвне сировине при коришћењу когенерације у производњи пелета [m<sup>3</sup>/t]

Влажност сировине [%]	Стирлинг мотор	ОРЦ турбина	Парни мотор	Парна турбина	Гасни мотор
80	1,985	2,013	2,014	2,004	2,850
70	1,911	1,932	1,934	1,926	2,551
40	1,713	1,721	1,722	1,719	1,930
20	1,602	1,604	1,605	1,604	1,660

Извор: прорачун аутора

При порасту влажности дрвне сировине повећава се потребна количина топлоте за сушење, а тиме се повећава количина дрвне сировине потребна за когенерацију. То значи да са влажношћу расте и капаците когенерације. На потрошњу дрвне сировине највише утиче ефикасност производње топлотне енергије и укупна ефикасност когенерације.

## 7. Анализа резултата истраживања

Приказани општи модел, који представља основни резултат рада, постављен је са циљем да се могу анализирати енергетски и еколошки фактори који би могли да утичу на ефекте коришћења чврстих дрвних горива. Модел омогућује да се на основу улазних података о врсти и количини сировине и примењеној технологији добију одговарајући показатељи (јединична потрошња енергије, потрошња горива и сировине, EROI и NEROI, као и емисија CO<sub>2</sub>e) потребни за оцену и поређење животних циклуса различитих врста чврстих дрвних горива.

Фактори, који утичу на потрошњу енергије у животном циклусу чврстих дрвних горива, могу се поделити на: факторе сировине, факторе производње и транспорта горива и факторе коришћења дрвних горива.

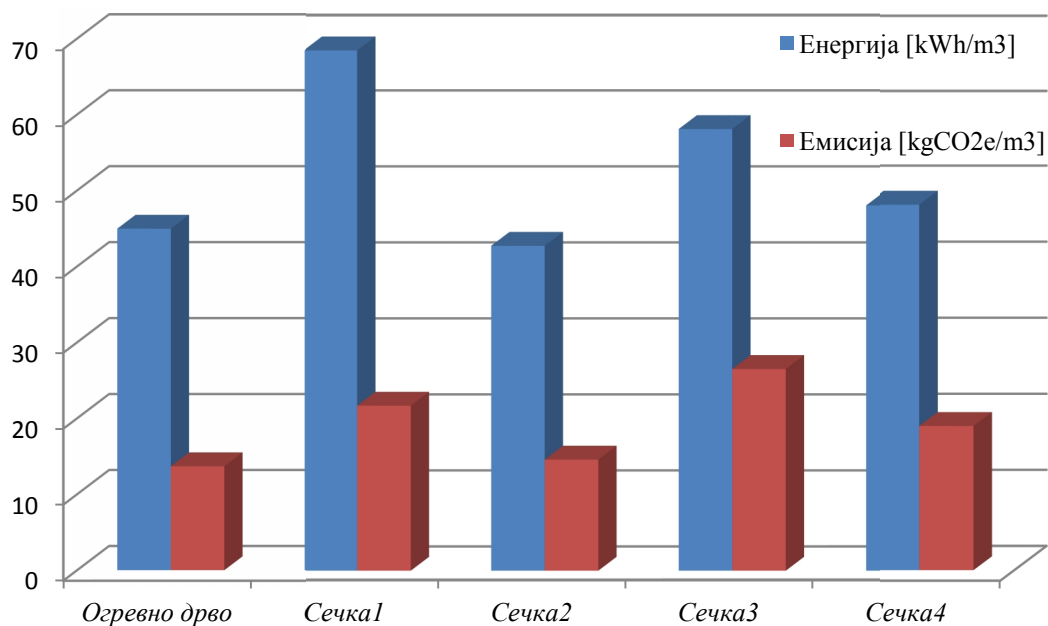
Утицаји који су анализирани у овом поглављу су: потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e у производњи горива, могући начини коришћења чврстих дрвних горива за производњу топлотне и електричне енергије и транспорт сировине и чврстих дрвних горива.

На крају је приказана анализа утицаја производње и транспорта чврстих дрвних горива на животну средину направљена уз коришћење програма SimaPro.

### 7.1 Потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e у производњи чврстих дрвних горива

Влажност дрвета има највећи утицај на потрошњу енергије и емисије CO<sub>2</sub>e код производње чврстих дрвних горива, као и на транспорт до крајњег купца. Финална влажност дрвних горива утиче на нето калоријску вредност и степен искоришћења при сагоревању.

Потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e рачуната по m<sup>3</sup> дрвне сировине која се користи у производњи огревног дрвета и дрвне сечке представљена је на графикону 7.1.

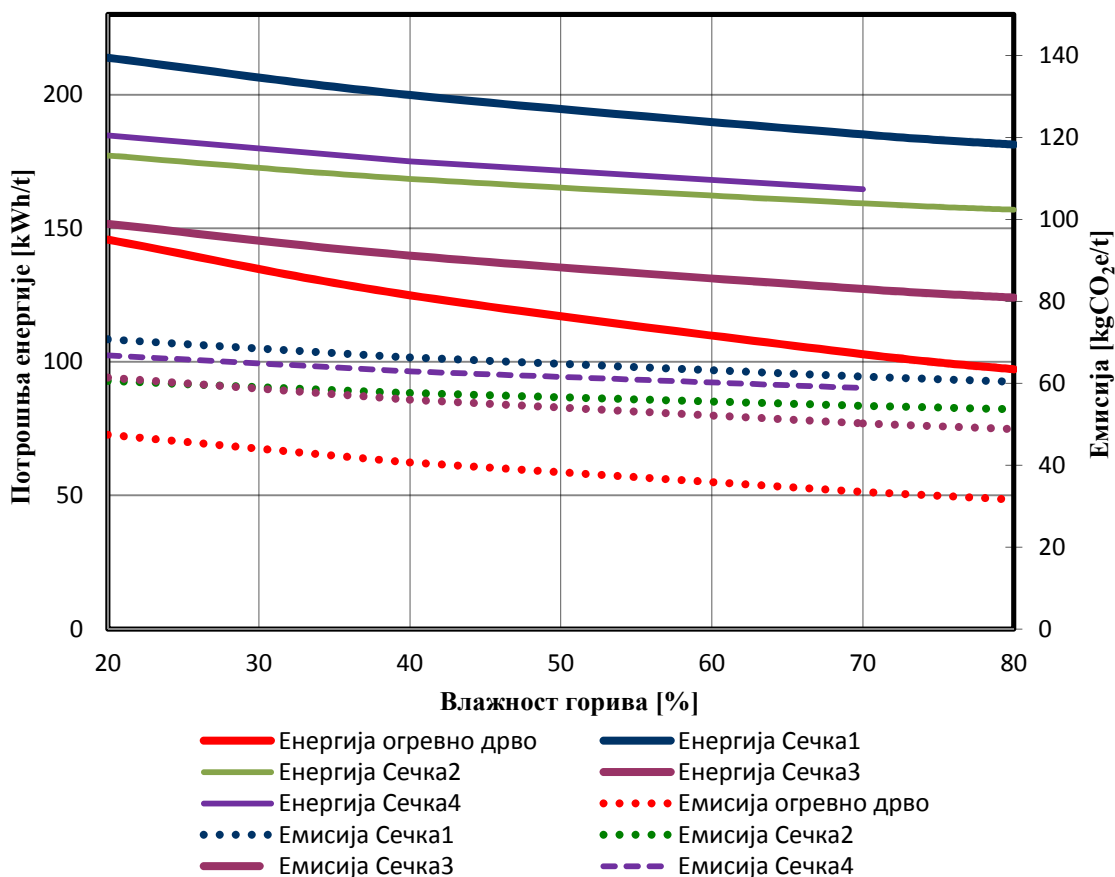


Графикон 7.1 Потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e у производњи огривног дрвета и сечке према количини употребљене дрвне сировине

Графикон 7.1 показује да је најмање потребно енергије за производњу сечке израђене од шумских остатака (подмодел Сечка<sub>2</sub>), нешто више енергије је потребно за производњу огривног дрвета, према потрошњи енергије следећа је производња сечке од дрвних остатака из прераде дрвета (подмодел Сечка<sub>4</sub>), а највише енергије је потребно за производњу сечке од огривног дрвета (подмодел Сечка<sub>1</sub> и подмодел Сечка<sub>3</sub>).

Када се говори о емисији CO<sub>2</sub>e редослед је нешто другачији. Најнижа емисија CO<sub>2</sub>e јавља се код производње огривног дрвета. Разлике у потрошњи енергије и емисији CO<sub>2</sub>e, код производње сечке и огривног дрвета су последица већег учешћа фосилних горива и/или електричне енергије у производњи сечке, односно разлика да ли се за уситњавање користе стационарне дробилице (са електрични погоном) које имају већу емисију гасова са ефектом стаклене баште или мобилне дробилице које користе дизел гориво. Електрична енергија има око 3 пута већу емисију CO<sub>2</sub>e за један kWh у односу на дизел гориво или бензин.

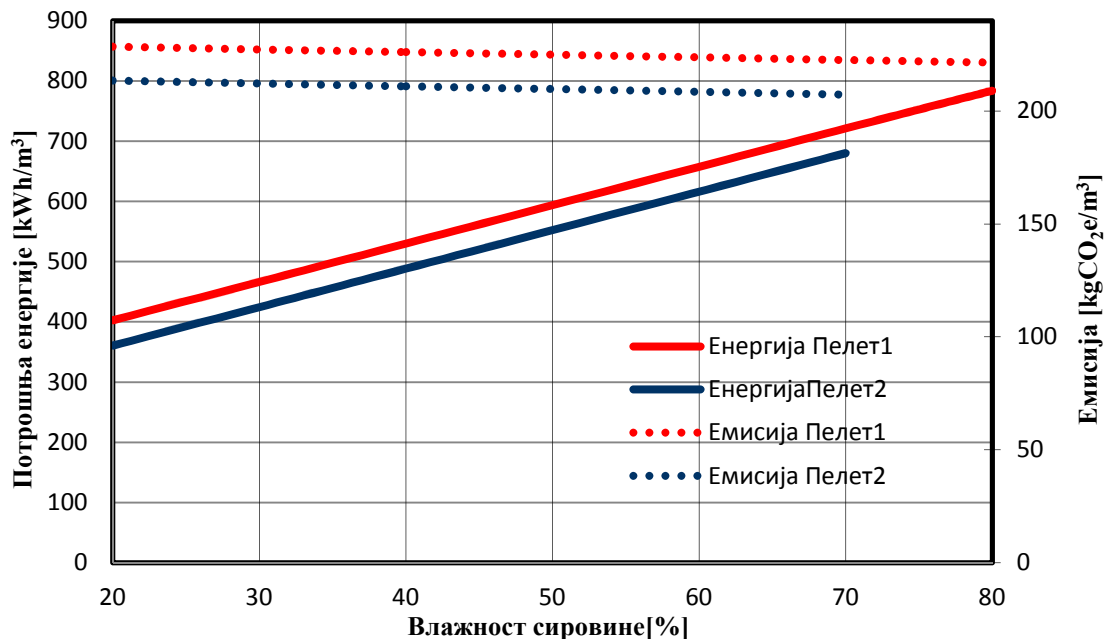
На графикону 7.2 приказана је потрошња енергије и емисије  $\text{CO}_2$ е при производњи једне тоне огревног дрвета или дрвне сечке за различите почетне влажности.



Графикон 7.2 Потрошња енергије и емисија  $\text{CO}_2$ е при производњи 1 тоне огревног дрвета и сечке за различите влажности

Графикон 7.2 приказује да влажност сировине, односно горива утиче тако да се потребна енергија и емисија смањују са повећањем влажности у дрвету. Влажност дрвета утиче мање на потрошњу енергије и емисију  $\text{CO}_2$ е у односу на врсту дрвне сировине, односно врсту горива. Односи између врста произведених горива је исти као код мерења према количини дрвне сировине (видите графикон 7.1).

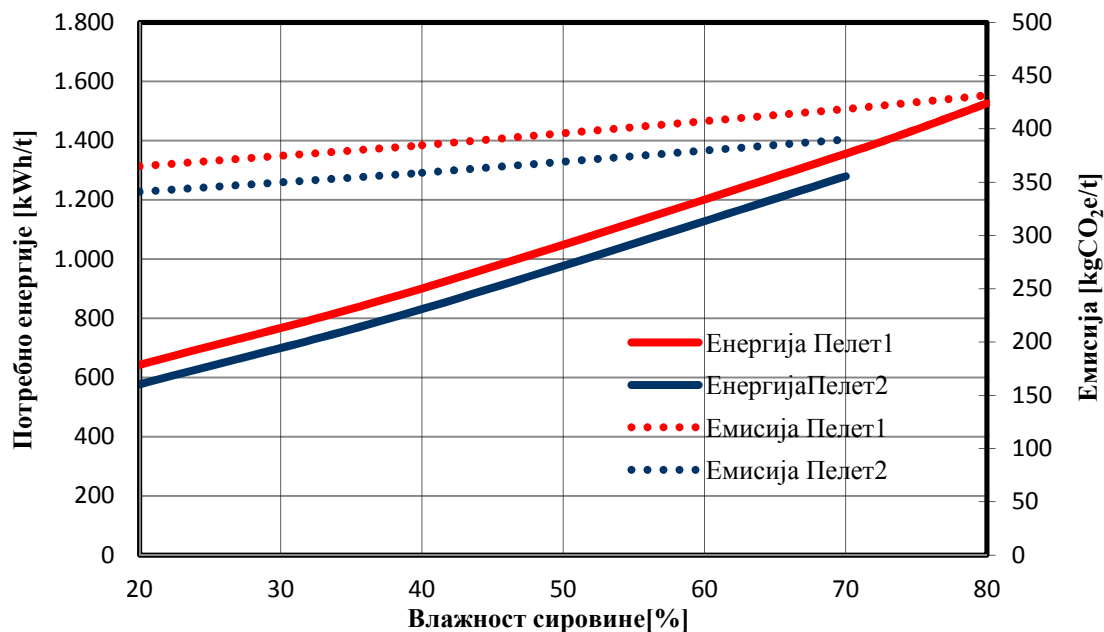
Слична анализа је урађена и за производњу пелета. На графикону 7.3 приказана количина утрошене енергије и емисије гасова стаклене баште у зависности од влажности дрвне сировине за производњу пелета. Вредности су израчунате у односу на утрошену запремину дрвне сировине.



Графикон 7.3 Потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e по m<sup>3</sup> коришћене дрвне сировине у производњи пелета

Подаци са графикона 7.3 показују да потрошња енергије у производњи пелета директно зависи од влажности сировине, односно да са смањивањем почетне влажности сировине опада и потрошња енергије. Ово се објашњава чињеницом да је за влажнију сировину потребно уложити више топлотне енергије за њено сушење. Са горње слике се види да влажност сировине нема превеликог утицаја на интензитет емисије гасова стаклене баште. Основни разлог је то што се за сушење, као енергент, користи дрво, које има веома малу емисију CO<sub>2</sub>e у атмосферу.

Потрошња енергије и емисије CO<sub>2</sub>e по јединици масе произведених пелета у односу на почетну влажност дрвне сировине представљена је на графикону 7.4.



Графикон 7.4 Потрошња енергије и емисија CO<sub>2</sub>e по 1 тони произведених пелета за различите влажности дрвне сировине

Регресионом анализом добијене су следеће зависности између потрошње енергије при производњи пелета и влажности коришћене дрвне биомасе:

$$E_{pot} = 0,0455u^2 + 10,172u + 421,56 \text{ - за подмодел „Пелет}_1\text{“}$$

$$E_{pot} = 0,0446u^2 + 10,042u + 357,96 \text{ - за подмодел „Пелет}_2\text{“}$$

где је:  $E_{pot}$  – потребна енергија за производњу 1 тоне пелета [kWh/t];  $u$ - апсолутна влажност дрвета [%].

Са повећањем влажности улазне сировине расте потребна енергија за производњу пелета. Пораст је приближно исти за оба разматрана случаја и износи 14,3 kWh/t за повећање влажности за 1%.

Регресионе једначине зависности емисије од влажности имају следећи облик:

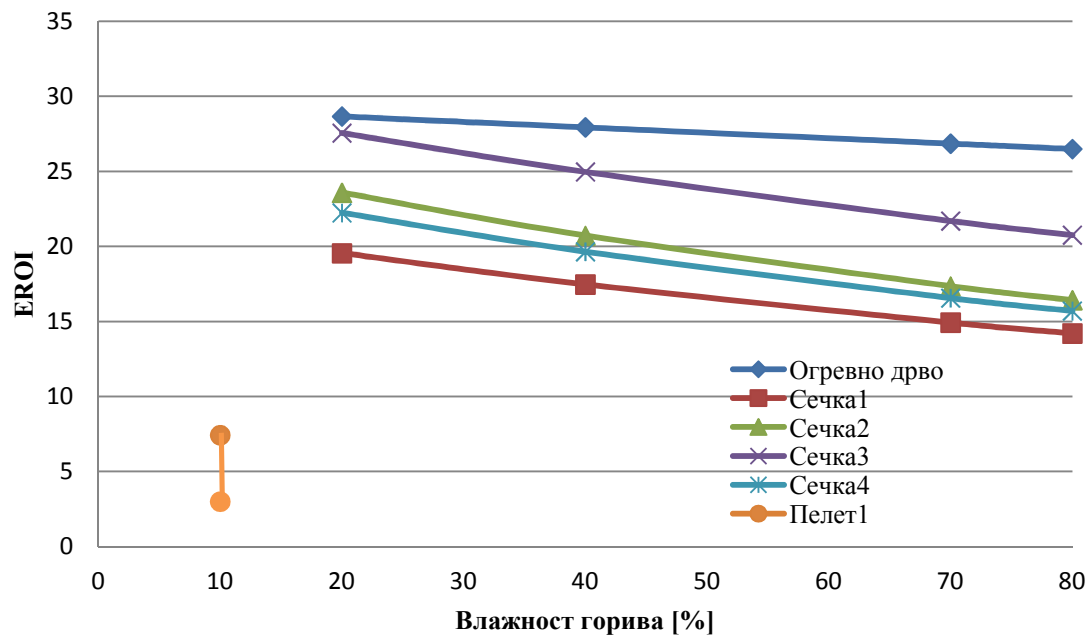
$$GWP = 0,0034u^2 + 0,7687u + 348,4 \text{ - за подмодел Пелет}_1$$

$$GWP = 0,0031u^2 + 0,7048u + 325,7 \text{ - за подмодел Пелет}_2$$

где је:  $GWP$  – емисија гасова са ефектом стаклене баште за 1 тону произведених пелета [kgCO<sub>2</sub>e/t];  $u$ - апсолутна влажност дрвета [%].

Са повећањем потребне енергије расте и емисија гасова са ефектом стаклене баште али значајно блаже што је то случај са потрошњом енергије. Просечно повећање износи између 7 и 11 kgCO<sub>2</sub>e/t.

Нето калоријска вредност дрвног горива расте са смањивањем влажности дрвета. Однос између доње топлотне моћи горива и утрошене енергије при производњи одговарајућег горива дат је преко EROI показатеља. На графикону 7.5 приказана је промена EROI у зависности од влажности и врсте дрвног горива.



Графикон 7.5 Вредности EROI у зависности од врсте и влажности чврстих дрвених горива

Према графикону 7.5 може се одредити утицај врсте и влажности горива која се производе на вредност EROI. Код свих подмодела сечки технологије уситњавања имају већи утицај на вредности EROI од влажности горива. Пелет има увек исту финалну влажност (10%) а разлике у вредности за EROI, израчунате за подмодел *Пелет<sub>1</sub>*, зависе искључиво од почетне влажности сировине.

Регресионом анализом добијене су следеће зависности између EROI и влажности произведеног горива.

$$EROI = -0,0361u + 29,39 \text{ - за подмодел Огревно дрво}$$

$$EROI = 0,0004u^2 - 0,1533u + 30,465 \text{ - за подмодел Дрвна сечка<sub>1</sub>}$$

$$EROI = 0,0004u^2 - 0,1257u + 21,914 \text{ - за подмодел Дрвна сечка<sub>3</sub>}$$



где је:  $u$ - апсолутна влажност дрвета [%].

Просечно смањење EROI са повећањем влажности дрвног горива за 1% износи:

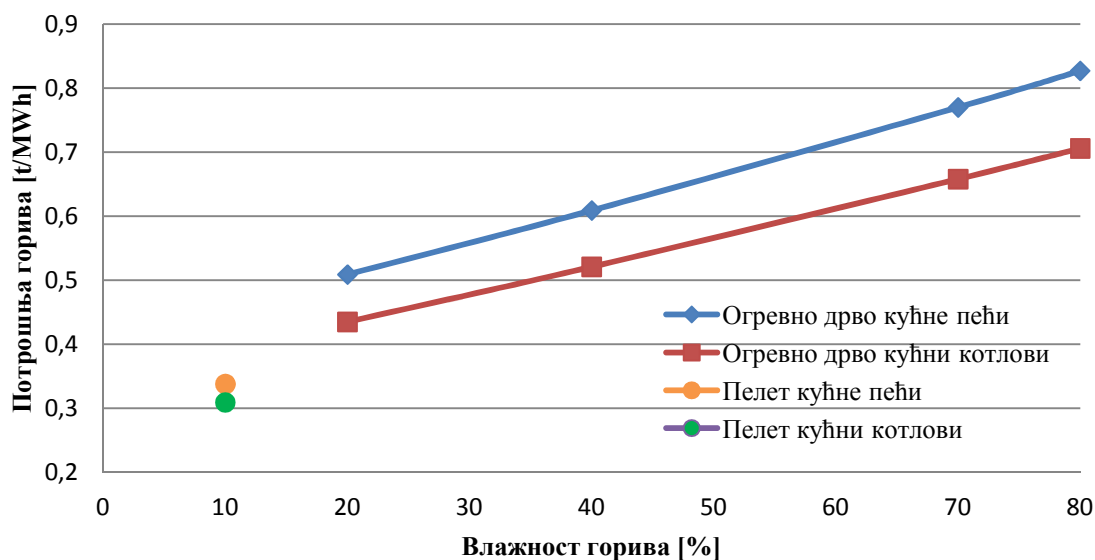
- 0,0361 за подмодел *Огревно дрво*
- За 0,0089 подмодел *Сечка<sub>1</sub>*
- 0,0113 за сечку за подмодел *Сечка<sub>3</sub>*

## 7.2 Производња топлотне енергије

На укупно искоришћење енергетског потенцијала чврстих дрвених горива поред врсте и влажности дрвног горива, велики утицај има и (сезонски) степен искоришћења горива при сагоревању који зависи од врсте уређаја, врста ложишта, начин дозирања и управљања, режим сагоревања и других фактора.

У анализи је претпостављено да домаћинства за грејање и кување користе огревно дрво или пелет и да се за то користе пећи или кућни котлови (усвојене вредности сезонских ефикасности коришћења горива дате су поглављу 5 у табели 5.24).

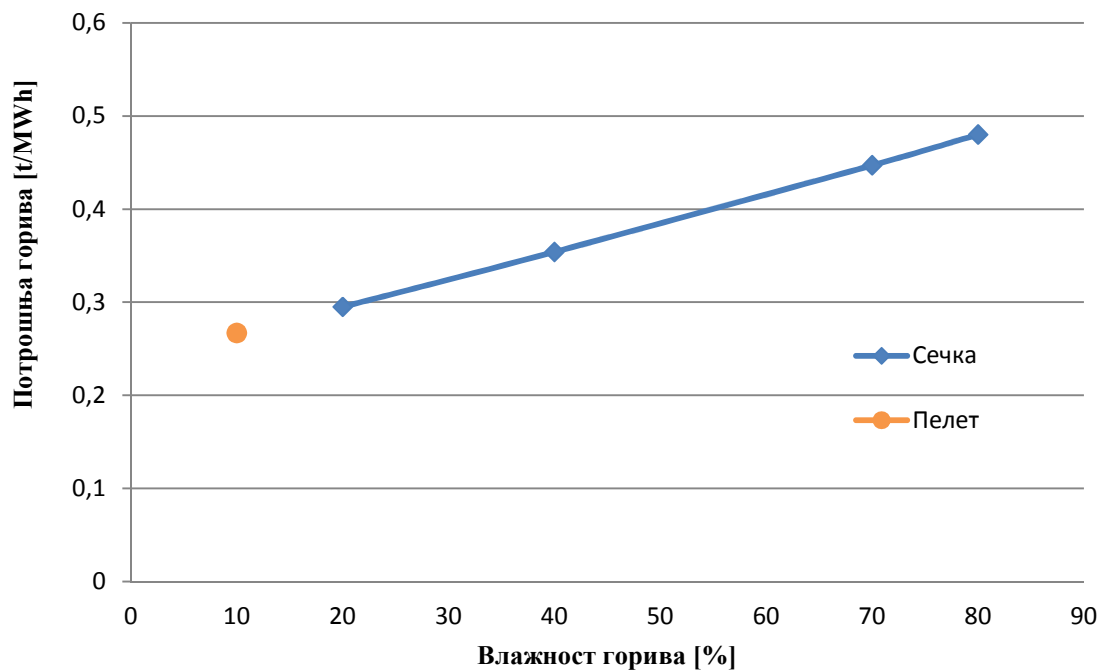
На графикону 7.6 су приказане потрошње оревног дрвета различите влажности и пелета у пећима и котловима у домаћинствима за један MWh произведене топлотне енергије.



Графикон 7.6 Потрошња оревног дрвета и пелета при производњи топлоте у домаћинствима (t/MWh)

Графикон 7.6 показује да са смањењем влажности горива код огревног дрвета смањује се и количина огревног дрвета потребна да се произведе један MWh топлотне енергије. На пример, за добијање једног MWh топлотне енергије потребно је 39% мање огревног дрвета влажности 20% у односу на случај када би се користило дрво влажности 80%. Влажност пелета је увек приближно иста (око 10%), а разлике у потрошњи горива су последица у различитим степену искоришћења у кућних пећи и котлова. Исто објашњење важи и коришћење огревног дрвета.

На графикону 7.7 приказана потрошња сечке и пелета за произведени један MWh топлотне енергије у индустријским котловима за различите влажности горива.

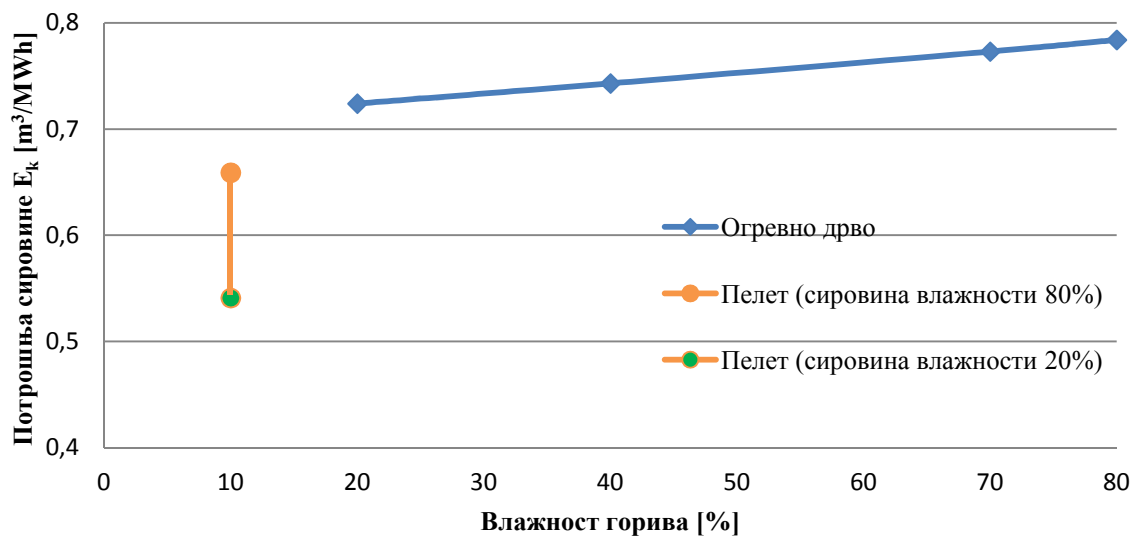


Слика 7.7 Потрошња сечке и пелета при производњи топлоте у индустријским котловима (t/MWh)

Графикон 7.7 показује да влажност горива има велики утицај на потрошњу сечке и да се са смањењем влажности смањује количина горива потребна за јединицу топлотне енергије. Овај однос између влажности горива је исти као и код огревног дрвета, само су апсолутне вредности нешто ниже због више сезонске ефикасности коришћења горива.

У наставку су предпостављене анализе потрошње дрвне сировине за производњу 1 MWh топлотне енергије кроз различите врсте дрвних горива. Циљ анализе је да се покажу разлике у потрошњи дрвне сировине за исту јединицу енергије кроз различите врсте дрвних горива, а тиме и ефикасност њеног коришћења.

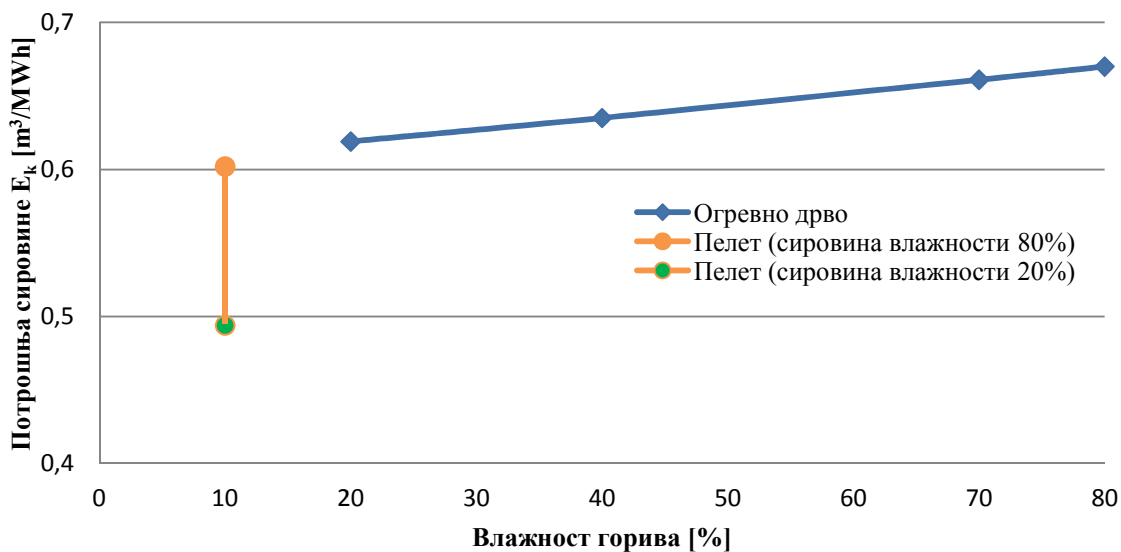
Количина сировине, потребне за производњу јединице топлотне енергије (MWh), из које је произведено огревно дрво, односно пелет у кућним пећима приказана је на графикону 7.8.



Графикон 7.8 Ефикасност коришћења расположивих ресурса ( $E_k$ ) при коришћењу огревног дрвета и пелета у кућним пећима ( $m^3/MWh$ )

Графикон 7.8 показује да је потребно мање почетне дрвне сировине када се ложи пелет у односу на огревно дрво. Ово се објашњава пре свега већим степеном ефикасности уређаја у којима се користи пелет у односу на оне који користе огревно дрво. Према подацима са ове слике може се закључити да би се конверзија огревног дрвета пелетима остварило ефикасније коришћење расположиве дрвне биомасе.

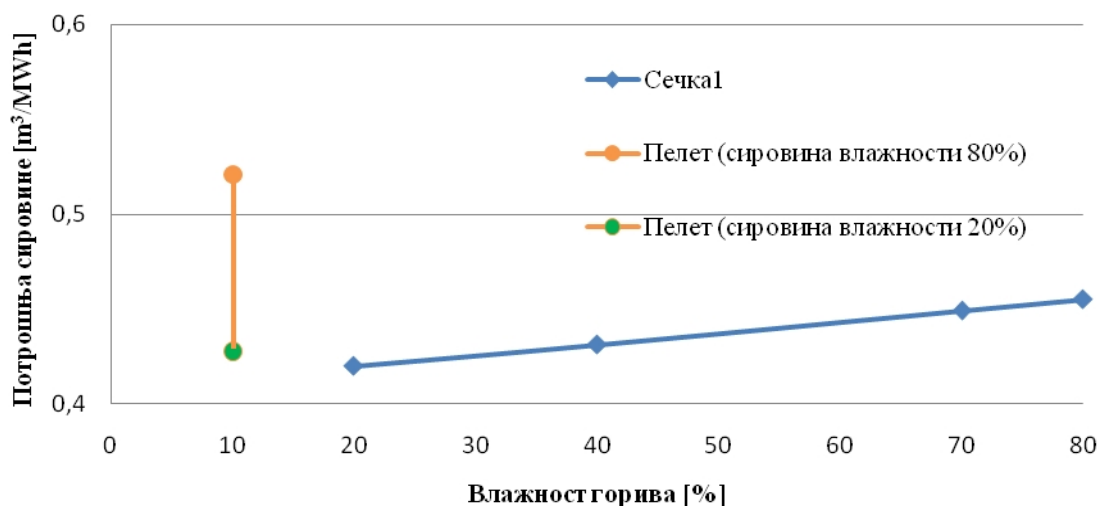
На слици 7.9 је приказана потрошња дрвне сировине по јединици произведене топлотне енергије у кућним коловима када се користе огревно дрво и пелет.



Графикон 7.9 Ефикасност коришћења расположивих ресурса ( $E_k$ ) при коришћењу огревног дрвета и пелета у кућним котловима ( $m^3/MWh$ )

Графикон 7.9 приказује да су кућни котлови ефикаснији у односу на пећи и да је пелет ефикаснији од огревног дрвета.

За индустријске котлове и топлане предлаже се коришћење сечке и пелета. На графикону 7.10 приказана је потрошња дрвне сировине у индустријским котловима за производњу 1 MWh топлоте од ове две врсте горива. Однос потребне сировине из које је произведена сечка или пелет и влажност горива за произведени један MWh топлоте у индустријским котловима приказан је на слици 7.10.



Графикон 7.10 Ефикасност коришћења расположивих ресурса ( $E_k$ ) при коришћењу сечке и пелета у индустријским котловима ( $m^3/MWh$ )

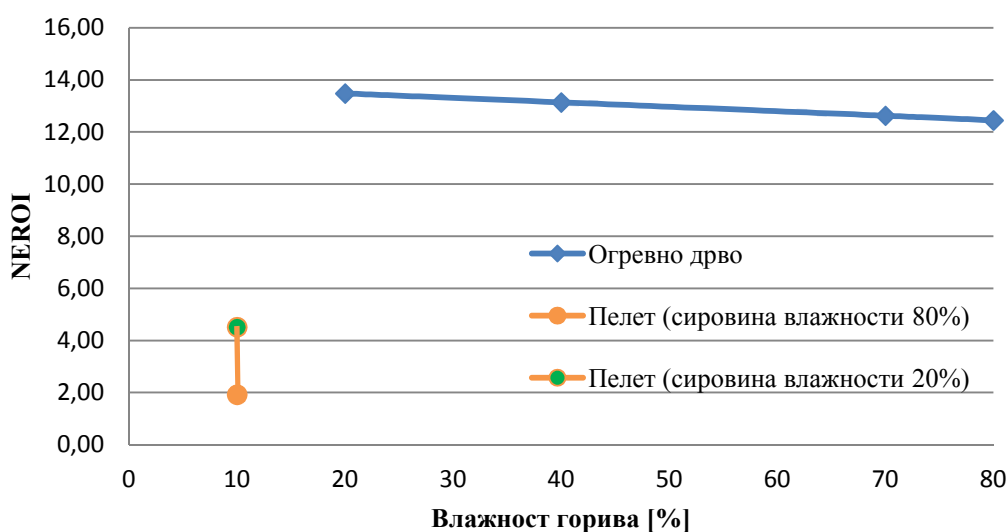
Графикон 7.10 показује да је код индустријских котлова, уколико се као мерило узме потрошња сировине, повољније користити дрвну сечку него пелет. Што је сечка сувља предност је израженија.

Из анализе ефикасности потрошње расположивих ресурса за производњу јединице топлотне енергије може се закључити да уређаји за сагоревање највише утичу на овај параметар, што потврђује осму хипотезу (укупни ефекти замене фосилних горива дрвним горивима могу се значајно увећати доградњом или заменом постојећих пећи и котлова).

Поред тога, резултати истраживања (*Ellul, 2012*) приказани у уводу дисертације, потврђују да се 90% дрвне биомасе у Србији користи у виду огревног дрвета, а свега 10% чине остале врсте чврстих дрвних горива (брикети, пелети, ђумур). Уз ове податке и анализу ефикасности расположивих ресурса, може се потврдити четврта хипотеза, односно да се дрвна биомаса за енергију се у Србији у великој мери користи на енергетски и еколошки неефикасан начин.

Ефекти производње и коришћења чврстих дрвних горива приказује се преко односа добијене и уложене енергије, односно преко вредности NEROI. Наведени примери су рачунати према вредностима утрошене енергије за производњу чврстих дрвних горива укључује и транспорт до крајњег корисника.

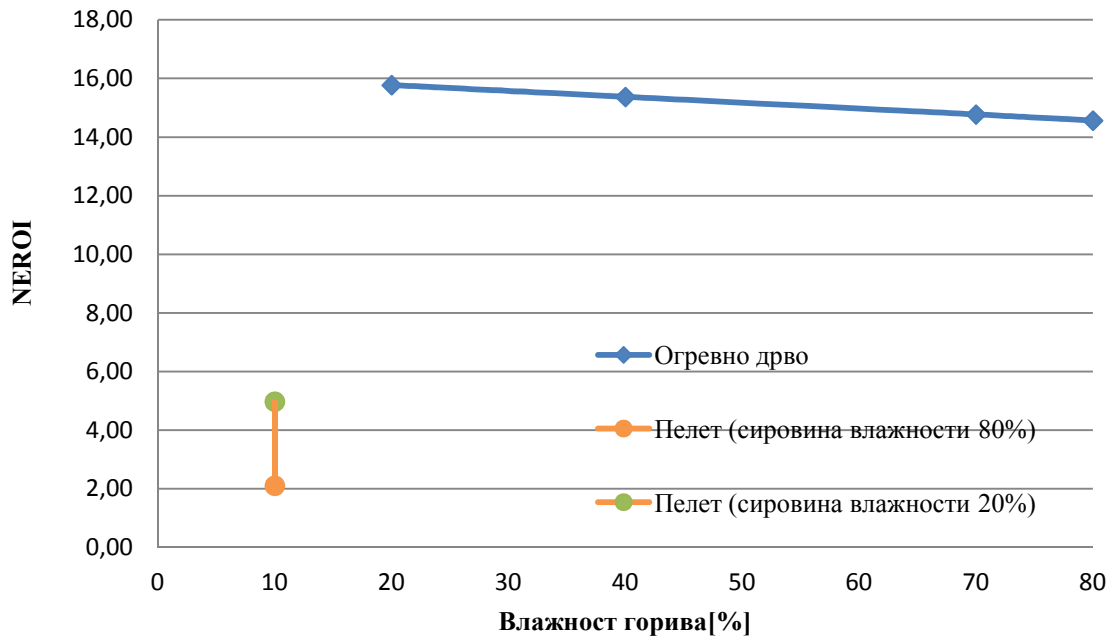
На графикону 7.11 дате су израчунате вредности NEROI за кућне пећи.



Графикон 7.11 Вредност NEROI за пећи у домаћинствима

Графикон 7.11 приказује да пелет има значајно ниже вредности NEROI у односу на огревно дрво, поготово ако се пелет производи од сировог дрвета (влажности 80%).

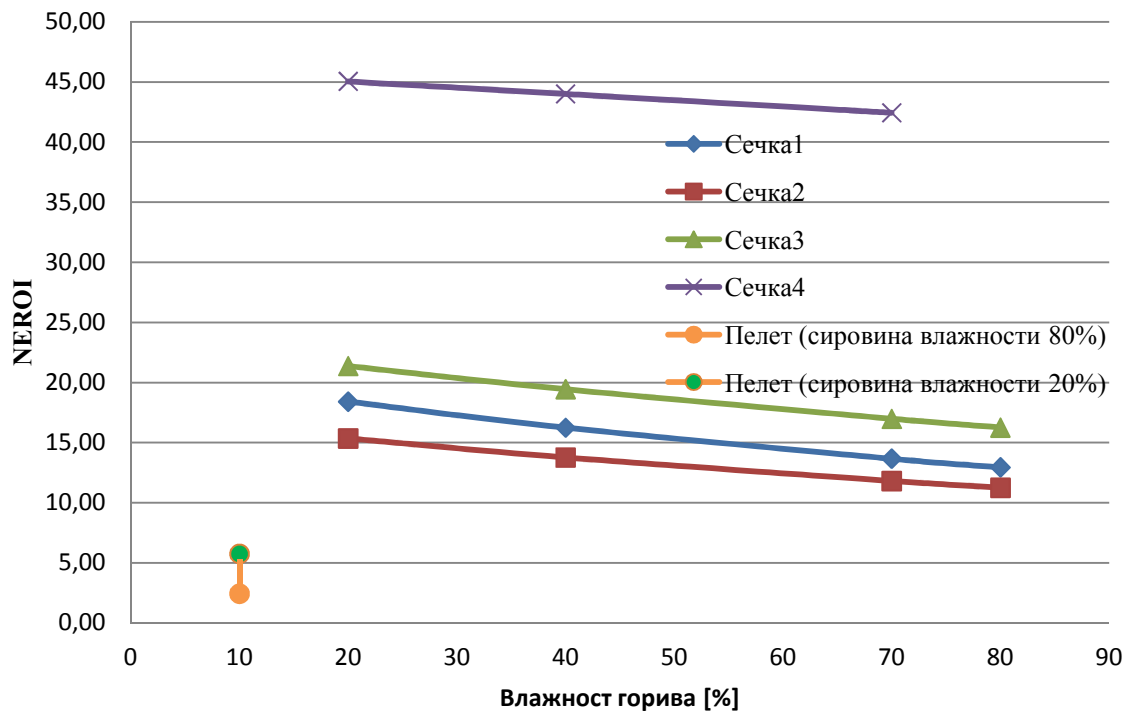
На графикон 7.12 приказане су вредности NEROI за производњу топлотне енергије из огревног дрвета различите влажности и пелета у кућним котловима.



Графикон 7.12 Вредност NEROI за котлове у домаћинствима

Разлика између кућних пећи и котлова је у ефикасности производње топлотне енергије и због тога су вредности NEROI различите, што се може видети уколико се упореде слике 7.11 и 7.12. Однос између огревног дрвета и пелета је сличан, односно пелет има знатно ниже вредности NEROI.

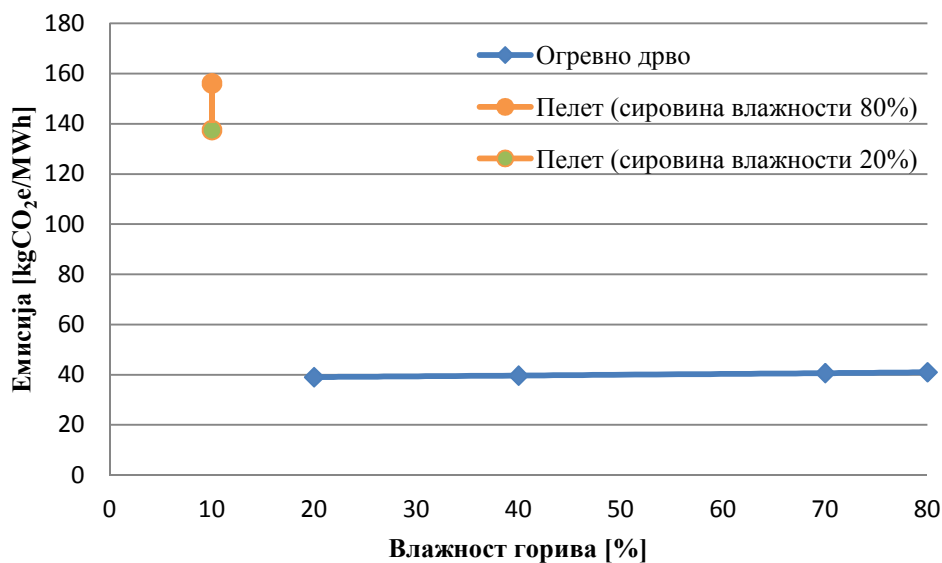
На графикону 7.13 приказан је однос NEROI и влажности сировине код коришћења сечке и пелета у индустријским котловима.



Графикон 7.13 Вредност *NEROI* за индустријске котлове

Графикон 7.13 приказује да су вредности *NEROI* за сечку ближе вредностима за пелет. Треба напоменути да је код *Сечка<sub>4</sub>* узето да се гориво користи у погону где је и настало, односно да нема учешћа транспорта у утрошеној енергији, што показује колико транспорт утиче на вредност *NEROI* код дрвних горива (огревног дрвета и сечке).

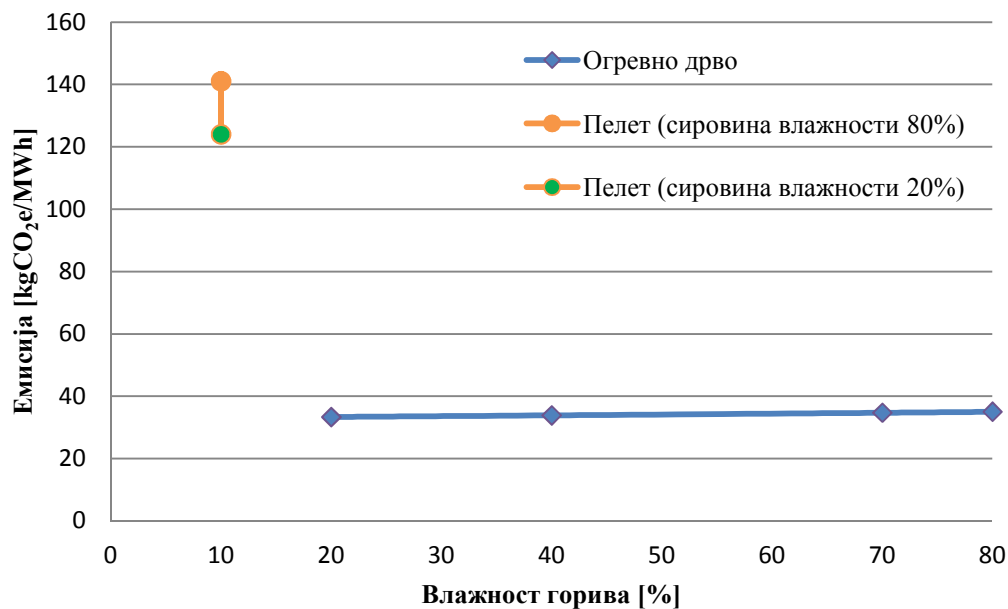
Емисија гасова са ефектом стаклене баште за производњу топлотне енергије у кућним пећима која користе огревно дрво различите влажности и пелета представљена је на графикону 7.14.



Графикон 7.14 Емисија  $CO_2$ е код производње топлотне енергије у кућним пећима

Графикон 7.14 показује да пелет има значајно вишу емисију гасова стаклене баште у односу на огревно дрво.

На графикону 7.15 приказана је емисија  $CO_2$ е за употребу оревног дрвета различите влажности и пелета у кућним котловима.

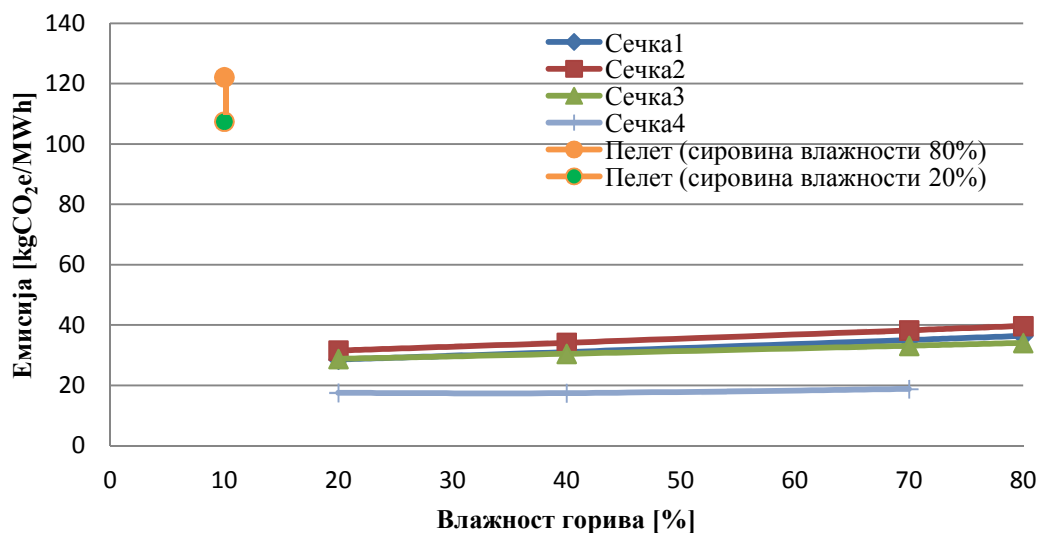


Графикон 7.15 Емисија  $CO_2$ е код производње топлотне енергије у кућним котловима



Емисија гасова стаклене баште је код котлова нижа у односу на пећи у домаћинствима. Разлог је, као и код потрошње горива, разлика у ефикасности коришћења горива.

На графикону 7.16 приказана је емисија  $\text{CO}_2\text{e}$  за производњу топлотне енергије коришћењем сечке и пелета у индустријским котловима.



Графикон 7.16 Емисија  $\text{CO}_2\text{e}$  код производње топлотне енергије у индустријским котловима

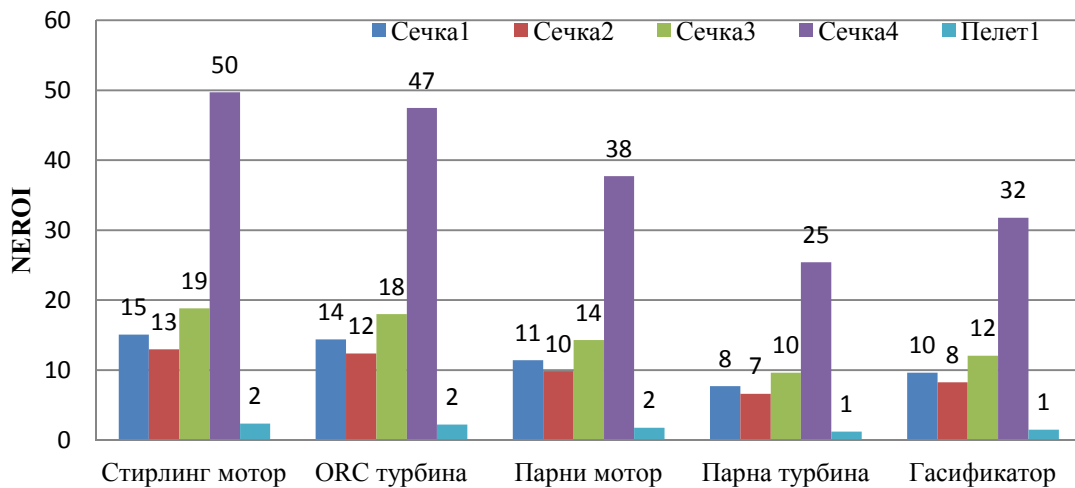
Графикон 7.16 показује да је иста промена емисије  $\text{CO}_2\text{e}$  код пелета и сличне вредности код сечке у односу на огревно дрво. Вредности *Сечка<sub>4</sub>* приказује колико транспорт утиче на повећање емисије. Са графикона 7.14 и 7.15 може се закључити да огревно дрво и сечка имају приближно исти утицај на животну средину и да је он значајно мањи од утицаја пелета.

### 7.3 Употреба дрвета у когенеративним постројењима

Корисници који имају континуирану потребу за великом количином топлотне енергије, као што су фабрике пелета, имају шансу да у овај систем укључе и производњу електричне енергије, односно когенерацију. Произведена електрична енергија може се предавати у мрежу, користити за сопствене потребе, односно комбинација ова два случаја. У раду су анализирани позитивни и негативни ефекти уколико се произведена електрична енергија користи у оквиру погона, а само евентуални вишкови предају у мрежу.

Укључивањем когенеративног постројења у систем за снабдевање топлотном енергијом погона за производњу пелета повећава се потрошња улазне сировине, а смањује се емисија CO<sub>2</sub>е и укупни степен корисности, односно смањује се нето вредност односа утрошене и произведене енергије (NEROI).

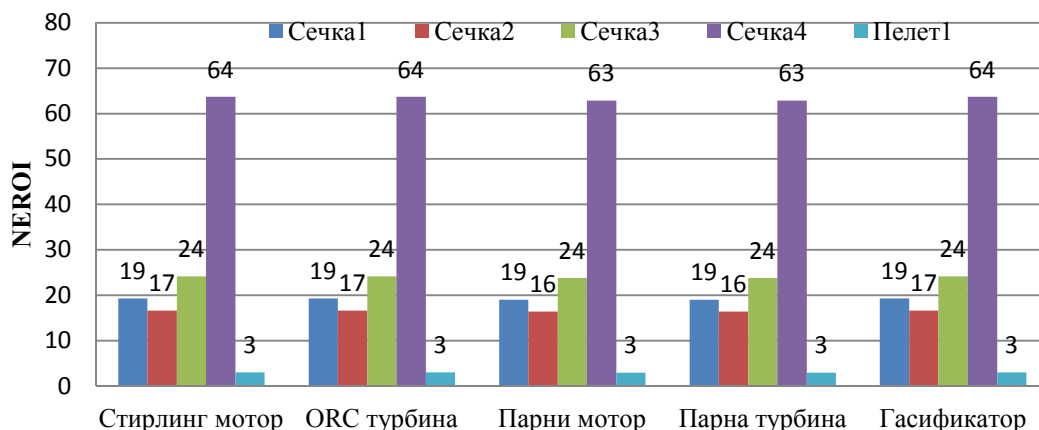
Однос произведене електричне енергије и уложене енергије за посматрана когенерациона постројења (NEROI) приказан је на графикону 7.17.



Графикон 7.17 Вредности NEROI за производњу електричне енергије у когенерационим постројењима

Графикон 7.17 показује да, поред врсте постројења и врста горива утиче на однос произведене и уложене енергије. Највише вредности NEROI се добијају за гориво *Сечка<sub>4</sub>* када се когенерационо постројење користи у преради дрвета и када се користе дрвни остаци у погону где је настао, па се кроз ове вредности може видети и утицај транспорта.

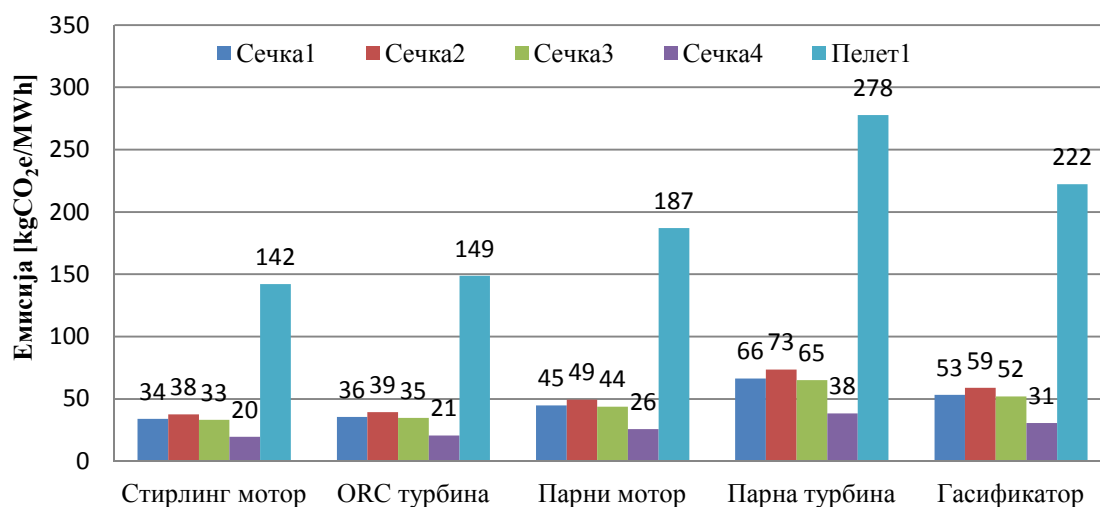
На графикону 7.18 приказане су вредности NEROI за производњу топлотне енергије у когенеративним постројењима.



Графикон 7.18 Вредности NEROI за производњу топлотне енергије у когенеративним постројењима

Вредности NEROI за производњу топлотне енергије на графикону 7.18 су веће од вредности истог параметра за производњу само топлотне енергије у индустријским котловима (видети графикон 7.16). Ово повећање вредности се објашњава тиме да је укупна ефикасност коришћења горива у когенеративним постојењима већа у односу на ефикасност коришћења горива у индустријским котловима.

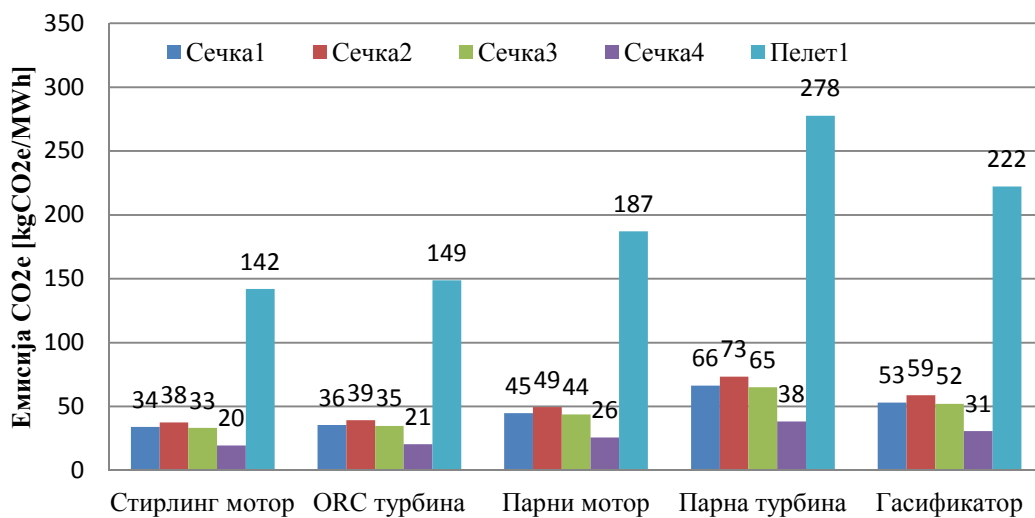
Емисија гасова са ефектом стаклене баште при производњи једног MWh електричне енергије, у зависности од врсте когенеративног постројења, приказана је на графикон 7.19. У прорачуну су узете вредности за влажност сечке од 70%, као најближе вредности добијеним у посматраним производњама пелета у Србији.



Графикон 7.19 Емисија CO<sub>2</sub>e при производњи електричне енергије у когенеративним постројењима

Графикон 7.19 приказује да је емисија гасова стаклене баште код дрвне сечке мања од 11 до 50 пута у односу на просечне вредности за коришћену електричну енергију у Србији (вредност емисије за средњи напон је  $978 \text{ kgCO}_2\text{e/MWh}$ ). Код коришћења пелета ове вредности су око 4 пута веће у односу на вредности које се односе на сечку, али су те вредности мање од 3 до 7 пута у односу на вредности коришћене електричне енергије у Србији.

На графикону 7.20 приказане су вредности емисије  $\text{CO}_2\text{e}$  при производњи топлотне енергије у когенеративним постројењима.



Графикон 7.20 Емисија  $\text{CO}_2\text{e}$  при производњи топлотне енергије у когенеративним постројењима

На графикону 7.20 приказане вредности емисије гасова са ефектом стаклене баште за производњу топлотне енергије у когенеративним постројењима имају мање вредности у односу на производњу топлотне енергије у индустријским котловима, а тај однос је пропорционалан разлици NEROI.

Из наведених података може се закључити да је коришћење чврстих дрвних горива у когенеративним постројењима оправдано са енергетског и еколошког становишта.

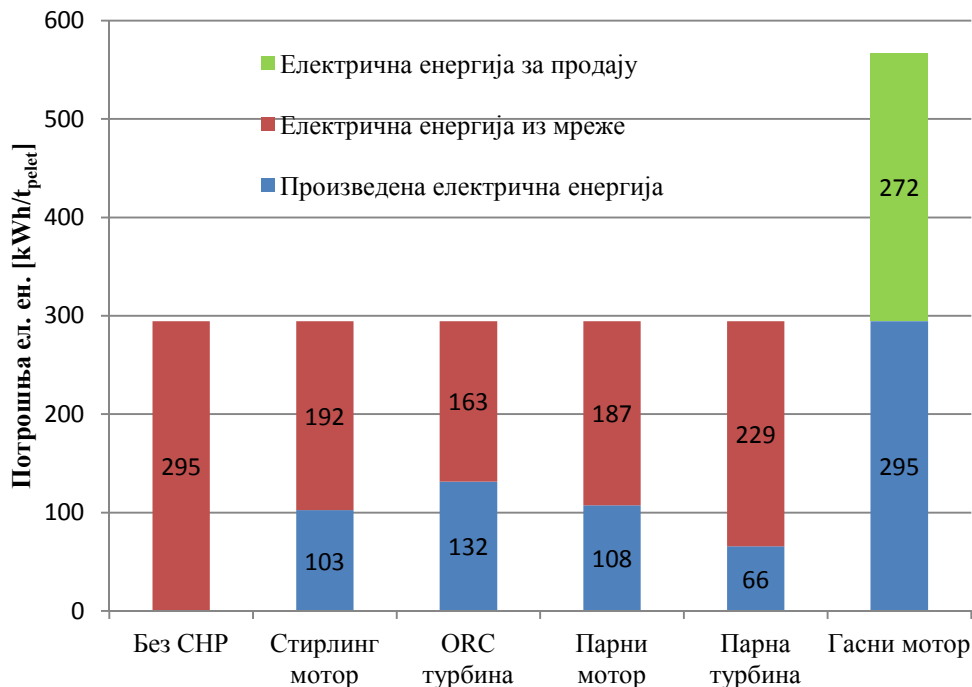
#### Производња пелета са когенерацијом

Производња пелета у погону у коме се потребна електрична енергија добија из когенеративног постројења има већу потрошњу сировине, али нижу емисију гасова стаклене баште. Ово смањење се односи на смањење индиректне емисије

CO<sub>2</sub>е електричне енергије из мреже, а која је, у овом случају, делом или потпуно замењена електричном енергијом произведеном из когенерације.

Као пример за анализу ефеката коришћења когенерације у производњи пелета узет је подмодел *Пелет<sub>1</sub>* (полазна дрвна сировина влажности 70%). Раније је већ израчунато (види табелу 5.19) да за производњу једне тоне пелета потребно утрошити 289 kWh електричне енергије. У класичном постројењу сва потребна енергија се узима из мреже.

На графикону 7.21 приказан је удео произведене електричне енергије у когенерацији у укупној потрошњи електричне енергије у производњи пелета.

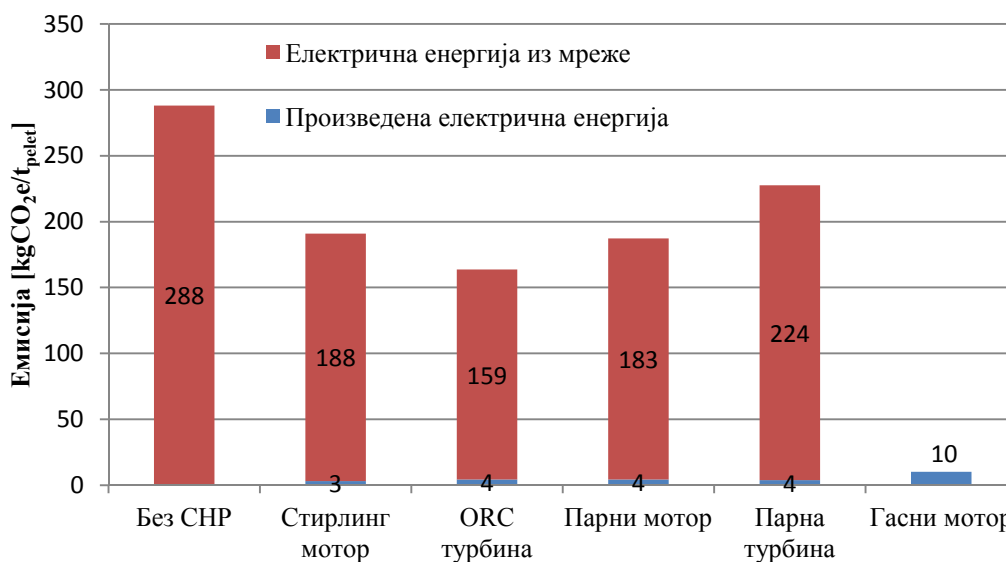


Графикон 7.21 Удео произведене електричне енергије когенерацијом у укупној потрошњи електричне енергије за производњу 1 тоне пелета

Графикон 7.21 показује да когенерација са гасним мотором производи довољно електричне енергије да задовољи све потребе у производњи пелета и има скоро исту количину вишка, која може да се испоручи у мрежу. Остале когенерације учествују од 22% (парна турбина) до 44% (ОРС турбина) у снабдевању погона за производњу пелета електричном енергијом. На ове разлике највише утиче однос између произведене топлотне и електричне енергије који је различит за различите когенерационе технологије. Код Стирлинг мотора за 1 kWh произведене

електричне енергије добија се 7,1 kWh топлотне енергије, код ORC турбине 5 kWh, код парног мотора 7 kWh, код парне турбине 11 kWh и код гасног мотора 1,3 kWh топлотне енергије.

Електрична енергија произведена у когенерационом потројењу смањује емисију гасова стаклене баште, што се може видети на графикаону 7.22.

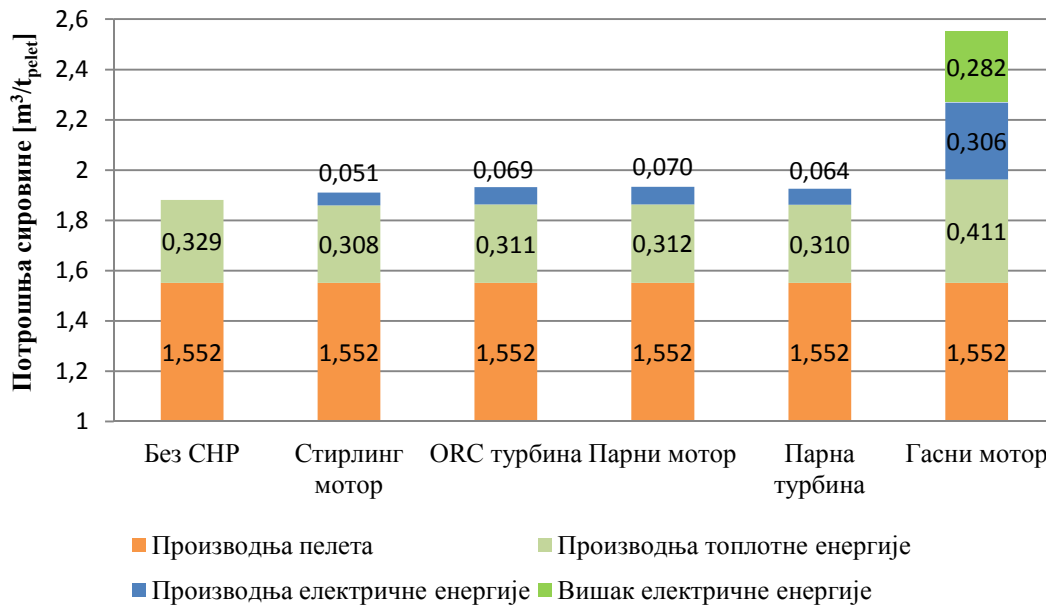


Графикон 7.22 Емисија CO<sub>2</sub>e утрошене електричне енергије у зависности од врсте когенерације за производњу 1 тоне пелета

Графикон 7.22 показује директну зависност између количине замењене електричне енергије из мреже са оном из когенерације и емисије електричне енергије која је употребљена за производњу пелета. Код гасног мотора је емисија CO<sub>2</sub>e за електричну енергију произведену у тој когенерацији свега 3,5% од емисије када се користи електрична енергија из мреже. Укупно смањење емисије CO<sub>2</sub>e за посматрани подмодел пелета је са 419 kgCO<sub>2</sub>e/t<sub>pelet</sub> (видети табелу 6.19) на 150 kgCO<sub>2</sub>e/t<sub>pelet</sub>, односно мање за 64%. При коришћењу Стирлинговог мотора емисија CO<sub>2</sub>e се смањује за 23%, код ORC турбине за 30%, код парног мотора 24% и код парне турбине 14%. Овим се потврђује седма хипотеза (садашње учешће фосилних горива у производњи чврстих дрвених горива може бити смањено) је потврђена.

Укључивање когенеративног постројења у систем за производњу топлотне енергије у погонима за пелетирање захтева додатну потрошњу дрвне сировине.

Потрошња сировине код производње једне тоне пелета у погонима са различитим типовима когенерације приказана је на графикону 7.23.



Графикон 7.23 Потрошња сировине за производњу 1 тоне пелета у зависности од врсте когенерације

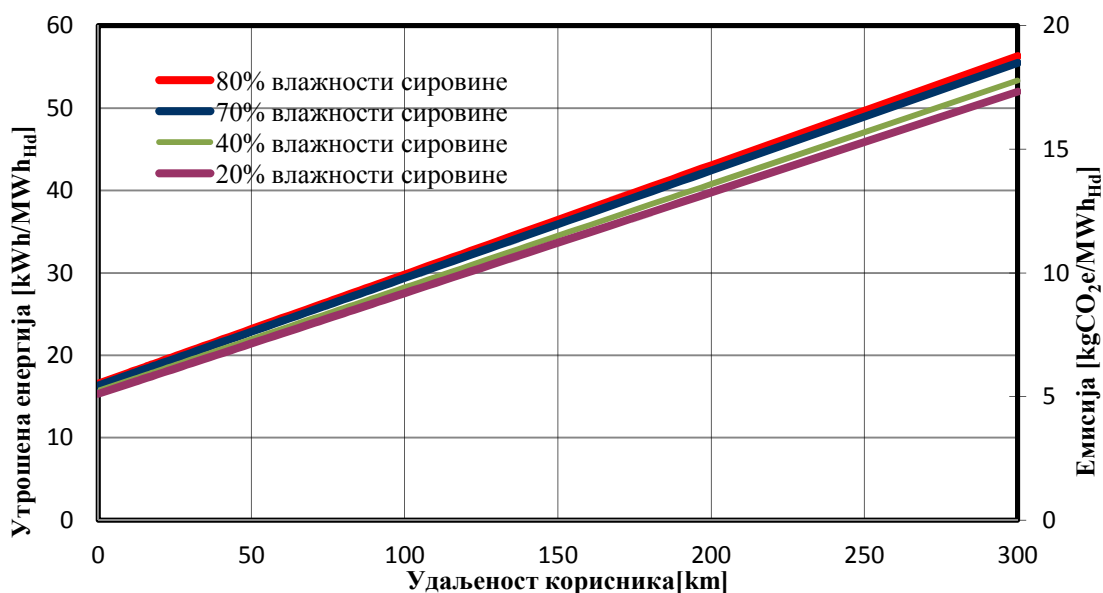
Графикон 7.23 показује да је количина дрвне сировине (влажности 70%) потребна за производњу једне тоне пелета, у класичном погону, износи  $1,552 \text{ m}^3$  и да се  $0,329 \text{ m}^3$  дрвне сировине троши за производњу топлотне енергије потребне за сушење. Код производње пелета са когенерацијом за производњу топлотне енергије је потребно око  $0,31 \text{ m}^3$ , осим код гасног мотора код кога је потрошња  $0,41 \text{ m}^3$ . Већа потрошња сировине код производње топлотне енергије код производње без когенерације настаје због усвојене мање ефикасности коришћења горива у односу на когенерације. Количина сировине која се потроши на производњу електричне енергије од  $0,051 \text{ m}^3$  до  $0,070 \text{ m}^3$  (око 3% од укупне потрошње дрвне сировине), осим код когенерације са гасним мотором код које је потрошња  $0,306 \text{ m}^3$  (око 12% дрвне сировине). Код когенерације са гасним мотором део сировине ( $0,282 \text{ m}^3$ ) се користи за производњу електричне енергије која се предаје у мрежу.

#### 7.4 Транспорт чврстих дрвних горива

Чврста дрвна горива се у Србији у највећој мери превозе камионима. Врста камионског превоза зависи највише од врсте чврстог дрвног горива, односно од гранулометријског састава и насипне масе. Огревно дрво се транспортује као вишеметарско и метарско, количина која се транспортује мери се у  $m^3$ . Сечка спада у расуте терете. Камиони за превоз сечке имају контејнерске приколице или полуприколице у које се може насути дрвна сечка, а количина се мери у тонама. Пелет је такође расути материјал, али се паковањем на палете (пре тога у вреће или џакове) добија комадни терет који се транспортује камионима са полуприколицом. Овај тип транспорта омогућује превоз других материјала у повратном смеру, па се за транспорт пелета узима само удаљеност производње од корисника.

За транспорт чврстих дрвних горива битне су два елемента: влажност дрвета које се транспортује и транспортна дистанца.

Утицај транспорта на укупну потрошњу енергије и емисију гасова са ефектом стаклене баште код оревног дрвета приказан је на графикону 7.24. Камиони су углавном намењени за превоз овог типа горива, те се због тога се враћају празни (рачуна се двострука транспортна дистанца).

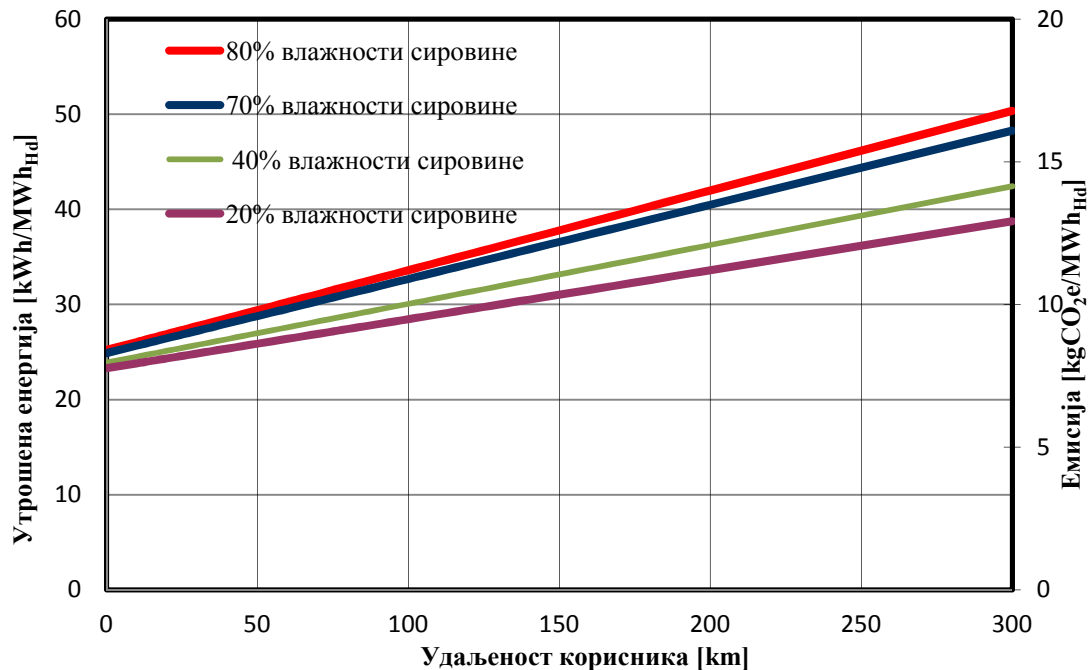


Графикон 7.24 Утицај транспорта на укупно уложену енергију и емисију  $CO_2e$  према нето калоријској вредности подмодела Огревно дрво



Графикон 7.24 показује да транспорт линеарно повећава утрошену енергију и емисију  $\text{CO}_2$ е за огревно дрво. Удаљеност потрошача значајно утиче на повећање, док влажност сировине мање утиче на пораст ових вредности.

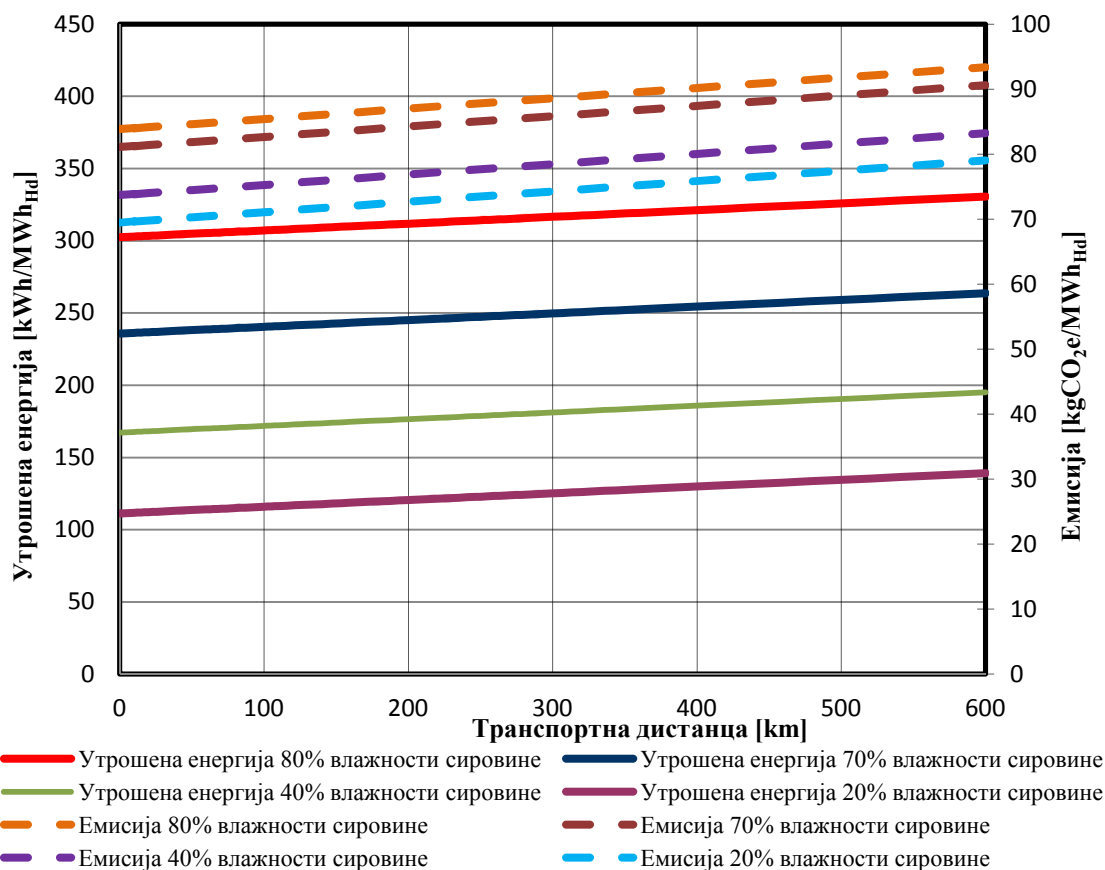
На графикону 7.25 приказан је утицај транспорта на повећање утрошене енергије и емисије  $\text{CO}_2$ е за *Сечка<sub>1</sub>*. Узет је пример једног подмодела јер транспорт утиче слично на све подмоделе производње сечке.



Графикон 7.25 Утицај транспорта на укупно уложену енергију и емисију  $\text{CO}_2$ е према нето калоријској вредности подмодела *Сечка<sub>1</sub>*

Транспорт једнако и линеарно утиче на повећање утрошене енергије и емисију гасова стаклене баште. За разлику од огревног дрвета, влажност транспортоване сечке утиче на промену ових вредности.

На графикону 7.26 приказан је утицај транспорта на повећање утрошене енергије и емисије  $\text{CO}_2$  код пелета. Ради јаснијег приказивања узете су вредности за подмодел *Пелет<sub>1</sub>* који има приближно исте вредности другом моделу. Транспорт сировине је урачунат у почетне вредности производње пелета, а његов утицај се може посматрати кроз утицаја транспорта на огревно дрво.



Графикон 7.26 Утицај транспорта на укупно уложену енергију и емисију CO<sub>2</sub>e према нето калоријској вредности подмодела Пелет<sub>1</sub>

Вредности које су приказане на графикону 7.26 приказују да транспорт пелета мање утиче од влажности сировине. Два су разлога за мањи утицај: први је да код пелета се рачуна транспорт само у једном смеру, док код огревног дрвета и сечке се рачуна и повратак у транспортној дистанци, а други је да су почетне вредности утрошене енергије и емисије CO<sub>2</sub>e високе и због тога је укупна промена ових вредности мања.

У општем моделу производње чврстих дрвених горива претпостављено је да горива имају исту влажност при транспорту и при коришћењу. Код пелета је таква претпоставка у потпуности тачна, док је код огревног дрвета и сечке она само делимично тачна. У Србији огревно дрво се не суши плански на шумском стоваришту, већ то стајање (самим тим и сушење) зависи пре свега од продаје. Зато се у Србији дешава да се транспортује сирово дрво док се природно сушење врши код корисника. Код транспорта огревног дрвета, које се рачуна по

запремини и овај утицај није велики. Код сечке превоз се рачуна по маси и ту могу да се појаве разлике у зависности од влажности дрвета.

Табела 7.1 приказује коефицијенте повећања потрошње енергије и емисије CO<sub>2</sub>е при транспорту влажнијег у односу на крајњу влажност дрвног горива.

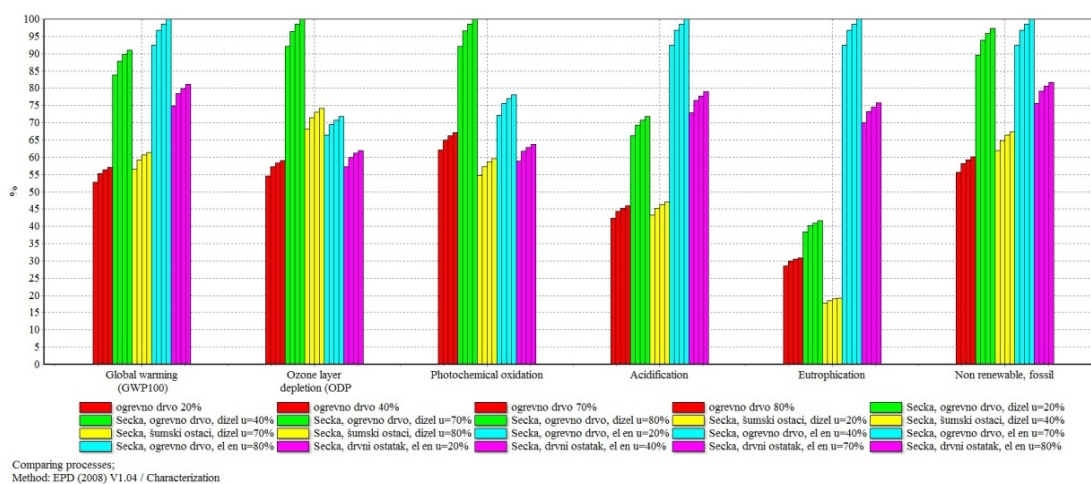
Табела 7.1 Коефицијент повећања вредности транспорта у односу на влажност

Крајња влажност	Транспорт [1tkm]				
	80	70	40	20	10
80	1				
70	1,058	1			
40	1,285	1,217	1		
20	1,420	1,342	1,105	1	
10	1,470	1,389	1,144	1,035	1

Из табеле 7.1 се може видети колико се процентуално повећава транспорт. Тако за пример чврстих дрвених горива који имају влажност 40%, уколико се транспортују при влажности од 70%, утрошена енергија и емисија CO<sub>2</sub>е се повећава за 21,7%, а при влажности од 80%, повећава се за 28,5%.

### 7.5 Поређење са резултатима добијеним коришћењем програма SimaPro

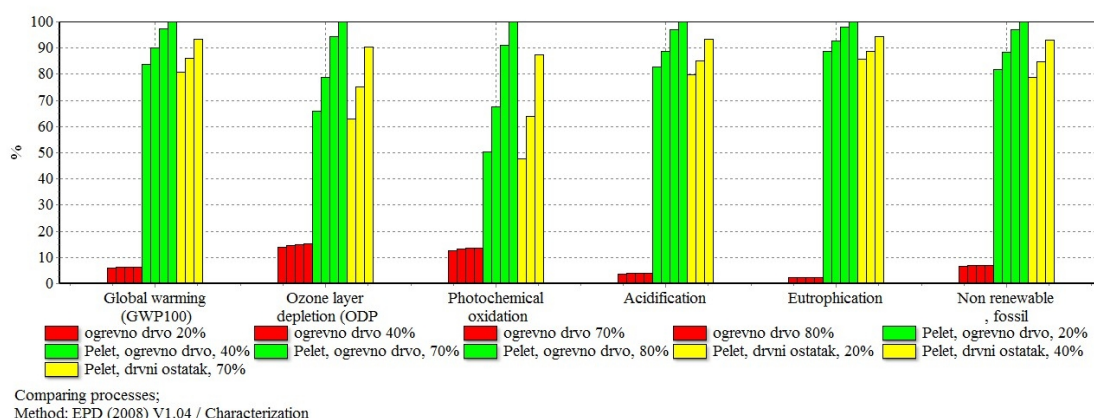
Утицај производње чврстих дрвених горива на животну средину прорачунато је уз помоћ програма SimaPro. Процентуални однос утицаја производње огревног дрвета и и свих врста сечке дат је на графикону 7.27. Однос је урађен по јединици енергије (MWh) доње топлотне моћи произведених дрвених горива.



Графикон 7.27 Утицај производње огревног дрвета и сечке на животну средину

Графикон 7.27 показује да производња сечке стационарним дробилицама од огревног дрвета има највеће скоро све индикаторе. За производњу огревног дрвета и сечке од шумских остатака може се рећи да имају најмањи негативни утицај на животну средину.

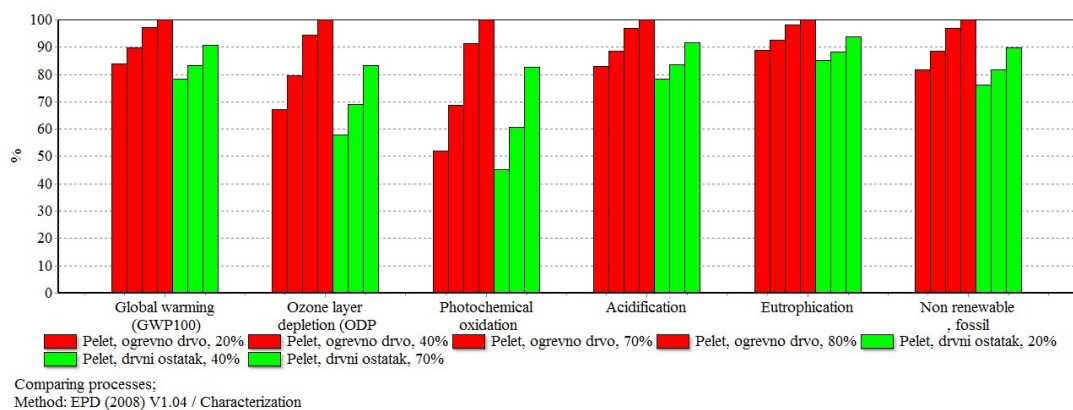
Пелет има знатно већи негативан утицај на животну средину у односу на огревно дрво и сечку и зато је приказан посебно на графикону 7.28, али је приказано са огревним дрветом како би се уочила разлика.



Графикон 7.28 Однос утицаја производње огревног дрвета и пелета на животну средину

Графикон 7.28 показује да пелет има знатно већи негативан утицај на животну средину у односу на огревно дрво и да се та разлика креће у опсегу од 5% до 15% у зависности од индикатора. Разлика између сировине од које се производи пелет је врло мала.

Треба напоменути да је поређење на графикону 7.28 урађено без транспорта огревног дрвета од шумског стоваришта до производње пелета. На графикону 7.29 је приказан однос са транспортом огревног дрвета.



Графикон 7.29 Утицај производње пелета на животну средину

Графикон 7.29 показује да транспорт сировине не утиче много на повећање индикатора утицаја на животну средину, односно да су вредности довољно велике да транспорт мање утиче процентуално на укупно повећање.

Из свега наведеног може се закључити да су вредности емисије гасова са ефектом стаклене баште приближно исти као и у прорачуну модела производње чврстих дрвних горива у Србији, а да уз помоћ програма SimaPro је могуће добити резултате и друге утицаје коришћења ових горива на животну средину.

## 8. Закључци

У дисертацији развијен је општи модел животног циклуса чврстих дрвних горива са одговарајућим подмоделима прилагођеним ситуацији у Србији. За потребе формирања модела квантификовани су најважнији еколошки и енергетски фактори који утичу на производњу чврстих дрвних горива и ефекте њиховог сагоревања:

1. Први фактор по важности је влажност дрвне сировине (биомасе) од кога се горива израђују. Почетна влажност букове шумске биомасе је најчешће 80% апсолутне влажности, а влажност букових дрвних остатака, који потичу из погона прераде дрвета, креће се у распону од 40% до 70%. Висока почетна влажност дрвне биомасе утиче на трошкове транспорта, време/трошкове сушења и ефикасност при сагоревању (уколико се одмах користи).
2. Други важан фактор је влажност дрвних горива. Код огревног дрвета и сечке почетна влажност (70% - 80%) се обично природним сушењем снижава на 20% до 40% апсолутне влажности. То има повољне ефекте на нето калоријску вредност дрвног горива и ефикасност сагоревања. Природно сушење захтева одговарајући велики простор и време. Вештачко сушење значајно скраћује време сушења и обавезно се користи у припреми дрвне сировине за производњу пелета. За то је потребно утрошити значајне количине топлотне енергије. Специфична потрошња топлотне енергије за испаравање 1 тоне воде креће се између 1.000 и 1.400 kWh у зависности од примењене технологије.
3. Трећи важан фактор је емисија гасова са ефектом стаклене баште у атмосферу (GWP) при производњи, транспорту и коришћењу чврстих дрвних горива.
4. Четврти фактор је транспорт који има одређеног утицаја на енергетске и еколошке ефекте коришћења чврстих дрвних горива. У камионском

транспорту (који је у Србији доминантан за ову врсту производа) користе се искључиво фосилна горива тако да је емисија гасова стаклене баште директно пропорционална транспортној дистанци. Камионски транспорт сировине и чврстих дрвених горива зависи од удаљености корисника и запремине и/или масе терета које се превози.

5. Пети фактор је врста уређаја за сагоревање. Ефикасност сагоревања у великој мери утиче на укупно искоришћење чврстих дрвених горива. Савремени уређаји могу да удвоструче ефикасност производње топлотне енергије у односу на застареле уређаје.

Анализом резултата добијених постављеним моделом са одговарајућим подмоделима може се закључити следеће:

*Огревно дрво* је најчешће коришћено дрвно гориво у Србији, пре свега у домаћинствима. Коришћењем подмодела *Огревно дрво* израчунато је да је за производњу једне тоне огревног дрвета потребно утрошити од 97,19 kWh до 145,95 kWh различитих видова енергије и да је емисија гасова са ефектом стаклене баште од 31,62 kgCO<sub>2e</sub> до 47,43 kgCO<sub>2e</sub> у зависности од влажности (видети табелу 6.3). Према овим показатељима огревно дрво је у предности у односу на друга два посматрана дрвна горива. Недостаци овог горива су: потребан велики простор за природно сушење (које дуго траје) и доста мануелног рада око манипулације и ложења.

*Дрвна сечка* се традиционално користи у дрвној индустрији за производњу топлотне енергије, а тек од скоро и као гориво у другим гранама индустрије у Србији. У раду су формирана четири различита подмодела за израчунавање потребне енергије за производњу и емисију CO<sub>2e</sub>. Прорачуном је добијено да је потребно од 124,09 kWh до 213,78 kWh енергије и да је емисија од 48,75 kgCO<sub>2e</sub> до 70,67 kgCO<sub>2e</sub> по тони произведене сечке у зависности од подмодела и влажности. Вредности су више у односу на огревно дрво због потрошње енергије за уситњавање дрвне сировине, али ниже у односу на дрвни пелет. Због гранулометријског састава, сечка је погоднија у односу на огревно дрво за манипулацију, транспорт и дозирање, што сечки даје предност за коришћење у индустријским котловима и даљинском грејању. Недостатак сечке је велика

запреминска маса што ограничава могућност да се ово гориво користи и у домаћинствима.

*Дрвени пелет* је гориво које је почело да се производи од 2006. године у Србији. За производњу једне тоне пелета потребно је више енергије. Потребна енергија за производњу и транспорт по подмоделима за једну тону пелета је од 581,69 kWh до 1526,93 kWh, док је емисија гасова са ефектом стаклене баште од 341,01 kgCO<sub>2e</sub> до 431,37 kgCO<sub>2e</sub>.

Највећи потрошачи енергије у производњи пелета су сушаре (топлотна енергија) и процес пелетирања (електрична енергија). Потребна топлотна енергија за процес сушења би се могла смањити претходним природним сушењем дрвне сировине (видети графикон 7.4). То смањење би износило 55% (са 794 kWh/t<sub>pellet</sub> на 359 kWh/t<sub>pellet</sub>; видети табелу 5.19) уколико би се улазна влажност сировине природним сушењем смањила са 70% на 40%. Смањење енергије потребне за сушење утицало би на смањење емисије CO<sub>2e</sub> за свега 9% (са 330 kgCO<sub>2e</sub>/t<sub>pellet</sub> на 300 kgCO<sub>2e</sub>/t<sub>pellet</sub>; видети табелу 6.23) због мале емисије дрвета које се користи као гориво.

Пелет има уједначена физичка својства, односно уједначену влажност и гранулометријски састав, што га чини погодним за коришћење у аутоматизованим пећима и котловима. Уређаји који користе пелет у Србији су савремене изведбе и имају велику ефикасност коришћења горива. Потрошња сировине за производњу пелета за један MWh топлотне енергије је мања него за огревно дрво, тако да са овог становишта има оправдања за производњу пелета од огревног дрвета. Из наведених карактеристика може се закључити да пелет треба користити у домаћинствима као замену за фосилна горива и то у урбаним срединама где нема простора за складиштење и природно сушење огревног дрвета или сечке.

*Когенерација* у производњи пелета могла би значајно да смањи емисију CO<sub>2e</sub> (са 419 kgCO<sub>2e</sub>/t<sub>pellet</sub> на 150 kgCO<sub>2e</sub>/t<sub>pellet</sub>, влажност сировине 70%; видети табелу 6.24 и графикон 7.22). Увођење когенеративног постројења у производњу пелета може делимично или у потпуности да супституише електричну енергију из мреже када је ограничење производња топлотне енергије потребне за сушење сировине (видети графикон 7.21). Код когенерације са гасним мотором могућа је потпуна



замена електричне енергије. Емисија гасова са ефектом стаклене баште за утрошену електричну енергију се смањује за 96,5% (видети графикон 7.22). Количина сировине се у овом случају повећава за 12% за потрошену електричну енергију за производњу пелета, док се за електричну енергију која се продаје додаје 11% сировине (укупно 23% сировине се користи за производњу електричне енергије; видети графикон 7.23). Код осталих технологија когенерације производња електричне енергије не може у потпуности да замени електричну енергију из мреже уколико нема других потрошача топлотне енергије. Остале когенерације могу да учествују са 22% (парна турбина), са 35% (Стирлинг мотор), са 37% (парни мотор) и са 44% (ORC турбина) у снабдевању електричном енергијом погона за производњу и у емисији гасова са ефектом стаклене баште. За посматрани подмодел *Пелет<sub>1</sub>* когенерације смањују емисију CO<sub>2e</sub> за 23% (Стирлинг мотор), за 30% (ORC турбине), за 24% (парни мотор) и за 14% (парне турбине) у односу на укупну емисију које пелет има код корисника. Удео производње електричне енергије у дрвној сировини код свих технологија је око 3%. Из ових података може се закључити да према енергетским и еколошким факторима је оправдано коришћење когенерације у производњи пелета, нарочито у Србији због великог оптерећења електричне енергије из мреже емисијом гасова се ефектом стаклене баште.

Енергетска ефикасност производње (са транспортом) и коришћења чврстих дрвних горива приказана је преко показатеља EROI и NEROI. За постављени модел производње и транспорта огревног дрвета вредност EROI је од 26,50 до 28,67, док је енергетска ефикасност коришћења у кућним пећима и котловима NEROI од 12,45 до 15,77. Вредности показатеља EROI за дрвну сечку су од 14,21 до 27,56, док су вредности NEROI од 11,24 до 21,38. У случају када се дрвна сечка користи за производњу топлотне енергије у погонима дрвне индустрије NEROI има вредност од 42,44 до 45,06, због недостатка транспорта. Вредности показатеља EROI за дрвни пелет су од 3,03 до 7,94, док су вредности NEROI од 1,92 до 6,41. Поређећи вредности EROI и NEROI по врсти чврстог дрвног горива, може се закључити да огревно дрво и сечка имају приближно сличне вредности, док код пелета су те вредности вишеструко ниже. Ниске вредности код пелета

настају због потрошње велике количине топлотне и електричне енергије у процесу пелетирања.

Потрошња сировине по јединици произведене топлотне енергије је показатељ који одређује ефикасност коришћења ресурса, што је у овом случају дрвна биомаса. Расположиве количине дрвне биомасе су значајан извор енергије у Србији. Ова количина користи се на одржив али не и на ефикасан начин. Бољим коришћењем чврстих дрвних горива могуће је повећати ефикасност коришћења расположивих количина.

Код коришћења огревног у кућним пећима и котловима, сезонска ефикасност коришћења горива је ниска и потрошња сировине је од  $0,619 \text{ m}^3/\text{MWh}_{\text{toplote}}$  до  $0,784 \text{ m}^3/\text{MWh}_{\text{toplote}}$ , односно емисија гасова са ефектом стаклене баште је од  $33 \text{ kgCO}_2\text{e}/\text{MWh}$  до  $41 \text{ kgCO}_2\text{e}/\text{MWh}$  у зависности од влажности огревног дрвета (видети табелу 6.30). Дрвна сечка се користи у индустријским котловима са високим степеном сезонске ефикасности. Потрошња дрвне сировине по јединици произведене топлотне енергије при сагоревању сечке у индустријским котловима креће се од  $0,420 \text{ m}^3/\text{MWh}_{\text{toplote}}$  до  $0,455 \text{ m}^3/\text{MWh}_{\text{toplote}}$ , односно емисија гасова са ефектом стаклене баште је од  $18 \text{ kgCO}_2\text{e}/\text{MWh}$  до  $40 \text{ kgCO}_2\text{e}/\text{MWh}$  у зависности од влажности сечке (видети табелу 6.32). Дрвни пелет се користи у кућним пећима и котловима са високим степеном сезонске ефикасности коришћења горива. Потрошња сировине при коришћењу пелета је од  $0,427 \text{ m}^3/\text{MWh}_{\text{toplote}}$  до  $0,659 \text{ m}^3/\text{MWh}_{\text{toplote}}$ , односно емисија гасова са ефектом стаклене баште је од  $101 \text{ kgCO}_2\text{e}/\text{MWh}$  до  $156 \text{ kgCO}_2\text{e}/\text{MWh}$  у зависности од влажности сировине (видети табеле 6.34 и 6.36).

На основу приказаних анализа карактеристика посматраних чврстих дрвних горива могуће је дати препоруке за боље коришћење расположиве дрвне биомасе из шуме и дрвних остатака из прераде дрвета:

- Већа примена природног сушења у припреми сировине за производњу чврстих дрвних горива.
- Смањење транспортних дистанци до крајњег корисника.
- Промена структуре производње чврстих дрвних горива у корист повећања учешћа дрвне сечке и пелета.

- Повећање употребе дрвне сечке у индустријским котловима и у производњи електричне енергије кроз когенерацију.
- Увођење когенерације у процес производње пелета (код сушења сировине).
- Повећање коришћења пелета у домаћинствима у градским срединама за грејање као замена фосилним горивима (угља и лож уља) и електричне енергије.
- Замена огревног дрвета дрвним пелетима у градским домаћинствима.

## 9. Литература

1. An Pa, A. (2010), Development of British Columbia Wood Pellet Life Cycle Inventory and its Utilization in the Evaluation of Domestic Pellet Applications, Master Thesis, The University of British Columbia, p 129.
2. Bates J., Simon H.(2009) Carbon factor for wood fuels for the supplier obligation, *Report to Defra, ED01858010*, Issue Number 2.
3. Binkley CS, Van Kooten GC.(1994) Integrating climatic change and forests: economic and ecologic assessments. *Climatic change*, 28:91–110.
4. Buchanan AH, Levine SB. (1999) Wood-based building materials and atmospheric carbon emissions. *Environmental Science & Policy*, 427–37. 2(6).
5. Burschel P, Kürsten E, Larson BC.(1993) Die Rolle von Wald und Forstwirtschaft im Kohlenstoffhaushalt—Eine Betrachtung für die Bundesrepublik Deutschland. *Forstliche Forschungsberichte*, München, 126.
6. Cherubini F., Bird N., Cowie A., Jungmeier G.(2009) Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 53 434-447.
7. Cherubini F., Strømman A.H.(2011) Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges, *Bioresource Technology*, Vol. 102, pp 437–451.
8. CORRIM (1976) Renewable resources for industrial materials, Committee on Renewable Resources for Industrial Materials, Washington DC, USA, National Academy of Sciences.
9. Danon, G., Andelic, M. Glavonjic, B., Kadovic, R., Furtula, M. (2010) Wood biomass for Energy in Montenegro, *Thermal Science*, Vol. 14, No. 3, pp. 783-798.
10. Danon G., Furtula M., Mandić M. (2012) Possibilities of implementation of CHP (combined heat and power) in the wood industry in Serbia, *Energy*, Volume 48, Issue 1, December 2012, Pages 169–176.
11. Dixon RK, Brown S., Houghton A., Solomon M., Trexler C., Wisniewski J.(1994) Carbon pools and flux of global forest ecosystems, *Science*;263:185–190.
12. Ellul D.(2012) UNECE/FAO Joint Wood Energy Enquiry, Energy Community, Renewable Energy Task Force, 8th meeting, Vienna.

13. EFI (2011) Le Net E., Bajric F., Voetter D., Berg S., Anderson G., Roux S., Identification of existing transport methods and alternative methods or new approaches with data about costs, labour input and energy consumption, European Forest Institute, Finland.
14. Ecoinvent (2014) Database search; <https://ecoquery.ecoinvent.org>
15. FAO (2004) UBET — Unified Bioenergy Energy Terminology, Forestry Department.
16. FAO (2005), Global Forest Resources Assessment 2005 - Progress towards sustainable forest management. FAO Forestry Paper 147. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
17. Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D.W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D.C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz and R. Van Dorland (2007) Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
18. Furtula M., Danon G., Bajić V. (2009) Potential of Wood Biomass for Energy from Forestry and Wood Industry in Serbia, Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Conference, Hamburg, str. 315-319.
19. Furtula M., Mandić M., Danon G., Bajić V. (2010) The Possibility of Substitution of Fossil Fuel with Wood Biomass in the National Parks Kopaonik and Tara, Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Conference, Lyon, str. 283-287.
20. Furtula, M., Mandic, M., Danon, G.(2011) The Possibility of Using CHP in Sawmills in Serbia, Proceedings of 19<sup>th</sup> European Biomass Conference, Berlin.
21. Glavonjić B.(2011b) Consumption of Wood Fuels in Households in Serbia – Present State and Possible Contribution to the Climate Change Mitigation, *Thermal Science*, Vol. 15, No. 3, pp. 571-585.
22. Glavonjić B., Oblak L.(2011a) Consumption of Woody Biomass in Industry, Commercial and Public Facilities in Serbia – Present State and Possible Contribution to the Share of Renewable Sources in Final Energy Consumption, *Thermal Science*, Vol. 16, No. 1, pp. 7-19.
23. Glavonjić B. (2014) Wood energy market in Serbia, GIZ
24. Hall A., (2007) Combustion Theory and Biomass Burner Theechnology, Biomass Energy Centre.

25. IEA (2010a) Energy Balances of Non-OECD Countries. International Energy Agency, Paris, France.
26. IEA (1995) International Energy Agency, Folder of Task 25 Greenhouse Gas Balances of Bioenergy Systems, <http://www.joanneumj.ac.at/iea-bioenergy-task25>
27. IEA (2011a) Renewables Information 2011, OECD/IEA, Paris.
28. IEA (2012a), Key World Energy Statistics, International Energy Agency, Paris, France,
29. IEA (2012b), CO2 Emissions from Fuel Combustion, International Energy Agency, Paris, France,
30. IEA (2012c) Technology Roadmap - Bioenergy for Heat and Power, OECD/IEA, Paris.
31. IPCC (2001) Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.
32. IPCC (2011a) Moomaw, W., F. Yamba, M. Kamimoto, L. Maurice, J. Nyboer, K. Urama, T. Weir, 2011: Introduction. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlomer, C.von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
33. IPCC (2011b), Chum, H., A. Faaij, J. Moreira, G. Berndes, P. Dhamija, H. Dong, B. Gabrielle, A. Goss Eng, W. Lucht, M. Mapako, O. Masera Cerutti, T. McIntyre, T. Minowa, K. Pingoud, 2011: Bioenergy. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlomer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
34. Iwaoka, M. et al (2010) Energy Consumption of Small Scale Production Systems for Fuel Wood Chips, Proceedings of 2010 COFE: 33rd Annual Meeting of the Council on Forest Engineering, Auburn, AL: June 6-9, pp 1-7, 2010.
35. Jungmeier.(2000) Greenhouse Gas Balance of bioenergy systems - A Comparison of Bioenergy with Fossil Energy Systems, Proceedings of the Workshop: Bioenergy for mitigation of CO2 emissions: the power, transportation, and industrial sectors, IEA Bioenergy: T25..

36. Kiehne H.(2008) Biomass fired Combined Heat and Power Plants (CHP) with Organic Rankine Cycle (ORC) in Europe, Energy from Biomass and Waste, Pittsburgh.
37. Lasselsberger L.(2001) Označevanje kvalitete in okoljsko testiranje manjih kotlov na lesno biomaso v Avstriji, Landtechnische Forschung.
38. Lindholm E.L.(2010) Energy Use and Environmental Impact of Roundwood and Forest Fuel Production in Sweden, Doctoral Thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala.
39. LOT 15 (2009) Solid fuel small combustion instalations, Preparatory Studies for Eco-design Requirements of EuPs (II).
40. MacLean Life, H., McKechnie, J., Zhang, Y.(2009) Cycle Assessment of Wood Pellet Use in Ontario's Nanticoke and Atikokan Generating Stations, University of Toronto.
41. Marland, G., Marland, S.(1992) Should We Store Carbon in Trees?, Natural Sinks of CO<sub>2</sub>, pp 181-195.
42. Milisavljević, V. at al (2009) Consumption of Coal in Serbia and CO<sub>2</sub> Emissions Related to its Combustion, 14th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia, Soko banja, pp 1-7.
43. Mortimer N., Hatto C., Jenkins G.,Mwabonje O.(2011) Research to support the review of Renewable Obligation Scotland and impact of the Renewable Heat Incentive, Part 2: Biomass Thresholds for Electricity, CHP and Heat Generation, North Energy Associates Limited, Available from:  
[http://www.forestry.gov.uk/pdf/reviewofRenewableObligationScotlandandimpactoftheRHIAppendices.pdf/\\$FILE/reviewofRenewableObligationScotlandandimpactoftheRHIAppendices.pdf](http://www.forestry.gov.uk/pdf/reviewofRenewableObligationScotlandandimpactoftheRHIAppendices.pdf/$FILE/reviewofRenewableObligationScotlandandimpactoftheRHIAppendices.pdf)
44. Nabuurs, G.J., O. Masera, K. Andrasko, P. Benitez-Ponce, R. Boer, M. Dutschke, E. Elsiddig, J. Ford-Robertson, P. rumhoff, T. Karjalainen, O. Krankina, W.A. Kurz, M. Matsumoto, W. Oyhantcabal, N.H. Ravindranath, M.J. Sanz Sanchez, X. Zhang, Forestry chapter 9. In: Metz, B., et al. (Eds.) (2007) Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
45. Nussbaumer T., Oser M.(2004) Evaluation of Biomass Combustion based Energy Systems by Cumulative Energy Demand and Energy Yield Coefficient, International Energy Agency IEA Bioenergy Task 32 and Swiss Federal Office of Energy, Verenum press, Version 1.0, Zurich.

46. Oberberger I, Thek G. (2008) Cost Assessment of Selected Decentralised CHP Applications Based on Biomass Combustion and Biomass Gasification: Proceedings of 16th European Biomass Conference; Valencia, Spain, 2273 – 2283.
47. Oberberger, I., Thek, G.(2010) Pellet Handbook, Earthscan Ltd.
48. Popadić R., Šoškić B., Milić G., Todorović N., Furtula M. (2014) Influence of the Sawing Method on Yield of Beech Logs with Red Heartwood, *Drvna industrija* br. 65, str. 35-42, Zagreb.
49. Popović Z., Mirić M., Todorović N. (2003). Macroscopic characteristics of beech wood from coppice forests. Proceedings. International scientific conference "50 years University of forestry", 1 - 2 april, Sofia, Bulgaria, pp. 88 – 93.
50. Risović S., Đukić I., Vučković K.(2008) Energy Analysis of Pellets Made of Wood Residues, *Croatian journal for engineering*, Vol 29, No. 1.
51. Sandilands, J., Nebel, B., Hodgson, C, Hall, P.(2011) Greenhouse Gas emissions of the Forestry Sector in New Zealand, Prepared for the Ministry of Agriculture and Forestry, SCION. P 42.
52. Schlamadinger B, Bohlin MJAF, Gustavsson L, Jungmeier G, Marland G, Pingoud K, et al. (1997) Towards a standard methodology for greenhouse gas balances of bioenergy systems in comparison with fossil energy systems. *Biomass Bioenergy*;13:359–75.
53. Schwarz M., Heckmann M., Lasselsberger L., Haslinger W. (2011) Determination of annual efficiency and emission factors of small-scale biomass boiler, Central European Biomass Conference, Graz.
54. SEEI (2014) <http://www.see-institute.org/srpski/energetski-profil-rs>
55. Shvidenko, A., Barber, V. & Persson, R.. (2005) Forest and Woodland Systems. In: Hassan, R., et al. (Eds.) *Ecosystems and human well-being: Current State and Trends*, Vol. 1: The millennium ecosystem assessment series. Washington: Island Press.
56. SSET (2012) - Spilling steam engines and turbines. Available from: <http://www.spilling.de/english/produkte.php>; January 2012.
57. Staffell, I. (2013) The Energy and Fuel Data Sheet W1P1 – Revision 1, University of Birmingham, UK, 2011. Retrived 15.04.2013  
[http://www.clavertonenergy.com/wpcontent/uploads/2012/08/the\\_energy\\_and\\_fuel\\_data\\_sheet.pdf](http://www.clavertonenergy.com/wpcontent/uploads/2012/08/the_energy_and_fuel_data_sheet.pdf)
58. Stassen H.E.M, Knoef H.A.M.(2001) Small scale gasification systems, Biomass Technology Group BV.



59. Tampier, M., D. Smith, E. Bibeau and P.A. Beauchemin. (2005) Identifying environmentally preferable uses for biomass resources. Stage 2 Report: Life-cycle emission reduction benefits of selected feedstock-to-product threads. Natural Resources Canada and National Research Council Canada. 132 p.
60. TCST (2008) – Anon, Technology Characterization: Steam Turbines:  
[http://epa.gov/chp/documents/catalog\\_chptech\\_steam\\_turbines.pdf](http://epa.gov/chp/documents/catalog_chptech_steam_turbines.pdf)
61. Thek G, Obernberger I. (2004) Wood pellet production costs under Austrian and in comparison to Swedish framework conditions. Biomass and Bioenergy, 27: 671–693.
62. Thek G., Obernberger I., (2009) Wood pellet production under Austrian framework condition, Proceedings of the 17<sup>th</sup> European Biomass Conference, Hamburg.
63. UNDP (2007) Стимулисање обновљивих извора енергије на локалном нивоу, Иницијални пројектни документ, доступан на (мај 2014.):  
[http://www.drvnabiomasa.org.rs/PagesRS/www.drvnabiomasa.org.rs/userfiles/files/UNDP\\_Inicijalni\\_plan\\_rev\\_09092008.pdf](http://www.drvnabiomasa.org.rs/PagesRS/www.drvnabiomasa.org.rs/userfiles/files/UNDP_Inicijalni_plan_rev_09092008.pdf)
64. UNDP (2014) Смјернице за управљање и одржавање термо-енергетских система у јавним објектима, документ доступан на (јун 2014):  
[http://www.ba.undp.org/content/dam/bosnia\\_and\\_herzegovina/docs/Research&Publications/Energy\\_and\\_Environment/Smjernice\\_za\\_upravljanje\\_i\\_odrzavanje\\_thermo-energetskih\\_sistema\\_u\\_javnim\\_objektima.pdf](http://www.ba.undp.org/content/dam/bosnia_and_herzegovina/docs/Research&Publications/Energy_and_Environment/Smjernice_za_upravljanje_i_odrzavanje_thermo-energetskih_sistema_u_javnim_objektima.pdf)
65. Uran V. (2006) Optimization system for combined heat and electricity production in the wood-processing industry, Energy, Volume 31, Issue 14, Pages 2996-3016, USA.
66. Werner F., Althaus H.-J., Künniger T., Richter K. and Jungbluth N.(2007) Life Cycle Inventories of Wood as Fuel and Construction Material. Final report ecoinvent 2000 No. 9., EMPA Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH.
67. Банковић С., Медаревић М., Пантић Д., Петровић Н. (2009) Национална инвентура шума Републике Србије: Шумски фонд Републике Србије, монографија, Министарство пољопривреде, шумарства и водопривреде Републике Србије, Управа за шуме, Београд
68. Билтен (2013) Шумарство у Републици Србији 2012., Републички завод за статистику, Београд.

69. Данон Г., Дедић А. (1995) Валоризација отпадака дрвета из шумарства и индустријске прераде, део монографије: Стевановић-Јанежић Т., Колин Б., Јајић М., Данон Г., Унапређење технологија дрвета у корелацији са својствима хемијских конституената дрвета, Шумарски факултет, Београд.
70. Данон Г., Ранисављевић Д. (1992) Анализа структуре дрвног отпатка у Србији, Гласник Шумарског факултета, бр. 74, стр. 229-237, Београд.
71. Гаврић М., Влајчић А., Чеперковић Б. (2009) Зелена књига електропривреде Србије, ЈП Електропривреда Србије.
72. Главоњић Б. (2013) Тржиште дрвне биомасе у Србији, досадашњи развој, ограничења и перспективе, Конференција о биомаси, Привредна комора Србије, Београд.
73. Јовановић В. (2000) Дендрологија, Универзитетска штампа, Београд
74. Кнежевић Н., Фуртула М., Данон Г., Бајић В. (2010) Могућност замене фосилних горива дрвном биомасом у туристичким објектима у националном парку Тара, Прерада дрвета, бр. 29, Београд, стр. 27-33.
75. НАПОИЕ (2008) - Национални акциони план за обновљиве изворе енергије, Република Србија, Министарство енергетике, развоја и заштите животне средине, Београд
76. Николић, С., Јездић (2003) Технички стандарди и нормативи у шумарству, ЈП "Србијашуме", Београд, п 159.
77. Ока С. (2010) Енергетска ефикасност и обновљиви извори енергије у стратегији развоја енергетике Србије до 2020., радионица: Изградња капацитета Републике Србије у области стратешког планирања у енергетском сектору, 20.-21. мај 2010., Београд
78. Павић Ј. (1965) Утицај запреминске тежине и грешака дрвета на топлотну моћ буковине, докторска дисертација, Шумарски факултет, Београд.
79. ПНАПОИЕ (2012) - Поједностављени национални акциони план за обновљиве изворе енергије, Република Србија, Министарство енергетике, развоја и заштите животне средине, Београд
80. Стевановић-Чарапина Х., Јововић А., Степанов Ј. (2010) Оцена животног циклуса LCA (Life Cycle Assessment) као инструмент у стратешком планирању управљања отпадом, монографија.

81. Тодоровић Н. (2006) Аксијално утезање дрвета букве (*Fagus moesiaca* C.), храста китњака (*Quercus sessiliflora* S.) и смрче (*Picea excelsa* L.), магистарски рад, Шумарски факултет, Београд
82. Фуртула М., Данон Г., Бајић В. (2009) Супституција фосилних горива дрвном биомасом у планинским туристичким центрима- пример Гоч (Добре Воде), Енергија, економија, екологија, бр 11, 2009, стр. 311-315, Београд
83. Шошкић Б., Поповић З. (1992) Анализа метода запреминског и масеног одређивања дрвета, Шумарство бр. 1, Шумарски факултет, Београд, стр 35-45.

## **Биографија**

### **Младен Фуртула**

Рођен је 9.6.1976. године у Београду. Основну школу „Јован Стерија Поповић“ у Београду завршио је 1991. године, а 1995. године је завршио IX гимназију “ Михајло Петровић Алас“, такође у Београду.

Школске 1995/96 године је уписао Шумарски факултет, Универзитета у Београду и завршио га 2002. године са просечном оценом 8,15. Школске 2002/03 године уписао је постдипломске студије, а 2003. године је почео да ради на Шумарском факултету као асистент-приправник. Школске 2007/08 је прешао на докторске студије, а 2011. године је прешао у звање асистента.

Пре академске каријере радио је у струци следеће послове:

- 1999/2000. Производња сеченог фурнира и слојевитих плоча као представник фирме ИКЕА Raw Material Trading,
- 2001/2002. Трговина резаном грађом за фирму Делта М, Београд,
- 2002/2003. Трговина резаном грађом за фирму СИМПО, Врање.

Поред наведених послова, као студент је преко студентске организације IAESTE био на стручној пракси 1999. године у фирми Gylensvaan Moebler, Шведска.

Прилог 1.

## Изјава о ауторству

Потписани Младен А. Фуртула

број уписа: 2007/2

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

„Утицај еколошких и енергетских фактора на коришћење чврстих  
дрвних горива у Србији“

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 8. априла 2014. године

---

Прилог 2.

## **Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада**

Име и презиме: аутора: Младен А. Фуртула

Број уписа: 2007/2

Студијски програм: Докторске студије – Машине и уређаји у преради дрвета

Наслов рада: „Утицај еколошких и енергетских фактора на коришћење чврстих дрвних  
горива у Србији“

Ментор: проф. Др Градимир Данон

Потписани Младен Фуртула

изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

**Потпис**

**докторанда**

У Београду, 8. априла 2014. године

---

Прилог 3.

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

„Утицај еколошких и енергетских фактора на коришћење чврстих дрвних горива у Србији“

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

**Потпис докторанда**

У Београду, 8. априла 2014. године

---