

**Универзитет у Београду
Машински факултет**

Едиб М. Дедеић

**Теоријско и експериментално
истраживање процеса сушења
биолошких материјала коришћењем
соларне енергије**

Докторска дисертација

Београд, 2012.

**University of Belgrade
Faculty of Mechanical Engineering**

Едиб М. Дедеић

**Theoretical and experimental
investigation of the drying process
biological materials using solar energy**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2012.

Комисија за преглед и одбрану:

Ментор: Проф. др Радивоје М. Топић, Машински факултет
Универзитета у Београду

Чланови Комисије:

Проф. др Мирко С. Коматина, Машински факултет
Универзитета у Београду

Доцент др Ненад Љ. Ћупрић, Шумарски факултет
Универзитета у Београду

Датум одбране: .

Теоријско и експериментално истраживање процеса сушења биолошких материјала коришћењем соларне енергије

Предговор

Експериментална истраживања потребна да се оствари циљ и хипотеза овог рада су обављена на модулу покретне, универзалне, еколошке, коморне, конвективне, индиректне, активне, соларне сушаре. Сушење влажних материјала и производа је одувек било од велике важности ради обезбеђења и задовољења различитих потреба (хране за људе, итд.). Сушење Сунчевим зрачењем (соларно сушење) је добро познат начин директног природног сушења ради обезбеђења хране, којим се смањује влажност производа до вредности, која обезбеђује сигурно складиштење. Међутим материјал који се суши, незаштићен од кише, прљавштине коју носи ветар, прашине и који је загађен од инсеката, глодара и других животиња, може бити озбиљно деградиран, тако да понекад, ако се ради о прехранбеним производима, храна постане нејестива. Резултујући губитак квалитетних компонената у осушеним производима може имати супротне економске ефекте на домаћем и међународном тржишту. Алтернатива овом традиционалном начину сушења може да буде индиректни начин соларног сушења, који подразумева коришћење Сунчеве енергије за припрему агенса сушења који се затим користи у различитим типовима и решењима конвективних сушара, који задовољава неколико услова: бољи квалитет производа, коришћење јефтине енергије, што значи и економску оправданост, заштиту околине итд. Експериментално одређивање времена трајања процеса сушења је везано за материјал који се суши и услове при којима се изводи одређени процес (експеримент). Одређивање времена трајања процеса сушења за друге услове процеса мора да се врши аналитички и решава се посебно за први период а посебно за други период сушења. У принципу се полази од израза за брзину сушења материјала. Карактер одвијања процеса сушења најпотпуније се описује кинетиком процеса сушења што значи кривом сушења (у координатама апсолутна влажност материјала – време сушења), кривом брзине сушења (у координатама брзина сушења материјала – апсолутна влажност материјала) и температурном кривом (у координатама температура материјала – време сушења), што представља и предмет истраживања овог рада. Упоређење рада сушара различитих капацитета није могуће на основу промене масе материјала (издвојене влаге) у процесу

сушења. То је могуће на основу криве сушења као елемента кинетике сушења. Квантитативне законитости процеса сушења је могуће одредити на основу методе условне брзине процеса сушења, за чије дефинисање су неопходни експериментални резултати и која се дефинише као однос брзине процеса сушења при датој влажности материјала (датом тренутку) N_t и максималне брзине сушења у првом периоду сушења (периоду константне брзине сушења) N_L . Метода условне (карактеристичне) брзине сушења даје могућност да се на основу анализе експерименталних резултата процеса сушења успостави веза између брзине процеса сушења и влажности материјала и да се дефинише релативно једноставан израз за прорачун времена трајања процеса сушења, као и других параметара даљим развојем израза за брзину процеса сушења, што је од изузетне важности при пројектовању решења за сушење.

Београд, ..10.09.2012,

Едиб М. Дедеић

Теоријско и експериментално истраживање процеса сушења биолошких материјала коришћењем соларне енергије

Резиме

Када се суше производи, често се наилази на низ тешкоћа: прва тешкоћа долази од чињенице да сваки производ има своју кинетику сушења. Друга тешкоћа је техничка и везана је за дефинисање експеримента. Од изузетне важности је и контрола за време сушења већине производа за исхрану.

У раду је дат преглед релевантне литературе у циљу упознавања са истраживањима везаним за ефикасност пријемника соларне енергије и извођења конвективног процеса сушења биолошких материјала у танком слоју, као и постојећим решењима из ове области. За карактеристична решења постројења за сушење су дати и дефинисани одговарајући биланси.

У циљу разумевања експерименталног дела истраживања у раду је дат приказ концепције решења покретне, универзалне, еколошке, коморне, конвективне, индиректне, активне соларне сушаре, чије основне карактеристике су могућност праћења привидне путање кретања Сунца и праћење положаја, угла Сунца. Веома важна карактеристика решења је и потпуна енергетска независност, пошто се Сунчево зрачење користи и за процес сушења, за припрему агенса сушења у оригиналном решењу пријемника Сунчеве енергије и за директно добијање електричне енергије за кретање агенса сушења, што се постиже коришћењем пријемника за директно претварање Сунчеве енергије у електричну. Ради се о савременој технологији која има изузетан значај са аспекта одрживог развоја и енергетске ефикасности.

Да би се остварио циљ и хипотеза истраживања:

- проучи кинетика процеса сушења спанаћа у соларној, коморној, конвективној, покретној, индиректној, еколошкој, активној сушари,
- одреди утицај параметара агенса сушења и материјала, који се суши на кинетику процеса сушења спанаћа,
- одреди карактеристична крива брзине процеса сушења (ККС) и
- упореде експерименталне криве сушења са математичким моделима из литературе
- дефинише математички модел и одреде вредности ефективне дифузивности спанаћа.

неопходна су одговарајућа експериментална истраживања.

Експеримент је изведен на модулу покретне, универзалне, еколошке, коморне, конвективне, индиректне, активне соларне сушаре.

Експериментални резултати су омогућили дефинисање кинетике сушења, анализу утицаја параметара агенса сушења и материјала на кинетику сушења и дефинисање карактеристичних влажности и карактеристичне криве брзине сушења.

Математички модел карактеристичне брзине сушења је после утврђивања најповољнијег модела, а то је модел Midilli & Кусика, послужио за дефинисање аналитичког израза за карактеристичну брзину сушења и одређивање ефективне дифузивности коришћењем другог Fick's закона и решавањем истог за случај процеса сушења у танком слоју.

Даља истраживања би се могла одвијати у извођењу експерименталних резултата у циљу потврђивања дефинисаних модела билансирања решења покретне, универзалне, еколошке, коморне, конвективне, индиректне, активне соларне сушаре.

Кључне речи: сушара, кинетика сушења, Сунчево зрачење

Научна област: Машинство

Ужа научна област: Термодифузиони процеси – сушење

УДК: 631.365

Theoretical and experimental investigation of the drying Process biological materials using solar energy

Summary

When products are dried, often encountered in a number of difficulties: the first difficulty comes from the fact that each product has its own drying kinetics. The second difficulty is technical and is related to the definition of the experiment. Of utmost importance is the control for the drying of most food products. The paper presents a review of relevant literature in order to learn about research into the effectiveness of solar energy receiver and perform convective drying process of biological materials in a thin layer, and existing solutions in this field. For the characteristic drying plant solutions are given and defined the appropriate balance.

In order to understand the experimental part of the research paper presents the concept of mobile solutions, universal, ecological, chamber, convective, indirect, active solar dryers, whose main characteristics are the ability to track the apparent motion paths and tracking the position of the sun, the angle of the sun. An important feature of the solution and complete energy independence, since the solar radiation is used for the drying process, drying agents for the preparation of the original solution set for solar energy and directly generate electricity for the movement of drying agent, which is achieved by using the receiver for direct conversion of solar energy into electricity. It is a modern technology that is extremely significant in terms of sustainable development and energy efficiency.

To achieve the goal and hypothesis of the research:

- study the kinetics of spinach in a solar drying, chamber, convective, mobile, indirect, ecological, active drying,
- determine the impact parameters and drying agent material, which dries on the kinetics of drying of spinach,
- determine the characteristic curve of drying rate (CBC) and
- compare the experimental drying curves with mathematical models from the literature
- defines the mathematical model and determine the value of the effective diffusivity of spinach.

requires the corresponding experimental studies.

The experiment was performed on the mobile module, universal, ecological, chamber, convective, indirect, active solar dryers.

The experimental results made it possible to define the kinetics of drying, impact analysis, the parameters of drying agent and material on the kinetics of drying and the moisture characteristic and defining characteristic drying rate curve.

A mathematical model of the characteristic drying rate after determining the best model, a model that's Midilly & Kucuk, served to define the analytical expression for the characteristic speed of drying and the determination of the effective diffusivity using the second Fick's law and solving the same in case of drying in a thin layer.

Further research could be done in the performance of the experimental results to verify the model defined by balancing solutions mobile, universal, ecological, chamber, convective, indirect, active solar dryers.

Keywords: dryer, drying kinetics, solar radiation

Scientific field: Mechanical Engineering

Scientific subdiscipline: Heat mass transfer – drying

UDK: 631.365

С а д р ж а ј

Увод	1
1. Преглед истраживања и решења за сушење соларном енергијом	4
1.1. Преглед истраживања процеса сушења	
1.2. Соларна енергија и решења за сушење коришћењем соларне енергије	
1.2.1. Карактеристике соларне енергије	
1.2.2. Решења за сушење коришћењем соларне енергије	
1.2.2.1. Пријемници соларне енергије	
1.2.2.2. Врсте соларних сушара и приказ концепције решења покретне, универзалне, еколошке, коморне соларне сушаре за сушење биолошких материјала	
1.2.2.3. Образложење, карактеристике и приказ концепције решења покретне, универзалне, еколошке, коморне соларне сушаре за сушење биолошких материјала	
2. Теоријска анализа	31
2.1. Пренос топлоте и материје	
2.2. Билансирање постројења за сушење и математички модели	
2.3. Математички модели процеса сушења у решењима за коришћење соларне енергије	
2.3.1. Математички модел процеса сушења у соларним радијационим сушарама	
2.3.2. Математички модел процеса сушења у соларној сушари	
3. Математички опис процеса сушења	51
3.1. Дефинисање карактеристичне, бездимензионе, релативне, условне влажности и брзине сушења	
3.2. Математичко моделирање кривих соларног сушења	
4. Експериментална истраживања	60
4.1. Опис модула покретне, универзалне, еколошке, коморне соларне сушаре за сушење биолошких материјала	
4.1.1. Опис мерне инсталације	

4.2. Начин извођења експеримента	
5. Резултати и дискусија	79
5.1. Кинетика сушења	
5.1.1. Дефинисање кривих сушења и кривих брзине сушења	
5.2. Одређивање карактеристичне криве сушења	
5.3. Валидација кривих сушења	
5.4. Одређивање ефективне дифузивности	
5.4.1. Анализа експерименталних резултата	
5.4.2. Резултати и анализа	
Закључак	109
Литература	112
Додатак	118
Додатак 1	
Додатак 2	
Биографија	146
Изјаве	147

Списак коришћених ознака

- a - температурна дифузивност, апсорптанција
- c - специфични топлотни капацитет
- D - дифузивност материје
- f - карактеристична брзина сушења, функција
- F - површина апсорпционе површи
- g - редукована карактеристична брзина сушења
- h - специфична енталпија, функција
- H - енталпија, озраченост
- J_i - проток влаге
- J_Q - топлотни проток, флуks
- k - коефицијент
- KKC - карактеристична крива сушења
- \dot{L} - масени проток агенса сушења
- \dot{m} - масени проток материјала
- N - брзина сушења
- n - број култура
- p - притисак
- P - флуks Сунчевог зрачења
- q - специфични топлотни флуks
- \dot{Q} - топлотни флуks
- r - латентна топлота испаравања
- S - површина
- t - температура
- T - апсолутна температура
- u - влажност материјала који се суши
- u_r - равнотежна апсолутна влажност материјала
- u_k - карактеристична влажност материјала
- v - брзина струјања
- V - запремина
- W - маса влаге
- x - апсолутна влажност агенса сушења

Грчке ознаке

- α - коефицијент прелажења топлоте
- β - коефицијент прелажења материје
- χ - моларни удео
- φ - релативна влажност агенса сушења
- η - коефицијент корисног дејства, редукована карактеристична влажност
- λ - топлотна проводност
- θ - температура материјала, нагиб пријемника
- ρ - густина
- τ - време, трансмитанција

Доњи индекси

- a - апсорбер
- as - агенс сушења
- dir - директно
- dif - дифузионо
- ef - ефективно
- g - годишњи
- i - испаравање
- iz - изолациони слој
- k - критична
- m - материјал
- om - осушен материјал
- pp - површ пријемника
- s - спољашња, стакло
- sp - соларни пријемник
- u - унутрашња
- w - влага
- 1 - почетно стање, улаз
- 2 - крајње стање, излаз

I - први период сушења

II - други период сушења

Горњи индекси

*

Увод

Сушење влажних материјала и производа је одувек било од велике важности ради обезбеђења и задовољења различитих потреба (хране за људе, итд.). Сушење Сунчевим зрачењем (соларно сушење) је добро познат начин директног природног сушења ради обезбеђења хране, којим се смањује влажност производа до вредности, која обезбеђује сигурно складиштење. Међутим материјал који се суши, незаштићен од кише, прљавштине коју носи ветар, прашине и који је загађен од инсеката, глодара и других животиња, може бити озбиљно деградиран, тако да понекад, ако се ради о прехранбеним производима, храна постане нејестива. Резултујући губитак квалитетне хране у осушеним производима може имати супротне економске ефекте на домаћем и међународном тржишту.

Алтернатива овом традиционалном начину сушења може да буде инидиректни начин соларног сушења, који подразумева коришћење сунчеве енергије за припрему агенса сушења који се затим користи у различитим типовима и решењима конвективних сушара, који задовољава неколико услова: бољи квалитет производа, коришћење јефтине енергије, што значи и економску оправданост, заштиту околине итд.

Исправно пројектовани системи за сушење морају узети у обзир захтеве процеса сушења датог производа, захтеве енергетске ефикасности и вредност трошкова. У свим случајевима неопходно је анализирати утицај основних параметара агенса сушења и карактеристика материјала на одвијање процеса сушења, а то значи могућност примене виших температура, утицај брзине струјања агенса сушења, релативне влажности агенса сушења, осцилаторног режима процеса сушења, комбинованих начина довођења топлоте и начина сушења, као и претходне технолошке припреме полазног материјала.

Симулациони модели су потребни при пројектовању и раду соларних сушара. Неколико истраживача је развило симулационе моделе за природну и принудну конвекцију у системима соларног сушења. Избор најповољнијег начина сушења се дефинише својствима свежег материјала (који у овом случају могу, ако се ради о воћу и поврћу, да се суше у целом или исеченом облику, с покожицом или без ње, ослобођено од коштице или са коштицом, сушити се може каша или

сок, а ако се ради о лековитом, ароматичном и зачинском биљу, сушити се може: корен, цвет и цваст, лист и цела стабљика са лишћем) захтеваним квалитетом осушеног производа и економичношћу процеса.

При избору начина сушења и концепције решења мора се водити рачуна о рационалном начину и оптималном режиму процеса сушења, који се карактерише максималним интензитетом испаравања влаге, високим квалитетом осушеног материјала и минималном "потрошњом" енергије. У свим случајевима неопходно је анализирати утицај основних параметара агенса сушења и карактеристика материјала на одвијање процеса сушења, а то значи могућност примене виших температура, утицај брзине струјања агенса сушења, релативне влажности агенса сушења, осцилаторног режима процеса сушења, комбинованих начина довођења топлоте и начина сушења, као и претходне технолошке припреме полазног материјала.

Моделирање процеса сушења у танком слоју доприноси разумевању карактеристика процеса сушења производа. Модели процеса сушења у танком слоју могу се сврстати у три категорије, наиме теоријске, полутеоријске и емпиријске моделе. Dedeić (2006); Dedeić и други (2006) и Dedeić и други (2008).

Теоријски приступи су засновани на једначини дифузије или симултаног загревања и једначини преноса материје.

Полутеоријски приступ се тиче апроксимативних (приближних) теоријских једначина.

Емпиријске једначине се лако примењују у симулацији процеса сушења, пошто зависе од експерименталних података. Између ових модела, теоријски приступи рачунају само на унутрашњи отпор преноса влаге, док полутеоријски и емпиријски приступи разматрају само спољни отпор преноса влаге, што значи између производа и околине.

Постоји низ истраживања о математичком моделирању и експерименталним студијама процеса соларног сушења у танком слоју различитог поврћа и воћа, лековитог, ароматичног и зачинског биља.

Експериментално одређивање времена трајања процеса сушења је везано за одређени материјал и услове при којима се изводи сваки експеримент. Одређивање времена трајања процеса сушења за друге услове мора да се врши

аналитички и дефинише се посебно за први а посебно за други период сушења. У принципу се полази од израза за брзину процеса сушења. Карактер одвијања процеса сушења најпотпуније се описује кинетиком сушења што значи кривом сушења (у координатама влажност материјала – време сушења), кривом брзине сушења (у координатама брзина сушења материјала – влажност материјала) и температурном кривом (у координатама температура материјала – влажност материјала). Упоредивање рада сушара различитих капацитета није могуће на основу промене масе материјала у процесу сушења. То је могуће на основу криве сушења као елемента кинетике процеса сушења. Квантитативне законитости процеса сушења је могуће дефинисати на основу методе, карактеристичне брзине процеса сушења. 1958., године D. A. Van Meel је предложио да се при одређеним условима извођења процеса, карактеристична крива процеса сушења влажног материјала може извести на основу експерименталне криве процеса сушења.

Хипотеза овог рада представља дефинисање математичких модела: карактеристичне брзине процеса сушења ефективне дифузивности.

1. Преглед истраживања и решења за сушење соларном енергијом

Када се суше производи, нарочито у области пољопривреде, често се наилази на тешкоће: прва тешкоћа долази од чињенице да сваки производ има своју кинетику сушења. Друга тешкоћа је техничка. Она потиче од постављања експеримента. Такође, лош облик контроле појављује се за време сушења већине производа за исхрану.

1.1. Преглед истраживања процеса сушења

Побољшање пројектовања и оптимизација радних услова уређаја за сушење је предмет више експерименталних и теоријских истраживања. Flechon 1976. је проучавао утицај климатских услова (суви дани, околна температура и брзина ветра) као и коришћење вишетранспарентних (застакљивање) пријемника. Утврђено је да када се број застакљивања повећа, температура апсорберске површи се такође повећа; с друге стране, утицај неповољних временских услова на својства пријемника се смањује .

1981. Соорег је проучавао утицај угла нагиба пријемника у односу на хоризонталу површи, на вредност коефицијента „губитака” топлоте. Утврђено је да укупна вредност коефицијента губитака пријемника расте са порастом вредности угла нагиба све до 60° , док даљи пораст вредности угла доводи до наглог пораста вредности коефицијента губитака топлоте.

Ефикасност пријемника је у тесној вези са његовим коефицијентом губитка топлоте. Бројни истраживачи су проучавали утицај овог коефицијента коришћењем теоријских, аналитичких и експерименталних метода. 1981. Agrawal i Larson су предложили зависност за одређивање вредности топлотних губитака за било који тип пријемника. Утврђено је да улазна температура и проток радног флуида, агенса сушења, имају главни утицај на ефикасност пријемника. 1982. Garg i Sharma провели су истраживања за три типа апсорберске површи пријемника под истим радним условима. Они су показали да се ефикасност пријемника повећава када се повећа проток радног флуида и да је ефикасност обрнуто пропорционална улазној температури радног флуида.

Да би оценили утицај времена задржавања на ефикасност апсорбера пријемника, Wijesundera и други су обавили, 1982. теоријско и експериментално истраживање на три типа пријемника. Утврђено је да, за отворене системе са улазним ваздухом околине, пријемник са два пролаза даје ефикасност од око 10-15% више него пријемник са једним пролазом. Уз то, затворени системи са рецикулацијом ваздуха са два пролаза имају нека ограничена својства.

Ради планирања код ваздушних пријемника Biondi и други дали су користан дијаграм и за поређење различитих својстава пријемника и за избор типа конструкције, који може најбоље да задовољи специфичне услове коришћења. Parker и други су проучавали топлотна својства пријемника соларне енергије за грејање ваздуха са В валовитим плочама апсорберске површи за три типа пријемника: протоком преко апсорберске површи, протоком са обе стране апсорберске површи и протоком испод апсорберске површи. Ong је поставио теоријски модел за предвиђање топлотног својства равног апсорбера за грејање ваздуха у случају једног пролаза агенса сушења. Решење би се могло проширити да обухвати и већину других решења пријемника. 1995., Ouard i Leray су презентирали експерименталну студију у циљу повећања топлотне ефикасности соларног пријемника. Закључено је, да добар пријемник треба да има највећи коефицијент преноса топлоте радни флуид (ваздух) – апсорберска површ и најнижи коефицијент губитка топлоте.

При анализи процеса сушења у танким слојевима, материјал који се суши се излаже константним условима процеса сушења за дато време, при којем се све промене у материјалу обаве у материјалу и тако, параметри процеса сушења могу да буду повезани са константним параметрима агенса сушења. Логично, закључци добијени при испитивању процеса сушења материјала у танком слоју, који су релевантни за познавање процеса сушења, морају бити довољно конзистентни да дозволе њихову примену за случајеве сушења при дебљим слојевима, ради симулације опреме и пројектовања.

Што се тиче проблема сушења у танком слоју, бројне студије које стоје на располагању у литератури, користе различите методе. Оне могу бити класификоване у три врсте решења: нумеричко, аналитичко и апроксимативно

(приближно). За узврат, у вези са последњим, разликују се полуискуствена и искуствена решења.

Међутим, у свакој категорији, неки прилази узимају у обзир скупљање производа. Од радова који представљају нумеричка решења, следећи радови могу бити репрезентативни Masi и Riva (1988) Karathanos и други (1990), Ratti, (1991), Rovedo и други, (1995), Wang и Brennan, (1995), Simal (1996), Ghiaus и други, (1997), Hawlader и други, (1999), Sabarez i Price, (1999), Kechaou и Maalej, (2000), Lima De и Nebra, (2000), Queiroz i Nebra, (2001), и Lima De и други (2002). Сви ови аутори користе диференцијалне једначине дифузије влаге која, поред тога што дозвољава одређивање коефицијента дифузије, такође омогућава предвиђање градијената преноса влаге и топлоте у материјалу. Такође неки од ових математичких модела узимају у обзир скупљање материјала, промену запремине. У следећим радовима, аналитичка решења не узимају скупљање материјала у обзир Giner (1989), Giner (1999), Medeiros i Sereno (1994) Giner и други (1996), Simal и други (1997), Park и други (2001), Maskan и други (2002), Togrul и Pehlivan (2002) и Togrul и Pehlivan (2003). Насупрот, аутори који су разматрали смањење запремине за време сушења били су: Berna и други (1991), Gekas и Lamberg (1991), Alvarez и други (1995), Thakor и други (1999), Di Matteo и други (2000), Di Matteo и други (2002), Di Matteo и други (2003) и Hernandez и други (2000).

На крају, између радова који третирају решавање проблема сушења, користећи полуемпиријске и емпиријске изразе, следећи радови су релевантни Bala i Woods (1992), Chavez / Mendez и други (1995), Pngavhane и други (1999), Panghvane и други (2000), и Tsami и Katsioti (2000). Ове констатације се односе само на новије радове или релативно скорашње, мада постоји знатан број старијих радова у свакој од категорија.

Као резултат овог прегледа литературе, изотермско сушење се појављује као најубичајенији усвојени модел у студијама кинетике при решавању промене бездимензионе (карактеристичне) апсолутне влажности у функцији времена за различите радне услове ваздуха (агенса сушења): температуру, брзину и релативну влажност. Међутим, у многим истраживањима, само је мењана температура агенса сушења. Очигледно је да сложеност, коју садржи анализа процеса сушења почива на разноврсности биолошког материјала и његовог

скупљања у току процеса, тако да је врло тешко да се пронађе општи модел. Постоји неколико могућности моделирања сушења танког слоја са врло много различитих степена сложености. Као што је показано од неких аутора (Giner, 1999 и Mulet 1994), параметри кинетике сушења варирају знатно у зависности од коришћеног метода за њихово оцењивање, чак и они добијени по истом методу су често зависни од равнотежне апсолутне влажности, која се користила да се изразе експериментални подаци у бездимензионом облику (Gelly и Giner 1999).

Циљ истраживања је да се обезбеди информација потребна да се симулирају слојеви материјала, важна у проналажењу метода сушења у танком слоју са добрим физичким основама, који још увек брзо могу на рачунару да се ураде да би се олакшало пројектовање опреме. Циљ једног дела истраживања је био да се експериментално одреде криве сушења у функцији променљивих параметара агенса сушења, да се предложи кинетика сушења биолошких материјала и да се одреде њихови кинетички параметри за даљу употребу у софтверу за симулацију сушења. Савремене методе пројектовања опреме за сушење су засноване на математичком опису процеса сушење у слојевима, да би се оценило време, што је тачније могуће (Giner, 1999).

Према литератури, сложен процес сушења може бити анализиран разлагањем на једноставније системе (Giner 1999; Himmelblau и Bischoff, 1976; Ratti, 1991). На пример, комора за сушење може бити подељена у слојеве дате дебљине насупрот оној формираној од врло танких, елементарних слојева производа, нормалне величине једне честице. Зато, одређивање суштинских карактеристика процеса сушења, као што су танки слојеви – параметри кинетике – постају важни, када се ради о пројектовању индустријских сушара.

Може се уочити и развој математичких модела за соларно сушење у танком слоју у индиректној соларној сушари са принудном конвекцијом под еколошким условима. С друге стране, да би се одредио тип модела најпогоднијег за интерпретирање криве сушења воћа дају се криве брзине сушења у функцији влажности. Може се видети да постоји само период опадања брзине, и зато се може предложити, да се прати искључиво унутрашњи пренос масе. Већина комерцијалних софтвера за нелинеарно решавање често не дозвољава употребу једначина са бројним изразима. Минималан број израза да би се осигурала

конвергенција није познат и варира са временом. Специфичан компјутерски програм се захтева, да би се минимизирала одступања између предвиђених и експерименталних података, укључујући дозвољену грешку, да би се постигла конвергенција за свако време.

Када су параметри једном подешени, предвиђања криве сушења захтевају поново специфичан компјутерски програм.

У табели 1.1. су приказани математички модели кинетике сушења из литературе коришћени за обраду експерименталних података.

1.2. Соларна енергија и решења за сушење коришћењем соларне енергије

1.2.1. Карактеристике соларне енергије

Главне предности коришћења соларне енергије су, (Торић и други 2005):

- соларна енергија је неисцрпан и вечан извор енергије за данашње појмове у поређењу са класичним изворима енергије,
- за коришћење соларне енергије нису потребна посебна геолошка истраживања и различити објекти,
- за разлику од фосилних горива коришћење соларне енергије не загађује ваздух, земљиште и воду, не стварају се никакве отпадне супстанце, што значи да се не загађује средина,
- соларна енергија је потпуно бесплатна када се инсталација за акумулацију енергије једном изгради, наравно, након отплате уложених средстава за изградњу,
- већина уређаја и инсталација за коришћење соларне енергије су релативно једноставни и лако доступни сваком,
- за разлику од нуклеарне енергије масовно коришћење соларне, не ствара радиоактивни отпад,
- за разлику од свих осталих видова енергије, коришћење соларне енергије омогућава производњу енергије тамо, где се она троши.

Табела 1.1. Математички модели коришћени за кинетику сушења (Marquez и други 2006, Topić и други, 2005)

Број модел а	Назив модела	Израз модела	Литература
1.	Newton	$u_k = \exp(-k \cdot \tau)$	Westerman (1973)
2.	Page	$u_k = \exp(-k_o \cdot \tau^n)$	Page (1949)
3.	Modifikovani Page	$u_k = \exp[(-k \cdot \tau)^n]$	Overhultes (1973)
4.	Henderson & Pabis	$u_k = a \cdot \exp(-k \cdot \tau)$	Henderson & Pabis (1961)
5.	Логаритамски	$u_k = a \cdot \exp(-k \cdot \tau) + c$	Yaldiz & Ertekin (2001)
6.	Двопериодични	$u_k = a \cdot \exp(-k_o \cdot \tau) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot \tau)$	Rahman (1998)
7	Дво периодични експоненцијални	$u_k = a \cdot \exp(-k \cdot \tau) + (1-a) \cdot \exp(-k \cdot a \cdot \tau)$	Yaldiz & Ertekin (2001)
8.	Wang & Singh	$u_k = 1 + a \cdot \tau + b \cdot \tau^2$	Wang & Singh (1978)
9.	Апроксимативно дифузиони	$u_k = a \cdot \exp(-k \cdot \tau) + (1-a) \cdot \exp(-k \cdot b \cdot \tau)$	Yaldiz & Ertekin (2001)
10.	Модификован Henderson & Pabis	$u_k = a \cdot \exp(-k \cdot \tau) + b \cdot \exp(-g \cdot \tau) + c \cdot \exp(-h \cdot \tau)$	
11.	Verma	$u_k = a \cdot \exp(-k \cdot \tau) + (1-a) \cdot \exp(-g \cdot \tau)$	Verma (1985)
12.	Midilli & Kucuk	$u_k = a \cdot \exp(-k_o \cdot \tau) + b \cdot \tau$	Midilli & Kucuk (2002)
13.	Топић	$u_k = a + b \cdot \exp(-0,5 \cdot ((\tau - c) / d)^2)$	Topić (2005)

Основне мане соларне енергије су:

- њена интермитенција, не постоји континуално,
- нема је ноћу,

- приземна јачина соларног зрачења зими је знатно мања него лети, што је последица:
 - висине (дужине) привидног угла по којем се привидно креће Сунце с Истока ка Западу,
 - дужине дана,
 - стање атмосфере, прозачност и облачност,

што све утиче на осунчаност посматране локације и на вредност енергије која се добије од соларног зрачења по јединици површине озрачене површи. у зрачења на ту површину (соларна константа), од чега при истим условима до површине тла доспева 1000 W/m^2 .

1.2.2. Решења за сушење коришћењем соларне енергије

1.2.2.1. Пријемници соларне енергије

Пријемник је уређај који сакупља сунчеву енергију и претвара је у друге облике енергије, (Торић и други 2005, Торић 2004, Торић 2002, Торић 2003, Торић 2005).

Соларна енергија се може трансформисати у:

- топлотну,
- електричну и
- хемијску.

Могу бити пасивна и активна решења за коришћење соларне енергије.

Постоје два типа топлотних пријемника:

- обични различите конструкције пријемници (равни, цевни итд.) и
- за концентрисање Сунчевог зрачења, код којих се енергија фокусира у тачку или део линије.

Пријемници за претварање соларне енергије у топлотну

Подела, типови и конструкције пријемника соларне енергије

Равни пријемници се могу поделити на више група у зависности од конструкционих карактеристика (материјала елемената од којих је израђен апсорбер, врсте апсорбујућег премаза, материјала израде и броја транспарентних

плоча) и радног медија који служи за пренос енергије (са течним радним средствима и ваздухом). Угао који дефинише положај у односу на Сунце, хоризонталну површ мења се у току времена. При дефинисању нагиба пријемника обично се усваја средња вредност угла за одређени период експлоатације.

Различити типови и конструкције пријемника соларне енергије могу бити са течним и гасовитим радним флуидом. Неки типови и конструкције пријемника соларне енергије могу бити са чврстим покривачем, транспарентом.

Конструкције пријемника соларне енергије могу бити са еластичним покривачем, транспарентом.

Карактеристике пријемника соларне енергије

Пријемници за трансформацију соларне енергију у топлотну енергију су најједноставнији и имају најширу примену.

Предност равних пријемника соларне енергије је могућност апсорбовања и директног и дифузног зрачења.

Овим пријемницима се постижу температуре радног флуида до 100°C , а ако имају особину селективности постижу се и до 150°C вредности температура. За постизање вредности температура изнад 150°C користе се концентратори, који прате привидну путању кретања Сунца и фокусирају директно сунчево зрачење на апсорбер који се налази у жижичком пријемнику. Такође за постизање виших вредности температура могу се користити и вакуум пријемници, којима се постижу вредности температура до 150°C . Најприкладнији материјал за транспарент пријемника соларне енергије је стакло, пошто транспарент треба да има што већи трансмисијски фактор за подручје Сунчевог спектра таласних дужина у интервалу $0,3\mu\text{m} < \lambda < 2\mu\text{m}$, а што мањи за топлотно зрачење које емитује апсорпциона површ апсорбера чије таласне дужине су $\lambda > 2\mu\text{m}$. Готово сва енергија Сунца која доспе на површину Земље се налази у интервалу таласних дужина λ од $0,3\mu\text{m}$ до $5\mu\text{m}$, с максималним интензитетом зрачења у видљивом делу спектра, $\lambda=0,48\mu\text{m}$. Ефикасност пријемника се може повећати и коришћењем селективних апсорбера, који добро апсорбују зрачење краћих таласних дужина а слабо емитују зрачење дужих таласних дужина (инфрацрвено) које емитује апсорпциона површ апсорбера.

Пријемници за претварање соларне енергије у електричну

Фотонапонско претварање соларне енергије представља начин непосредног коришћења соларне енергије у виду електричне енергије, што се постиже соларним ћелијама. Соларна ћелија није ништа друго до диода у којој се упадни фотони апсорбују и тако стварају парове електрон - шупљина, фотоне и екситоне. Да би парови електрон шупљина могли предати своју енергију, потрошачу у спољашњем колу, негативни електрони и позитивне шупљине морају бити раздвојене. Раздвајање се може постићи захваљујући унутрашњем електричном пољу споја које је настало стварањем слоја просторног наелектрисања диоде.

Озрачивањем соларних ћелија долази до:

- рефлексије одређеног дела зрачења од површи ћелије,
- корисне апсорпције чији је резултат стварање парова електрон – шупљина, и паразитске апсорпције последица је загревање, такође део дозрачене енергије пролази кроз ћелију,
- раздавајања и корекције фотогенерисаних носилаца наелектрисања,
- кретања наелектрисања према спољашњим контактима,
- дисипације фотогенерисане енергије на спољашњем потрошачу.

Основни захтеви за добијање ефикасних соларних ћелија су:

- апсорпција зрачења и креирање парова електрон – шупљина морају бити са што мањим губицима,
- генерисани парови електрон – шупљина се морају раздвојити,
- величина енергетског процепа полупроводничког материјала мора бити довољно велика, јер одређује максимум излазног напона ћелије,
- пад омског напона, као последица паразитских отпорности се мора свести на најмању могућу меру,
- метални, решеткасти контакт на површини ћелије мора бити танак.

Карактеристике фотонапонских система, PV система

Најраспорстрањенија технологија и нашира примена PV система је заснована на силицијумским соларним ћелијама. Уколико се упореде

економичност и ефикасност конвенционалних извора енергије, онда су јефтине соларне ћелије у предности. Развој соларних ћелија на бази Si материјала је усмерен на смањење цене соларне ћелије, што значи и цене PV система и на побољшање особина, квалитета ових система. Ефикасност од 20 %, за неколико типова монокристалних соларних ћелија је већ стандардна. Такође коришћени материјали су: неоргански као што су: аморфни силицијум, галијум арсенид, бакар - индијум селенид, кадмијум телурид и материјали органског порекла као што су: фулерени, полианилион, фталоцијанин.

1.2.2.2. Врсте соларних сушара и приказ концепције решења покретне, универзалне, еколошке, коморне соларне сушаре за сушење биллошких материјала

Соларне сушаре деле се према начину струјања агенса сушења у две групе и то, (Торић и други 2005, Торић 2004, Торић 2002, Торић 2003, Торић 2005).

- са природним струјањем, пасивне и
- са принудним струјањем, активне.

Пасивне соларне сушаре могу се даље поделити на:

- соларне радијационе, директне и
- соларне, индиректне.

Директна пасивна сушара је она у којој је производ који се суши директно изложен зрачењу Сунца. Код индиректне пасивне сушаре, Сунчево зрачење не делује директно на материјал који се суши.

Према капацитету могу бити сушаре:

- великог,
- средњег и
- малог капацитета.

Сушаре малог капацитета су решења соларних сушара која могу да осуше до 150 кг производа месечно; а великог капацитета су она решења сушара која могу да осуше и до 3000 kg производа месечно; док се врло великим системима сматрају решења која могу да осуше до 4500 kg и више производа месечно (вредности капацитета се заснивају на приносима у рејонима са умереном климом).

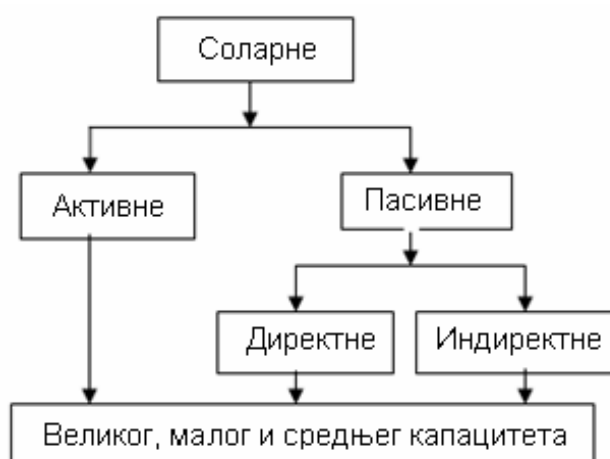
На сл.1.1.1., је дат шематски приказ поделе соларних сушара.

Пасивне сушаре користе само природно кретање загрејаног ваздуха. Оне могу да се лако изведу са јефтиним, локално расположивим материјалима.

Директне пасивне сушаре се највише користе за сушење малих количина производа. Индиректне сушаре варирају у величини од малих кућних сушара до великих комерцијалних јединица.

Активне сушаре захтевају посебне уређаје за кретање агенса сушења у току процеса сушења (вентилатори).

Ове сушаре могу бити саграђене у скоро свим величинама, од врло малих до врло великих, али већи системи су најекономичнији.



Сл.1.1. Шематски приказ поделе соларних сушара.

На сл.1.2., је приказана шема која показује основне компоненте активне соларне сушаре, (Pangavhane et al 2002).

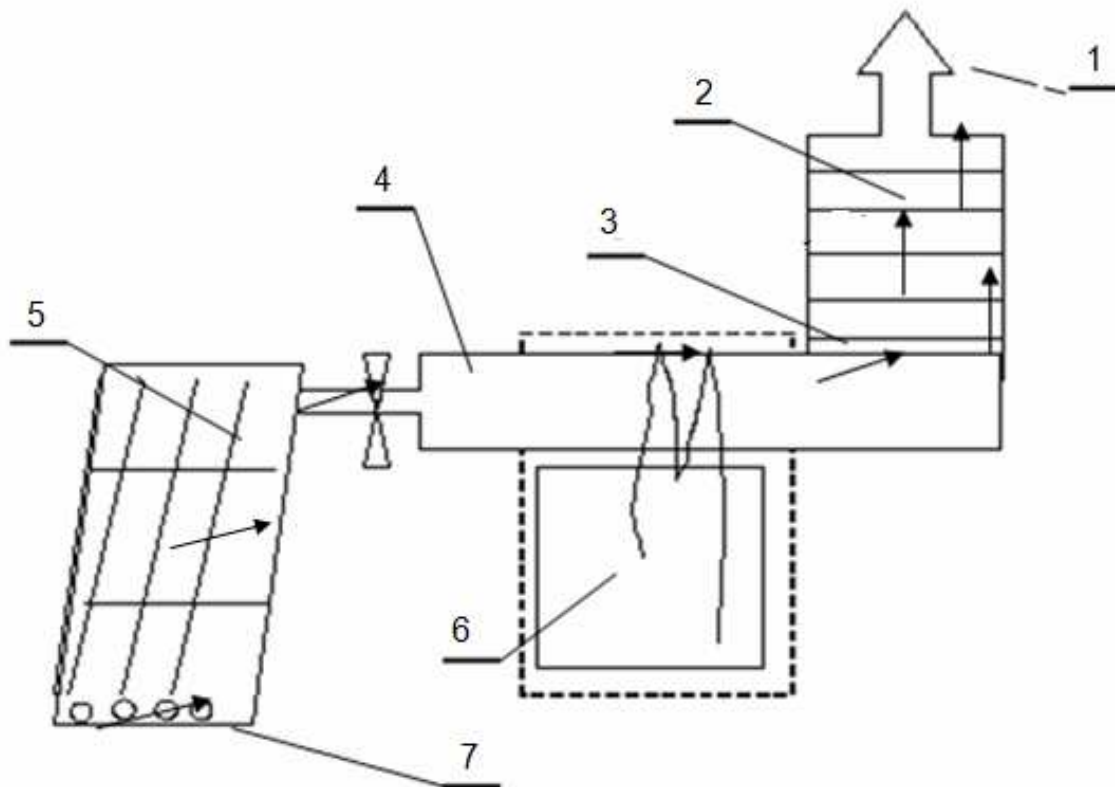
Могу се користити или пријемници са ваздухом као радним флуидом или са течношћу.

Пријемници треба да су оријентисани ка Југу ако су на северној хемисфери или ка Северу ако су на јужној хемисфери

На или близу Екватора, треба да буду оријентисани ка Истоку или Западу ујутро или по подне.

Пријемници треба да буду постављени под одговарајућим углом за оптимално прикупљање Сунчеве енергије за планирани период рада сушаре.

Пријемници могу бити у близини или нешто даље од соларне сушаре. Међутим, пошто је отежано кретање ваздуха са већих растојања, најбоље је поставити пријемнике што је ближе могуће сушари.



Сл.1.2. Основне компоненте активне сушаре.

1. канал за излаз агенса сушења, 2. полице за смештај производа, 3. Измењивач топлоте, 4. вентилатор, 5. пријемник Сунчевог зрачења, 6. складиште, 7. улаз ваздуха.

Сакупљена Сунчева енергија се може испоручити као топлота одмах преко агенса сушења у комору за сушење, или може бити сачувана, ускладиштена за каснију употребу.

Системи складиштења су великих димензија и скупи али помажу у областима где је проценат сунчаних дана низак и где се захтева гарантовани извор енергије; или се захтева извођење сушења током целог дана и ноћи.

Код решења активне сушаре, агенс сушења, ваздух загрејан зрачењем Сунца пролази кроз комору за сушење на такав начин да долази у додир са што је могуће већом површи материјала који се суши. Што је већи однос између површи и запремине материјала, то више испари влаге. Материјал који се суши се поставља у танким слојевима на полице за сушење или преграде са решетком или другим изведбама које омогућавају агенсу сушења да струји са свих страна производа. За зрнасте производе, цеви са перфорираним зидовима се постављају на дно коморе за сушење са слојем зрна изнад.

Агенс сушења пролази кроз цеви и навише да би прошао кроз слој зрна односећи испарелу влагу.

Сушаре са природним струјањем агенса сушења, пасивне сушаре

Како је истакнуто раније, пасивне соларне сушаре користе природне услове, зрачење и конвекцију за загревање и кретање ваздуха, агенса сушења у току процеса.

Пасивне сушаре се могу поделити на директне и индиректне.

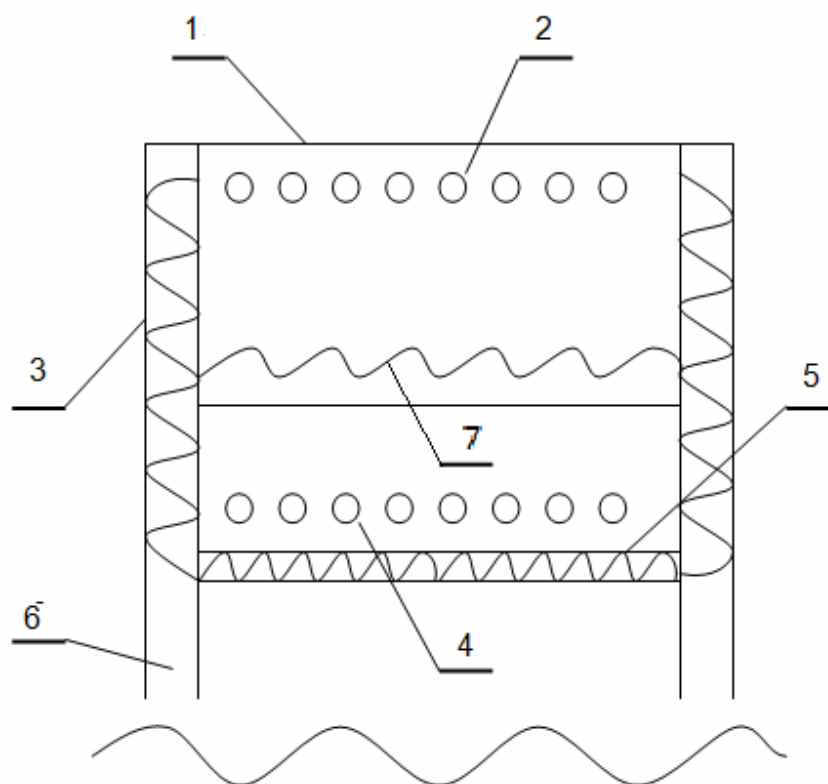
Директне пасивне сушаре

Како је такође истакнуто код директних сушара, материјал је изложен директно Сунчевим зрацима. Овај тип сушаре типично садржи комору за сушење која је прекривена провидним поклопцем од стакла или пластике.

Комора за сушење је уска, изолована кутија са отворима у њој који дозвољавају ваздуху да улази и напушта кутију. Материјал који се суши се поставља на перфориране полице које дозвољавају агенсу сушења да струји кроз њих и материјал.

Соларно зрачење, одређене таласне дужине, пролази кроз провидни поклопац, транспарент, и претвара се у топлотно зрачење које се одбија од непровидног зида.

На сл.1.3., и сл.1.4. су дате шема карактеристичних решења једноставних директних соларних сушара, (Торић и други 2011).

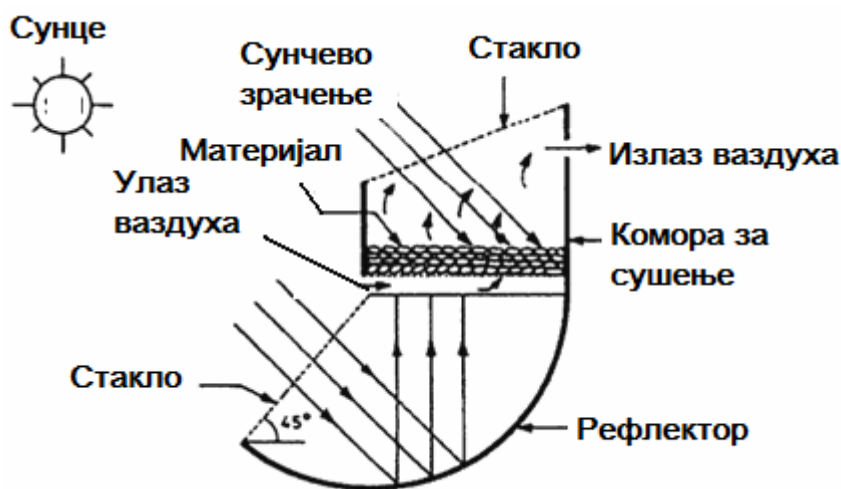


Сл.1.3. Директна соларна сушара

1. провидни поклопац, хоризонтални или нагнути, 2. отвори за пролаз ваздуха, 3. изоловани бочни зидови, 4. отвори за улаз ваздуха, агенса сушења, 5. тава/носећи елемент, 6. кратке ноге за подизање изнад тла, 7. материјал који се суши.

Ово зрачење је „ухваћено“ у кутију на начин познат као „ефекат стаклене баште“. Једноставно речено, кратко таласно Сунчево зрачење продире кроз провидни поклопац.

Једном претворена енергија у топлоту, одбијена енергија са дугим таласним дужинама, не може да се врати назад кроз поклопац, покривач. Комора за сушење може бити изведена од скоро сваког материјала: дрвета, бетона, лима, итд. Комора за сушење је обично дужине 2 m, ширине 1 m и 23 до 30 cm, дубине. Дно и зидови коморе за сушење треба да имају слој изолације од 5 cm (препорука). Зацрњивање унутрашњих зидова коморе за сушење ће побољшати ефикасност сушаре, али треба користити неотрован материјал и избећи боју са садржајем олова. Дрво зацрњено паљењем је сигурно и јефтино.



Сл.1.4. Директна соларна сушара

На сл.1.5, приказана је упрошћена шема ефекта стаклене баште.

Полице или таве, на којима се налази материјал који се суши, морају дозволити ваздуху да пролази испод и кроз материјал. Жичана или пластична сита или перфориране површи могу бити од користи.

Треба користити што је могуће већу перфорацију, грубља сита која носе материјал а да исти не може да пропадне кроз отворе.

Што је перфорација сита већа, агенс сушења лакше циркулише кроз материјал.

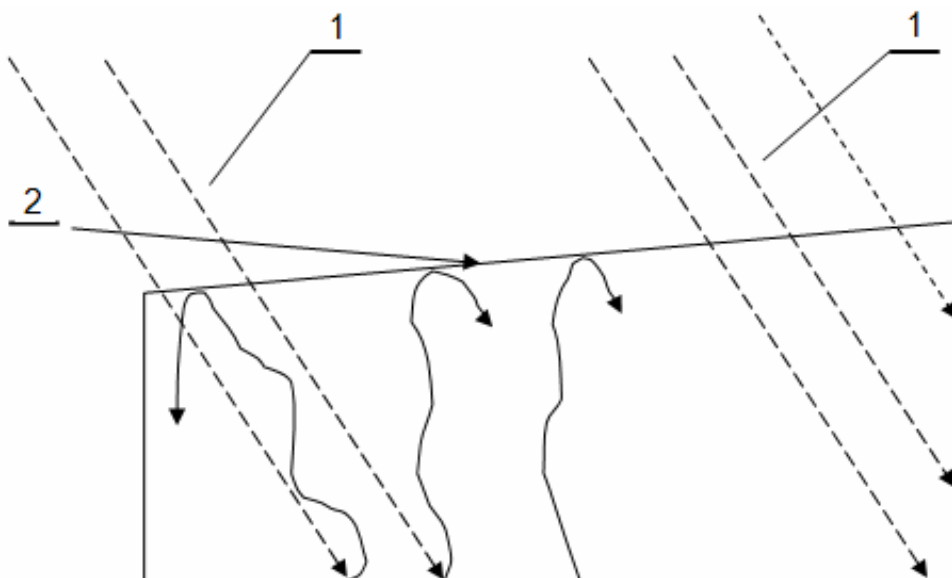
Отвори за агенс сушења испод полица или сита ће доводити спољни ваздух, који ће у својству агенса сушења однети влагу која испарава из материјала који се суши.

Како се ваздух загрева у сушари, његова запремина се повећава, тако да ће на врху коморе за сушење бити потребни или отвори већег пречника или више отвора да би се обезбедила максимална вредност протока ваздуха.

Индиректне пасивне сушаре

Индиректна сушара је она у којој материјал није директно изложен дејству Сунчевог зрачења. Код ових решења, сушење се остварује агенсом сушења који је

припремљен у пријемнику соларне енергије. У комори, материјал се поставља на полице са перфорираним дном, ситима које су постављене по висини тако да



Сл.1.5. Ефекат стаклене баиште.

1. краткоталасно Сунчево зрачење продире кроз пластични поклопац, 2. провидни поклопац, транспарент.

ваздух струји кроз сваку.

Испитивања, сушаре на сл.1.6., су показала да се могу постићи температуре агенса сушења у сушари и до 40 °С више него што су температуре у околини.

Пријемник Сунчевог зрачења може бити било које величине и треба да буде нагнут према правцу Сунчевог зрачења тако да оптимално прикупи Сунчево зрачење.

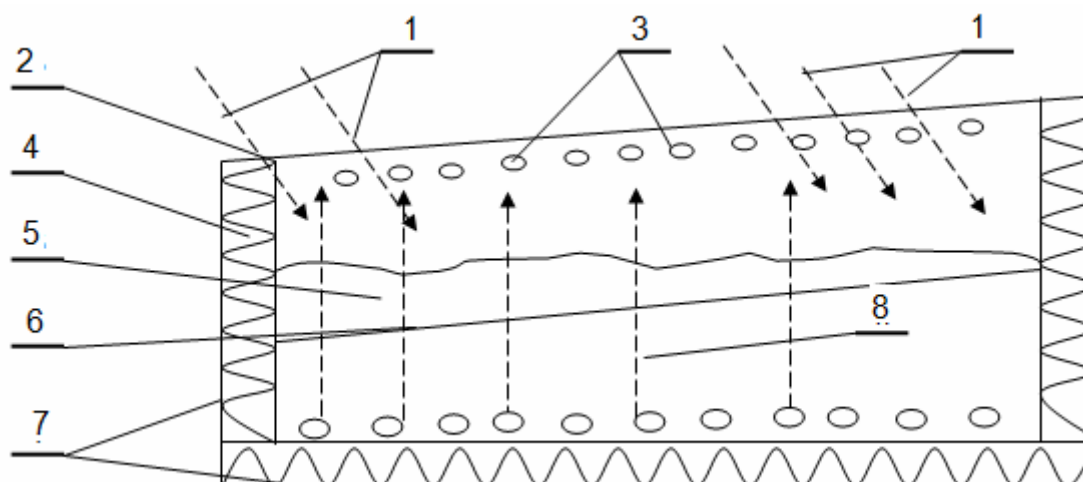
Повећањем димензија пријемника може се добити више топлотне енергије чиме се побољшава укупна ефикасност.

Већа површ апсорбера пријемника је боља у местима са slabим Сунчевим зрачењем, свежим или хладним климама и влажним подручјима. Касније ће се указати на климатске услове у којима велике површи апсорбера пријемника могу бити ефикасније.

На сл.1.7., и сл.1.8., су дате карактеристичне шеме индиректних пасивних сушара.

Нагињање пријемника је ефикасније него њихово хоризонтално постављање из два разлога.

Прво, више Сунчевог зрачења може бити прикупљено када је површ апсорбера пријемника постављена скоро нормално на правац упада Сунчевог зрачења.



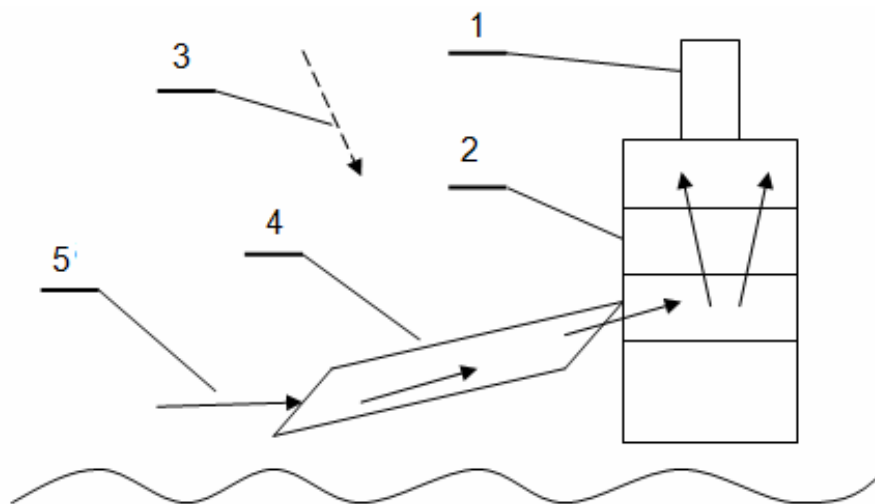
Сл.1.6. Комора за сушење сушаре БРАЦЕ.

1. Сунчево зрачење, 2. провидни поклопац, 3. вентилациони отвори, 4. зацрњени зидови, 5. материјал за сушење, 6. полице за сушење, 7. изоловане стране и под коморе за сушење, 8. влажан ваздух.

Сунчево зрачење, температура околног ваздуха, вредност влажности, температура у комори за сушење, и почетна влажност материјала који се суши морају бити узети у обзир при регулисању протока ваздуха.

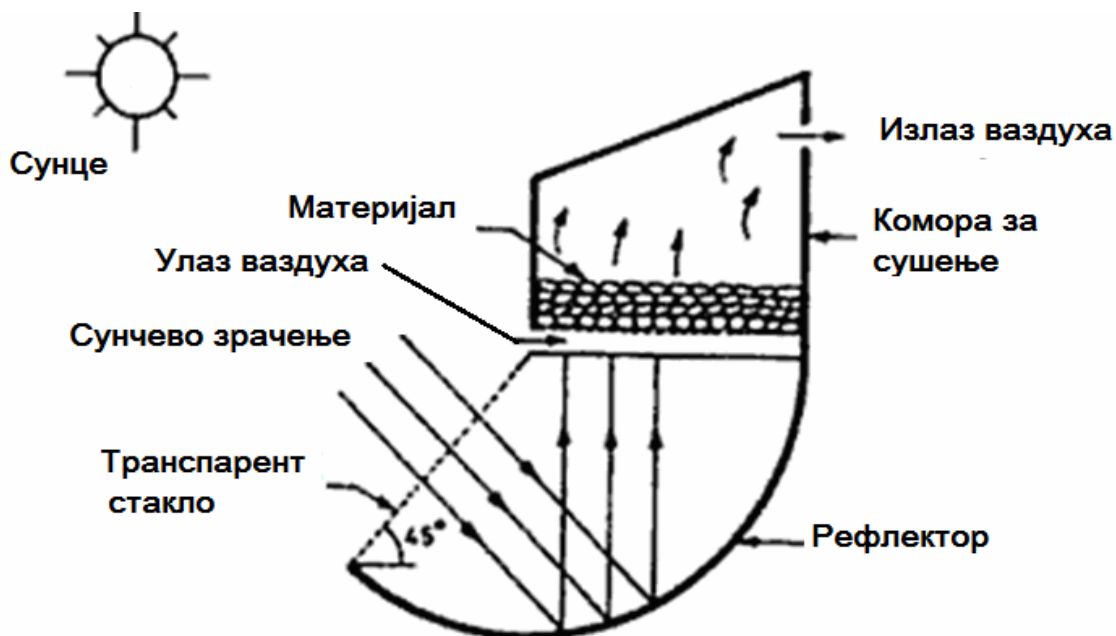
Друго, нагињањем пријемника, топлији, ваздух мање густине, природно улази у комору за сушење. Комора за сушење треба да буде смештена на ногама носача, али не треба да буде подигнута тако високо изнад земље да се не би отежао рад. Основа пријемника треба да буде са отворима за вентилацију тако да

се дозволи улаз ваздуха који се загрева. Отвори треба да су равномерно распоређени по целој ширини основе површи пријемника у циљу спречавања



Сл.1.7. Индиректна пасивна сушара.

1. излаз израђеног агенса сушења, 2. полице за смештај материјала, 3. Сунчево зрачење, 4. пријемник Сунчевог зрачења, 5. улаз ваздуха.



Сл.1.8. Индиректна пасивна сушара

локализованог прегревања површина у пријемнику. Отвори треба такође да су подесиви тако да проток ваздуха може да се регулише према радним условима и/или потребама. Врх пријемника, излаз, треба да буде потпуно отворен према дну коморе за сушење. Агенс сушења, загрејани ваздух у комори за сушење, ће пролазити кроз полице са материјалом. Полице на којима се налази материјал морају да су подешене правилно тако да агенс сушења принудно пролази кроз сита и полице. Полице које нису правилно постављене стварају пролазе око ивица и узрокују да агенс сушења заобилази материјал и тиме не обавља у потпуности своју функцију. Агенс сушења пролазећи кроз неколико слојева материјала на полицама постаје све влажнији. Овако влажан агенс сушења се избацује кроз вентилациони одводни канал (димњак). Вентилациони одводни канал повећава проток агенса сушења кроз комору за сушење повећањем брзине струјања.

На сл.1.7., је приказан соларни вентилациони одводни канал са пластичном фолијом на јужно оријентисаној страни. Пошто топао, влажан ваздух пролази кроз вентилациони одводни канал, додатно Сунчево зрачење које улази у канал загрева даље ваздух који напушта канал. Ова додата топлота чини ваздух мање густим и чини да ваздух брже напушта канал и излази напоље, обезбеђујући на тај начин више свежег ваздуха кроз пријемник.

На сл.1.9. је дата шема шире поделе решења за сушење која користе Сунчево зрачење.

1.2.2.3. Образложење, карактеристике и приказ концепције решења покретне, универзалне, еколошке, коморне соларне сушаре за сушење биолошких материјала

Образложење концепције решења покретне, универзалне, еколошке, коморне соларне сушаре за сушење биолошких материјала

Чињенице (Торић и други 2005, Торић 2004, Торић 2002, Торић 2003, Торић 2005):

- да је интензитет сунчевог зрачења у нашем поднебљу највећи у касно пролећним, летњим и рано јесењим данима што пада баш у време сређивања пољопривредних култура,
- да се суше различити материјали, воће и поврће, лековито, ароматично и зачинско биље,

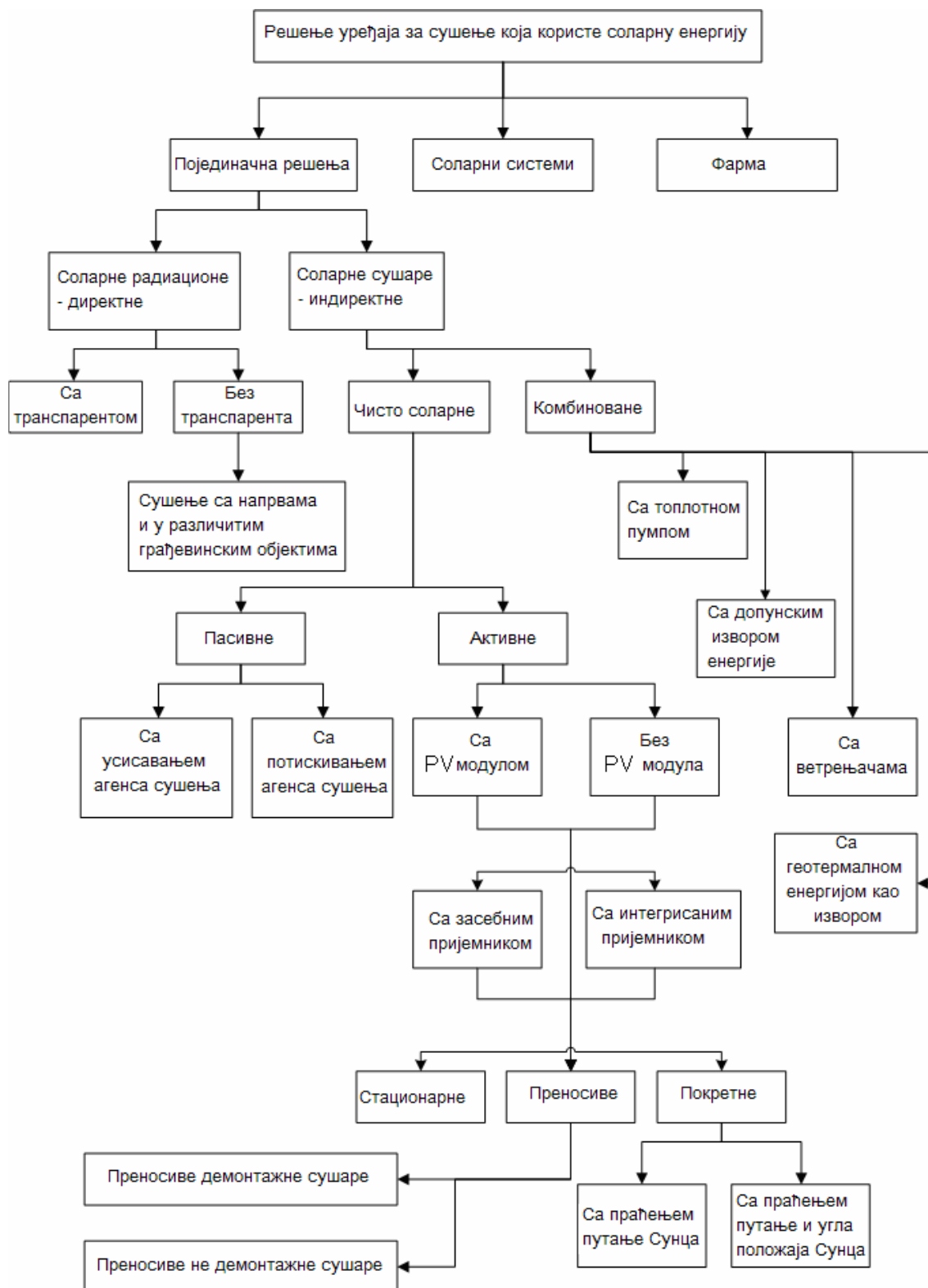
- да је изузетно порастао интерес за осушеним биолошким материјалима, како код нас тако и у свету,
- да су станишта тих култура даље од урбаних средина, где је отежано допремање течног или чврстог релативно скупог горива,
- да се захтева уштеда енергије и индиректни начин сушења,
- да се већина материјала скоро одмах после убирања мора сушити у циљу очувања квалитета,
- да је све израженији захтев за чистим технологијама и квалитетним осушеним производима,
- да је скоро једина и највећа ставка, код коришћења соларних сушара, вредност инвестиционих трошкова, израде сушаре,
- да је са економског и еколошког аспекта, осушени производ добијен сушењем у соларним сушарама знатно конкурентнији у односу на производ добијен сушењем у сушарама које користе као извор енергије класична горива,

довеле су до идеје и потребе освајања решења покретне, соларне, коморне, еколошке, универзалне сушаре за сушење биолошких материјала и израду прототипа једног модула. Усвојена концепција решења омогућава најповољнији пријем соларне енергије; квалитетнији осушени материјал и уштеду енергије.

Основне карактеристике решења покретне, универзалне, еколошке, коморне соларне сушаре за сушење биолошких материјала

Основне карактеристике сушаре су

- сушара је коморног типа са периодичним режимом рада, све компоненте сушаре и уређаји су фиксирани на једној специјално конструисаној једноосовинској приколици и представљају једну компактну покретну целину,
- комплетна сушара се транспортује до места рада, и брзо и лако се преводи из транспортног у радни положај,
- решење сушаре омогућава рад на било којем месту,



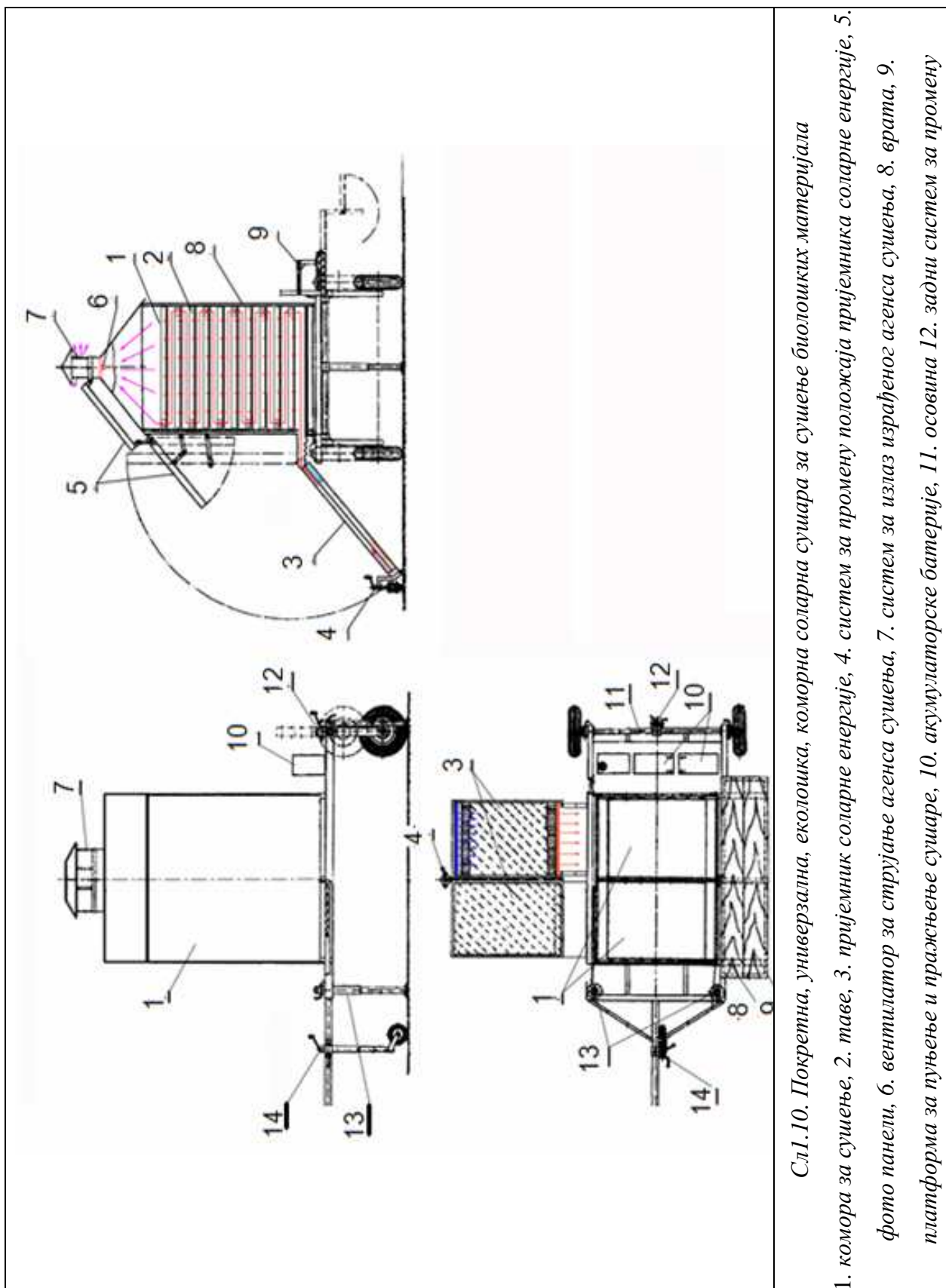
Сл.1.9. Шема шире поделе уређаја за сушење

- материјал у процесу сушења мирује на тавама које су постављене по висини коморе за сушење.
- агенс сушења је чист загрејани ваздух који се загрева у соларним равним пријемницима, чији положај, нагиб је променљив,
- соларни пријемници за загревање ваздуха су постављени бочно са стране сушаре и зглобно су везани за рамску конструкцију коморе за сушење, тако да се могу обртати око хоризонталне осе и поставити у вертикални положај за транспорт,
- агенс сушења омива или омива и прострујава слој материјала који се налази на тавама,
- кретање агенса сушења је принудно (обезбеђено је вентилаторима) или природно,
- конструкција граничних површина обезбеђује и рецикулацију агенса сушење,
- на задњем делу приколице уграђене су две акумулаторске батерије, за напајање електромотора за погон вентилатора.
- модулски ситем,
- могућност регулисања режима процеса сушења,
- најповољнији пријем соларне енергије и мекши режим сушења,
- мали експлоатациони трошкови,
- универзално решење, суше се различити материјали,
- еколошка, не загађује околину,
- обезбеђује период одлежавања материјала у току процеса сушења.

Сушара сл.1.10, (Торић и други 2005, Торић 2004, Vukojević 1998)., као и сви елементи сушаре и уређаји су фиксирани на једној специјално конструисаној једноосовинској приколици, тако да представљају једну компактну мобилну целину. Овакво решење сушаре омогућава да се комплетна сушара транспортује до места рада, као и брзо и лако превођење из транспортног у радни положај. вертикалне осе. На приколици је уграђена са задње стране телескопска завојна дизалица са малим точком који је окретан око вертикалне осе. Помоћу ових уређаја платформа приколице са сушаром може да се подигне или спусти на висину која одговара оптималном углу радног положаја пријемника. (једна

варијанта када се користи просечна вредност угла нагиба пријемника за дату локацију, друга варијанта подразумева решење са уграђеном хидрауличном дизалицом испод комре за сушење и подизањем само сушаре, када се жели пратити путања Сунца). Такође помоћу предњег точка могу се заокретањем приколице довести пријемници у најповољнији положај у односу на угао простирања сунчевог зрачења у зависности од доба дана и дате локације. Ове могућности су веома важне када је у питању максимално искоришћење соларне енергије и укупни степен искоришћења рада сушаре. Соларни пријемници за загревање ваздуха су постављени бочно са стране сушаре и зглобно су везани за рамску конструкцију коморе за сушење, тако да се могу обртати око зглобне везе и окретањем поставити у вертикалну раван. Овим окретањем пријемници се могу подићи и фиксирати у вертикални положај ради транспорта, а такође и спустити на одговарајући угао, од 40° , испод хоризонтале. За обезбеђење електричне енергије за погон електромотора вентилатора који обезбеђују кретање агенса сушења користе се два фотонапонска модула који су постављени такође бочно на зиду коморе за сушење и на нагнутој површи крова и чији нагиб се може да мења зависно од потреба. Доњи PV модул се пре транспорта спушта у вертикални положај који је, паралелан зиду коморе за сушење. На задњем делу приколице уграђене су две акумулаторске батерије, које су редно везане, тако да се на излазним половима добија потребан напон са којим се напајају електро мотори за погон вентилатора. Поред акумулатора уграђен је разводни орман у који су смештени инструменти даљинских термометара и целокупна разводна електро инсталација са исправљачем за пуњење акумулатора. На улазу у комору за сушење уграђен је специјални вентил са клапном који посредством гасног термометра врши мешање секундарног ваздуха (ваздуха из изолационог простора) са загрејаним ваздухом из колектора, одржавајући при томе захтевану режимску температуру на улазу у комору за сушење. Давачи термометра уграђени су тако да може да се контролише стање температуре загрејаног ваздуха, агенса сушења, на улазу у комору за сушење.

На страни сушаре где се обављају операције пуњења и пражњења, конструисана је платформа са степеником која обезбеђује довољно простора за

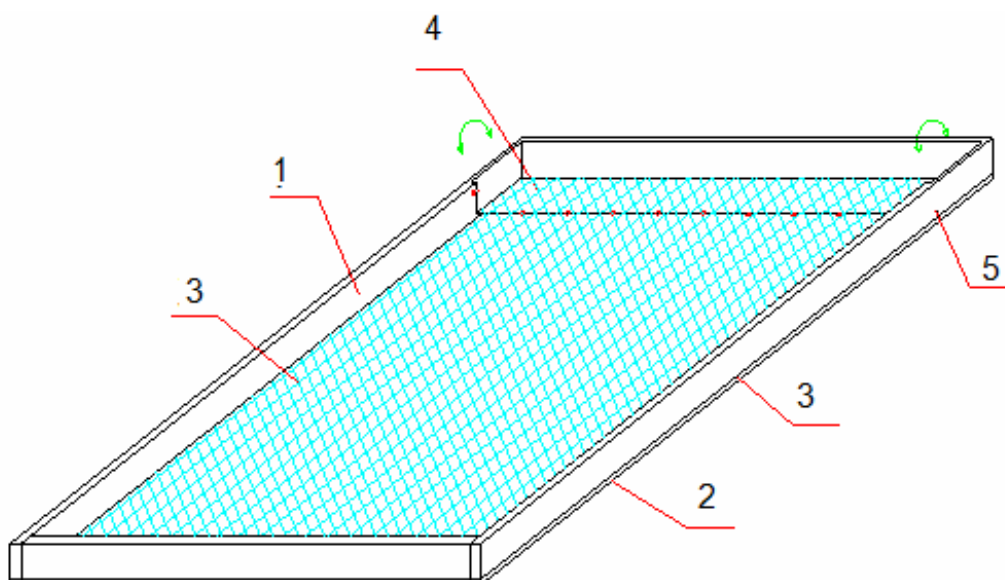


Сл.10. Покретна, универзална, еколошка, коморна соларна сушара за сушење биолошких материјала

1. комора за сушење, 2. таве, 3. пријемник соларне енергије, 4. систем за промену положаја пријемника соларне енергије, 5. фото панели, 6. вентилатор за струјање агенса сушења, 7. систем за излаз израђеног агенса сушења, 8. врата, 9. платформа за пуњење и пражњење сушаре, 10. акумулаторске батерије, 11. осовина 12. задни систем за промену

несметан рад, а може помоћу зглобне везе да се скупи приликом транспорта. Такође на приколици су постављени елементи за постављање цераде да би сушара могла да се заштити, према потреби, од временских прилика.

Таве су израђене од два дрвена рама, сл.1.11., (Торић и други 2005), између којих је постављена метална мрежа (перфорирана површ) на коју се поставља материјал. Да би се обезбедила могућност комбинованог дејства агенса сушења на материјал који се суши, што значи истовремено прострујавање и омивање, могуће је део таве у дужини од 50 mm направити са зглобном везом тако да део мреже може према потреби заузети вертикални или хоризонтални положај, или о постави преграду по ширини таве. Таве се својом дужом ивицом ослањају на дрвене носаче учвршћене за бочне зидове коморе за сушење.



Сл.1.11. Тава за смештај материјала

1. Горњи рам, 2. Доњи рам, 3. Мрежа, 4. Обртни део мреже, 5. Оквир

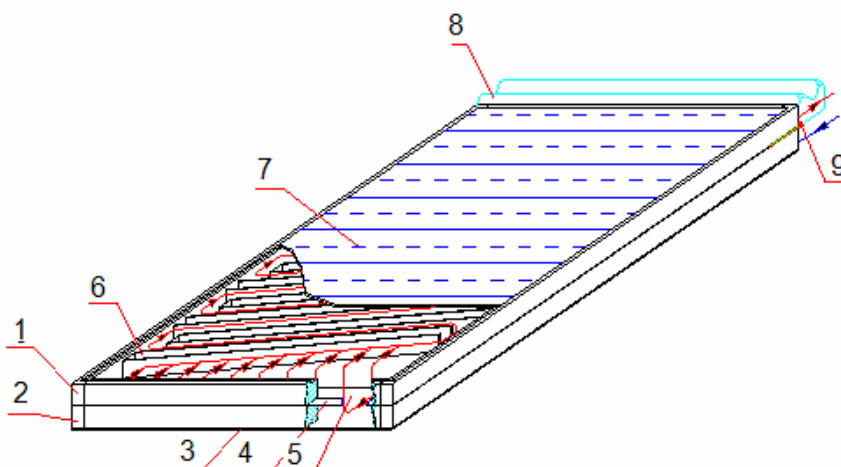
На основу броја и димензија тава и њиховог распореда (препоручених међусобних растојања по висини) у комори за сушење дефинисане су габаритне димензије коморе за сушење а на тај начин и сушаре у целини.

У циљу смањења преноса топлоте кроз граничне површине коморе за сушење у околину усвојена је одговарајућа конструкција зидова, крова, пода и врата. Зидови сушаре су изведени од дрвених облога, дебљине 21 mm са унутрашње стране, слоја ваздуха у средини и алумунијумског лима, дебљине од

1mm, са спољне стране. Ваздух који се налази у каналу зида сушаре се користе и за регулисања температуре агенса сушења у процесу рада сушаре. Задњи зид коморе за сушење, зид изнад соларног пријемника, је изведен као рефлектујућа површ, чиме се повећава дејство сунчевог зрачења на апсорпциону површ пријемника. Унутрашње димензије коморе за сушење, једног модула, су 800x1000x1200 mm (ширина x дужина x висина). Кров, под и врата коморе за сушење су такође изведена са ваздушним простором.

Дефинисање равнoг соларног пријемника за загревање ваздуха

Равни соларни пријемник, сл.1.12., (Торић и други 2005), се користи за загревање ваздуха околине у циљу добијања агенса сушења. Кућиште соларног пријемника чине два



Сл.1.12. Конструкција равнoг пријемника соларне енергије

1. Горњи рам, 2. Доњи рам, 3. Под, 4. Апсорбер, 5. Загрејан агенс сушења, 6. Испуна пријемника, 7. Транспарент, 8. Еластични уводник, 9. Улаз свежег ваздуха

дрвена рама. Габаритне димензије једног пријемника су 134x868x1268 mm. Апсорбер је од ребрaстог лима алуминијума дебљине 1 mm премазан црном мат бојом. Димензије апсорбера су 800x1234 mm и дефинисане су на основу укупног термичког флукса потребног за обављање процеса сушења (статички прорачун дат у проширеном елаборату). Покривач пријемника од два дела, канала висине око 50 mm. Кроз отвор на доњем каналу, по целој ширини, се помоћу вентилатора

постављеног на врху сушаре увлачи свежи ваздух који омивајући доњу страну апсорбера, се загрева хладећи лим. На другом крају пријемника улази у горњи канал и омивајући горњу страну апсорбера и унутрашњу структуру пријемника се додатно загрева а затим улази у комору за сушење кроз отвор по целој ширини. Брзина струјања агенса сушења кроз горњи канал соларног пријемника је око 1 m/s. На крају пријемника супротно од сушаре је постављен штап помоћу којег се контролише оптималан положај пријемника.

*Дефинисање, димензионисање и избор соларног PV модула,
фотоволтаика*

За рад сушаре предвиђена су два PV модула. Сваки PV модул осим што даје енергију за рад електромотора једносмерне струје у трајању од 10 h када има Сунчеве енергије врши и пуњење акумулаторских батерија, уствари допуњавање у току за наредних 14 h када раде само вентилатори и обезбеђују проток ваздуха у сушари и када нема сунчевог зрачења и када се ваздух не загрева у колектору. Овим се обезбеђује да не дође до кварења материјала у периоду када нема сунчевог зрачења. Капацитет акумулаторске батерије (потпуно напуњене) омогућава да вентилатори раде 5 дана (5 x 24 h) када нема сунчевог зрачења.

2. Теоријска анализа

2.1. Пренос топлоте и материје

Најстрожији начини описа процеса сушења се заснивају на изучавању термодинамике неповратних процеса, (Кей, 1983, Coumans 2000), сагласно којем се различити протоци узимају управо пропорционално одговарајућем потенцијалу. Влага се може да нађе у три агрегатна стања. Биланси маса при преносу у границама сваког стања се могу написати помоћу протока влаге J_u , који доводе до њеног повећања или смањења у телу I_i :

$$\frac{\partial(\rho_m \cdot u_i)}{\partial \tau} = -\text{div}J + I_i, \quad (2.1)$$

Аналогно се могу написати и биланси топлоте, енергије:

$$c_m \cdot \rho_m \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = -\text{div}J_Q + \sum_i^3 h_i \cdot I_i, \quad (2.2)$$

где је: J_Q - топлотни проток, а h_i - специфична енталпија у одређеном стању.

Ова разматрања омогућавају добијање сложених парцијалних диференцијалних једначина за поља влажности и температурае. Осим тога ова решења укључују коефицијенте преноса, који се одређују експериментално и који зависе од влажности.

Модел преноса у порозној средини

Мање апстрактан али знатно простији приступ састоји се у опису процеса сушења са аспекта дифузије паре и кретања течности под дејством гравитационих и капиларних сила у порозној структури. Први је разрадио овај модел Krishcer 30 тих година прошлог века.

Физичка слика, сходно математичком опису, представља процес премештања влаге ка површини у виду капиларног кретања течности, које је

условљено градијентом влажности, а такође дифузијом паре кроз слободне од течности поре под дејством градијента притиска између течности и паре.

Рачунске криве сушења имају обично очекиван експериментални облик: почетни период нестабилне брзине сушења, поступно прелазећи у период константне брзине сушења, а затим у период опадајуче брзине сушења.

Дужина трајања периода константне брзине сушења зависи од број Lu , а то значи од карактера унутрашњег преноса течности. Све дотле док ово кретање течности одговара испаравању с површи тела траје први период сушења.

У почетном периоду сушења може да се јави повећање или смањење брзине сушења као последица промене температуре површи, које је изазвано дисбалансом између количине топлоте која се преноси унутар тела и топлоте неопходне за испаравање на површи.

Упрошћени модели

Сви описани модели подразумевају провођење сложених прорачуна и не могу се користити у инжењерској пракси. При практичним прорачунима треба користити простије начине. У те сврхе се користе модели: оквашене површи и продируће равни.

Модел оквашене површи

Темељи се на чињеници да се брзина сушења смањује захваљујући смањеној површине оквашене површи. Следи да са тог аспекта релативна брзина сушења одговара оквашеном делу површи. У првом приближењу површина испаравања се мења са квадратом еквивалентне дужине овлаженог дела, тако да ће се концентрација влаге мењати са трећим степеном од дужине.

Тада је:

$$f = u^{\frac{2}{3}} \quad (2.3)$$

Ако се узме у обзир да површ испаравања продира унутар тела, експонент при карактеристичној влажности ће бити нешто мањи.

Израз за карактеристичну брзину је:

$$f = u^n, 0 < n < \frac{2}{3}, \quad (2.4)$$

где се експонент n одређује емпиријски.

Модел продируће површи испаравања

Сушење неких материјала показује да после завршетка почетног периода сушења се јављају две јасно изражене термичке области. При продирању површи испаравања настаје опадање температуре од вредности сувог термометра до вредности влажног термометра. Ова вредност температуре се одржава унутар тела. Модел продируће површи предпоставља, да влага испарава у оштро израженој зони испаравања, која постепено продире са сушењем тела и затим путем дифузије у облику паре иде ка слободној површини.

За једнодимензиони случај поље влажности је дефинисано изразом:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = D_e \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{k}{x} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \right), \quad (2.5)$$

где је $k = 0$, за плочу; $k = 1$ за цилиндар и $k = 2$ за сферу.

Сви модели за дефинисање кинетике процеса сушења се могу поделити на: опште моделе; обједињене моделе дифузије и моделе са променом границе промене фазе.

Општи модели су (Coumans 2000):

- Равнотежни модел сушења;
- Модел карактеристичне криве сушења

Обједињени модели дифузије су:

- Модел константне вредности ефективне дифузивности влаге
- Модел измерених средњих вредности ефективне дифузивности влаге
- Модел дифузије по експоненцијалној зависности
- Модел анализа регуларног режима или Schoeber's приступ
- Модел сличности профила влажности

- Модел количника флукса
- Ригорозни нумерички модел

Модели промене границе испаравања су:

- Модел униформног повлачења границе испаравања (МУПГИ);
- Yoshida модел

Даље је направљен покушај да се објасни суштина постојећих модела за други период сушења.

Неки од ових модела такође омогућују процену одступања од експерименталних кривих сушења за слојеве у зависности од влажности.

За изотермно сушење плоче од порозног и непорозног материјала дат је преглед (апроксимативних) модела за карактеризацију и опис кинетике сушења. За сада још увек није могуће просудити практичну употребљивост и поузданост ових модела. Већи део њих је развијен путем компјутерских симулација. Међутим, праве и темељне експерименталне потврде су ретке.

Kerkof је проучавао неколико модела кинетике сушења при симулацији процеса у флуидизованом слоју биоматеријала и уочио неприхватљива одступања у поређењу са „тачним“ понашањем. Приметио је да најприближнији модели нису у стању да на коректан начин дају податке за не-нулте и временски зависне граничне услове.

Генерално, постоји потреба за још експерименталних потврда и за установљење корисности апроксимативних метода у преовлађујућим моделима за индустријско сушење. Ово би требало урадити за много различитих материјала у циљу одређивања критеријума за одлучивање о томе који апроксимативни модел треба преферирати у датој ситуацији и стимулисати даљи развој.

Како је детаљно објашњено у овом раду експерименти са сушењем плоча (~3mm дебљине) коришћени су за налажење карактеристике сушења за одређени материјал. За случај угљоводоничних раствора, на пример, ова информација се може користити за описивање појава сушења капљица (~0,1 mm у пречнику) у спреј сушарама, или у случају концентрата растопине глине за описивање понашања глинене форме (величине ~100 mm) у комори за сушење. Није на располагању много информација о тачности добијених кинетика сушења за случајеве повећања, смањења и различитих геометрија тела које се суши. Не зна

се такође како добро или како лоше ће ови модели функционисати у реалној пракси сушења, како за пројектовање, контролу тако и потребе оптимизације.

Обично су криве сушења монотono опадајуће функције времена. И у случају изузетног слагања између експеримента и модела, и даље то не казује ништа о тачности модела. Није тешко описати монотono опадајућу функцију, јер пуно дво параметарских функција могу да за то послуже. Препоручује се да, за апроксимативне моделе за које је потребна априори информација о типу дифузионе релације $D=D(m)$, буду обезбеђене физичке информације у већем обиму. Овај закључак је истакнут од стране Ketelarsa и других који су указали на одступања између дифузивности добијених из профила влаге и кривих сушења.

Ради достизања бољих и валидних апроксимативних метода за кинетику сушења, данас постоје три моћна алата на располагању. Прво, стално растућа брзина компјутера, постојање добрих симулација на основу софистицираних и физички заснованих модела. Друго, технике НМР - имиџинга које омогућују да се детаљно скенира тренутна концентрација профила влаге током сушења. Скенирање профила влаге током процеса сушења даје велики број података који омогућују директно израчунавање дифузивности зависне од влаге. Шта више, ове технике такође омогућавају претпоставке које се праве у моделима, тј. појаву повлачења ивица влаге, брзину повлачења и могу открити изненађујуће информације. На пример, обично се очекује да се ивице влаге повлаче линеарно зависно од квадратног корена времена, али изненађујуће је да је Pe_1 нашао да се у циглама ове ивице крећу линеарно зависно од времена! Треће, садашња лабораторијска опрема, опремљена са различитим приручним софтверима, омогућује пораст тачности и поузданости експеримената. Такође не треба потценити експерименталне проблеме за извођење експеримента са сушењем плоча под добро дефинисаним условима.

Неки постојећи модели захтевају изводе вишег реда експерименталних података. Често је неопходно применити технике регресије и дораде ради добијања стабилних резултата.

Треба тежити ка што мањим расипањима полазних података и тако би се могли поставити високи захтеви у погледу тачности и стабилности

експерименталних техника, посебно у случајевима од влаге јако зависних дифузионих појава.

2.2. Билансирање постројења за сушење и математички модели

Разматра се соларна сушара са равним пријемником соларне енергије и дуплим транспарентом од стакла, (Торић и други 2005, Торић 2002)

Билансирање равног пријемника са ваздухом као радним флуидом

Стакло је изложено Сунчевом зрачењу. Један део ове енергије се задржава а други део бива апсорбован од стране површи апсорбера. Кроз стакло, пренос енергије се остварује кондукцијом.

На основу топлотног биланса могуће је написати следеће једначине:

- за спољашњи транспарент од стакла:

$$\frac{m_s c_s}{S} \left(\frac{dT_{ss}}{d\tau} \right) = P_{dir} + \alpha_{zsi} (T_i - T_{ss}) + \alpha_{s,o} (T_o - T_{ss}) + \lambda_s (T_{su} - T_{ss}) \quad (2.6)$$

- за унутрашњи транспарент од стакла:

$$\frac{m_s c_s}{S} \left(\frac{dT_{su}}{d\tau} \right) = \alpha_{zs,a} (T_a - T_{su}) + \alpha_{s,a} (T_a - T_{su}) + \lambda_s (T_{ss} - T_{su}) \quad (2.7)$$

Површ апсорбера прима дозрачену енергију. Један део иде на загревање и ту је пренос енергије конвекцијом и зрачењем; са стаклом, конвекцијом и са радним флуидом зрачењем.

$$\frac{m_a c_a}{S} \left(\frac{dT_a}{d\tau} \right) = \alpha_{sa} (T_{su} - T_a) + \alpha_{zs,a} (T_{su} - T_a) + \alpha_{zai,z} (T_{iz,u} - T_a) + \alpha_{ps} (T^* - T_a) + P_{dif} \quad (2.8)$$

Агенс сушења се креће између апсорбера и слоја изолације кућишта пријемника, што омогућава његово загревање:

$$\dot{m}_c c_{pv} (T - T^*) = S \alpha_{f,a} (T_a - T^*) + S \alpha_{f,izu} (T_{izu} - T^*) \quad (2.9)$$

Слој изолације добија енергију зрачењем од површи апсорбера и конвекцијом од радног флуида. Део ове енергије се задржава а други део се преноси, и то зрачењем и конвекцијом у спољну средину у унутрашњост изолационог слоја конвекцијом:

Биланс топлоте:

- за изолациони слој, унутрашња површ:

$$\frac{m_{iz} c_{iz}}{S} \left(\frac{dT_{izu}}{d\tau} \right) = \alpha_{aiz} (T_a - T_{izu}) + \alpha_{f,izu} (T^* - T_{izu}) + \lambda_{iz} (T_{izs} - T_{izu}) \quad (2.10)$$

- за изолациони слој, спољашња површ:

$$\frac{m_{iz} c_{iz}}{S} \left(\frac{dT_{izu}}{d\tau} \right) = \lambda_{iz} (T_{izu} - T_{izs}) + \alpha_{zio} (T_{io} - T_{izs}) + \alpha_{s,o} (T_o - T_{izs}) \quad (2.11)$$

где су P_{dir} и P_{dif} су флуксеве на рачун директног и дифузног Сунчевог зрачења, при чему се флукс на рачун дифузног зрачења, може изједначити са флуksom директног зрачења под углом дејства од 60° .

Билансирање коморе за сушење

У комори за сушење се обавља пренос топлоте између агенса сушења, материјала који се суши и унутрашњих површи зидова коморе за сушење:

$$\dot{m}_{as} c_v (T_{as}^* - T_{as}) = \alpha_{as,m} S_m (T_{as} - T_m) + 4 \alpha_{as,pu} S_s (T_{as} - T_{pu}) \quad (2.12)$$

Материјал који се суши добија енергију од агенса сушења, један део енергије се користи за загревање материјала а други део за испаравање влаге у

(* представља главну таву).

влажном материјалу:

$$m_m c_m \left(\frac{dT_m}{d\tau} \right) = \alpha_{as,m} S_m (T_{as} - T_m) - P_i \quad (2.13)$$

Пренос топлоте на унутрашње површи зидова коморе за сушење је конвекцијом и кондукцијом, док спољне површи зида добијају топлоту конвекцијом и зрачењем.

Биланс топлоте:

- за зид од цигли, унутрашња страна:

$$m_{pz} c_{pz} \left(\frac{dT_{pz}}{d\tau} \right) = \lambda_{zc} S_s (T_p - T_{pu}) + \alpha_{as,pu} S_s (T_{as} - T_{pu}) \quad (2.14)$$

Пренос топлоте између површи зида од цигли и зида од пластичног материјала:

$$m_{pp} c_{pp} \left(\frac{dT_p}{d\tau} \right) = \lambda_{pz} S_s (T_{pz} - T_{pzs}) = m_{pb} c_{pb} \left(\frac{dT_p}{d\tau} \right) + \lambda S_s (T_{pz} - T_{pzu}) \quad (2.15)$$

- за зид зида од пластичног материјала, спољна страна:

$$m_{pz} c_{pz} \left(\frac{dT_{pzs}}{d\tau} \right) = \lambda_{pz} S_s (T_{pz} - T_{pzs}) + \alpha_{o,pzs} S_s (T_o - T_{pzs}) + \alpha_z S_s (T_c - T_{pzs}) \quad (2.16)$$

Топлотни флуks неопходан за испаравање

$$P_i = \dot{L} r \frac{du}{d\tau} \quad (2.17)$$

Биланс влаге је:

$$(x_{asu} - x_{as}) \dot{L}_{as} = k(u - u_k) \dot{L} \quad (2.18)$$

2.3. Математички модели процеса сушења у решењима за коришћење соларне енергије

Математички модел равног пријемника соларне енергије

Дефинисање термичке снаге равног соларног пријемника, (Торић 2003)

Укупни топлотни флуks за процес сушења, који је потребно обезбедити пријемником соларне енергије, чија вредност је дефинисана статичким прорачуном је:

$$\dot{Q}_{spas} = \dot{m}_w \cdot q, \quad (2.19)$$

Једначина која дефинише топлотни биланс соларног пријемника, која узима у обзир топлотни флуks апсорбован радном површином површи пријемника, топлотни флуks који се преда радном флуиду (корисни флуks), топлотни флуks акумулиран соларним пријемником и топлотни флуks који се преноси у околину је:

$$\dot{Q}_{spa} = \dot{Q}_{spzas} + \dot{Q}_{spg} + \dot{Q}_{spak} \quad (2.20)$$

Топлотни флуks апсорбован радном површином површи пријемника соларне енергије је:

$$\dot{Q}_{spa} = [H_{dif} (\tau\alpha)_{dif} + H_{dir} (\tau\alpha)_{dir}] \cdot F_{sp} \quad (2.21)$$

Топлотни флуks који се преда радном флуиду, ваздуху из околине (користан топлотни флуks) за задату температуру загревања ваздуха је:

$$\dot{Q}_{spzas} = c_{pasas} \cdot \dot{L} \cdot \Delta t \quad (2.22)$$

Прорачун потребне површине апсорпционе површи соларног пријемника

Да би се према топлотном билансу пријемника дефинисала површина апсорпционе површи пријемника неопходно је дефинисати вредности топлотних флуксева \dot{Q}_{spg} и \dot{Q}_{spak} , који зависе у знатном степену од конструктивних особина конкретног решења соларног пријемника. Међутим у фази пројектовања може се користити израз за коефицијент корисног дејства соларног пријемника дефинисан изразом:

$$\eta_{sp} = \frac{\dot{Q}_{spzas}}{\dot{Q}_{spa}}. \quad (2.23)$$

Решавајући једначину (2.23) имајући у виду изразе (2.21) и (2.22) потребна површина апсорпционе површи соларног пријемника је:

$$F_{sp} = \frac{\dot{Q}_{spzas}}{[H_{dif}(\tau\alpha)_{dif} + H_{dir}(\tau\alpha)_{dir}] \cdot \eta_{sp}}. \quad (2.24)$$

Масени проток агенса сушења је:

$$\dot{L} = \frac{m_2 \cdot (y_1 - y_2)}{\Delta x \cdot \tau_s \cdot (1 - y_1)}, \quad (2.25)$$

где је $\Delta x = \frac{W}{L}$.

Израз за радну површину пријемника показује да вредност површине зависи од параметара материјала који се суши, саме конструкције пријемника и климатских и временских услова. Захваљујући овоме могуће је извршити анализу утицаја на вредност површине пријемника врсте културе која се суши, због жеље да се више култура суши у истој сушари, конструкције пријемника и временских услова и упоредити те утицаје.

Нови израз за дефинисање површине апсорпционе површи соларног пријемника се добија уношењем изрази (2.25) у израз (2.22) и тако добијеног изрази у израз (2.24).

Површину апсорпционе површи пријемника је могуће одредити и према изразу:

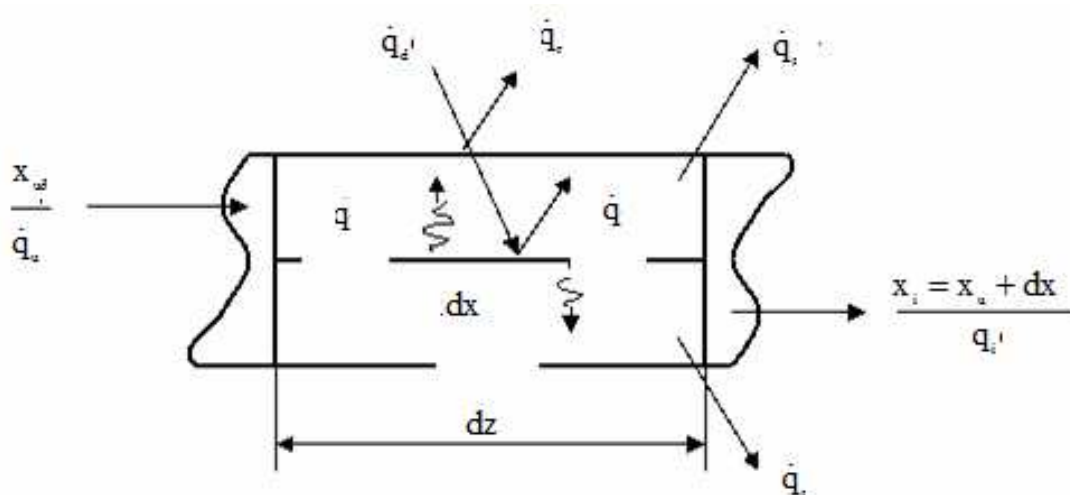
$$F = \frac{\dot{m}_{asom} \cdot \dot{m}_g}{n \cdot \dot{m}_{aspp}} \quad (2.26)$$

Ако је познат, годишњи принос, количина осушеног материјала, \dot{m}_g , маса агенса сушења по јединици површине апсорпционе површи пријемника \dot{m}_{asom} , и проток агенса сушења по јединици масе осушеног материјала \dot{m}_{aspp} , као и број култура n које се на газдинствима могу сушити једном сушаром могуће је одредити површину апсорпционе површи пријемника.

Помоћу дефинисаног математичког модела може се извршити оптимизација са аспекта утицаја на вредност површине пријемника, врсте материјала који се суши, конструкције пријемника и услова околине.

2.2.1. Математички модел процеса сушења у соларним радијационим сушарама

Посматра се елементарна запремина соларне сушаре дате на сл. 2.1., (Vukojević 1998), а такође и укупни биланси топлоте, влаге и импулса посматране елементарне запремине у којој се појављује променљиви дозрачени термички флуks соларне



Сл. 2.1. Елементарна запремина соларне сушаре.

енергије због чега се у изразима за пренос материје и топлоте мора узети периодичност промене термичког флукса.

Да би се решио постављени задатак уводе се следеће претпоставке:

- влажан ваздух се посматра као нестишљив флуид,
- зависност термичких својстава влажног ваздуха од температуре се узима преко зависности густине од температуре,
- процес испаравања у слоју материјала се сматра изотермским,
- пренос влаге у попречном пресеку се занемарује,
- промене параметара спољашњег ваздуха (околине) флукса соларне енергије у процесу сушења једне партије се занемарује.

Уз ове претпоставке, размену материје и топлоте у процесу сушења материјала у соларним радиационим сушарама је могуће описати следећим системом једначина:

Биланс енергије за материјал:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{a_{as} \cdot \dot{q}(\tau)}{c_m \cdot V_m \cdot \rho_m} - \frac{r}{c_m \cdot V_m \cdot \rho_m} \cdot \frac{dm_{wsr}}{d\tau} - \frac{2 \cdot n \cdot \alpha_m}{c_m \cdot V_m \cdot \rho_m} [\theta(z) - T(z)] \quad (2.27)$$

Биланс енергије за ваздух:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + v \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{2 \cdot n \cdot \alpha_m}{c_p \cdot \rho \cdot h} [\theta(z) - T(z)] - k \frac{T(z) - T_0}{c_p \cdot \rho \cdot h} \quad (2.28)$$

Биланс влаге у ваздуху:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + v \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{dm_{wsr}}{d\tau} \quad (2.29)$$

У вези са дневним и ноћним флуksom соларне енергије и параметара спољнег ваздуха, крива сушења материјала представља криву промене брзине сушења у зависности од времена (дан и ноћ), узимајући у обзир променљивост флукса параметара спољнег ваздуха. За влажност осушеног материјала потребно

је испитати само дневну променљивост. Вишак влаге материјала у поређењу са успостављеном вредношћу влажности се одређује изразом:

$$m_{w1}(\tau) = m_w(\tau) - m_{wu}(\tau) \quad (2.30)$$

Узимајући у обзир периодичност промене соларне енергије, температуре и влашности ваздуха, вредност $m_{wu}(\tau)$ се може представити у следећем облику:

$$m_{wu}(\tau) = m_w \exp[\varphi(t)] \quad (2.31)$$

где је $\varphi(t)$ - периодична функција са периодом 24 х.

Промена влаге мора да трпи периодично осциловање у процесу његовог смањења, зато је могуће $m_{w1}(\tau)$ дефинисати изразом:

$$m_{w1}(\tau) = m_{w0} \exp[-f(\tau) + g(\tau)] \quad (2.32)$$

где је $f(\tau)$ - неограничена опадајућа функција,

$g(\tau)$ - периодична функција са периодом 24 h.

Уношење израза (2.30), (2.31) у (2.29) и решавањем израза за $m_w(\tau)$, добија се:

$$m_w(\tau) = m_w \exp[\varphi(t)] + m_{w0} \exp[-f(\tau) + g(\tau)] \quad (2.33)$$

Коефицијент сушења као мера периодичности флукса соларне енергије може се дефинисати изразом:

$$k_s = -\frac{dm_{w1}(\tau)}{d\tau} \cdot \frac{1}{m_{w1}(\tau)} \quad (2.34)$$

и представља релативну брзину промене вишка влаге материјала.

У том случају брзина сушења има облик:

$$\frac{dm_{wse}}{d\tau} = -(k_0 \cdot m_{wu} + k_s \cdot m_{w1}) \quad (2.35)$$

где је:

$$k_0 = -\frac{dm_{wu}}{d\tau} \cdot \frac{1}{m_{wu}} \quad (2.36)$$

кофицијент који зависи од периодичности промена успостављене влажности материјала.

При оцени коефицијента у једначини преноса импулса добијено је да је однос карактеристичног времена промене температурског поља и карактеристичног времена промене брзинског поља 10 - 7, што даје могућност да у реалним условима количина кретања има облик у случају стационарног режима:

$$\xi \frac{u^2}{2 \cdot g} = \beta_t \cdot \sin m[\theta - T_0] \int_0^L \frac{T - T_0}{\theta - T_0} dz \quad (2.37)$$

У случају принудног кретања агенса сушења у соларној сушари за решавање полазног система диференцијалних једначина, израз (2.37), се не користи пошто је брзина ваздуха у датом случају константна величина.

Гранични услови за дати систем диференцијалних једначина су:

- за $z = 0$. $u = u(\tau)$, $T = T(\tau)$;

Почетни услови:

- за $\tau = 0$. $u = u(z)_p$, $T = T(z)_p$, $\theta = \theta(z)_p$, $m_w = m_{w0}(z)_p$;

Добијени систем диференцијалних једначина представља математички модел размене топлоте и материје у процесима сушења материјала који узима у обзир нестационарност дозрачене енергије, чије решење омогућује дефинисање високо ефективне конструкције соларне сушаре за сушење материјала.

2.2.2. Математички модел процеса сушења у соларној сушари

Анализа математичких модела процеса сушења, дефинисаних од стране различитих аутора, који се појављују у литератури показује следеће, (Торић и други 2005):

- не узимају се у разматрање оба периода сушења (први и други период), без обзира на врсту, карактеристике и стање материјала који се суши,
- не прави се разлика између апсолутно сувог и осушеног (сувог) материјала, влаге садржане у материјалу и издвојене влаге у процесу сушења,
- не узима се у обзир топлотни флуks неопходан за прегревање паре која испари у процесу сушења,
- губи се из вида да се материјал не суши до равнотежне вредности влажности, стања апсолутно сувог материјала, што значи да вредности температура материјала и агенса сушења на излазу из сушаре нису исте.
- не прави се разлика да ли је влага у течном или гасовитом стању,
- неадекватно се дефинишу полазни параметри материјала и агенса сушења,
- занемарују се "губици" топлотног флуksа у околину, без образложења.

Модел сушења биолошких материјала соларном енергијом, у ширем смислу, обухвата више једначина и израза.

Топлотни флуks потребан за загревање агенса сушења се дефинише зразом:

$$\dot{Q}_{spzas} = \dot{Q} = a \cdot \sum F_{sp} \cdot \dot{Q}_{sz} = a \cdot \sum F_{sp} \cdot (\dot{Q}_{szh} / \cos \theta), \quad (2.38)$$

С друге стране је :

$$\dot{Q}_{spzas} = \dot{L}_{asas} \cdot c_{pasas} \cdot (t_{asi} - t_{asu}). \quad (2.39)$$

Да би се дефинисао математички модел, процеса сушења, потребно је написати одговарајуће диференцијалне једначине, које описују промену: садржаја влаге (апсолутне влажности) и температуре материјала који се суши агенса сушења (влажног ваздуха) и уделе паре у агенсу сушења.

Поменуте диференцијалне једначине се базирају на познатим законима о одржању масе и енергије за фазе које учествују у процесу. Топлотни флуks агенса сушења се расподељује на загревање влажног материјала који се суши, испаравање дела влаге која је садржана у материјалу, прегревавање испареле влаге и савлађивање губитака у околину кроз граничне површине коморе за сушење.

Математички модел се дефинише за процес сушења материјала у непокретном слоју (уз одређене претпоставке) који се прострујава или омива агенсом сушења..

Једначина енергије (топлотни биланс) за материјал који се суши је:

$$d\dot{Q}_{zvm} + d\dot{Q}_{id} + d\dot{Q}_{pd} - d\dot{Q}_{zw} = d\dot{Q}_{spas} = d\dot{Q}_{as} \quad (2.40)$$

ИЛИ

$$m_{asm} \cdot (c_{asm} + c_w \cdot u) \cdot \frac{d\theta}{d\tau} + r_i \cdot m_{asm} \cdot \frac{du}{d\tau} + m_{asm} \cdot \frac{du}{d\tau} \cdot c_{pd} \cdot t_d - m_{asm} \cdot \frac{du}{d\tau} \cdot c_w \cdot \theta_i + \\ + \sum k_{gpi} \cdot F_{gpi} \cdot \Delta t_{sri} = \alpha_{sr} \cdot (t_{as} - \theta) \cdot dF + N_{PV} \quad (2.41)$$

Једначина преноса материје за материјал који се суши је:

$$m_{asm} \cdot \frac{du}{d\tau} = M_d \cdot \beta \cdot \frac{\chi_{as} - \chi_F}{1 - \chi_F} \cdot F, \quad (2.42)$$

где је: $\chi_F = \frac{p}{p_b}$, $\chi_{as} = \frac{p_{as}}{p_b}$.

Једначина енергије за агенс сушења је:

$$d\dot{Q}_{zas} = -d\dot{Q}_{spas} \quad (2.43)$$

или

$$m_{asas} \cdot (c_{asas} + c_w \cdot x_{as}) \cdot \frac{dt_{as}}{d\tau} = -\alpha_{sr} \cdot (t_{as} - \theta) \cdot dF \quad (2.44)$$

Једначина преноса материје за агенс сушења је:

$$m_{asas} \cdot \frac{dx}{d\tau} = -\dot{m}_{asm} \cdot \frac{du}{d\tau} \quad (2.45)$$

Неопходно је такође дефинисати коефицијент прелажења материје β . Систем од 4 диференцијалне једначине садржи 5 непознатих: температура материјала θ и агенса сушења t_{as} ; моларни удео паре у агенсу сушења χ_{as} и на површини материјала χ_F ; апсолутне влажности материјала u .

Систем се затвара тако што се: при већој влажности материјала од максималне хигроскопне при десорпцији узима да је притисак паре на површини материјала једнак притиску засићења p'_d који се дефинише изразом:

$$p_{d'} = f(\theta) \quad (2.46)$$

За влажности материјала мање од максималне хигроскопне за описивање равнотеже користи се аналитички израз за изотерму десорпције (Henderson, BET итд)

$$u_r = f(\varphi, T). \quad (2.47)$$

Брзина сушења у периоду опадајуће брзине сушења је дефинисана изразом:

$$\frac{du}{d\tau} = -k \cdot (u - u_r). \quad (2.48)$$

За дефинисање коефицијента сушења k у изразу за брзину сушења постоји више израза, једна од њих и израз Архениуса (дат за одређен материјал):

$$k = 0,6854 \exp\left(\frac{-33161}{\theta + 273,15}\right). \quad (2.49)$$

Веза између релативне и апсолутне влажности агенса сушења је:

$$x = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p'_d}{p - \varphi \cdot p'_d}. \quad (2.50)$$

Решавање наведених диференцијалних једначина омогућава дефинисање кинетике сушења, што значи криве сушења, криве брзине сушења и температурске криве при сушењу материјала у густом непокретном слоју.

Могућности модела

Пошто је брзина струјања агенса сушења дефинисана изразом:

$$v_{as} = \frac{dh}{d\tau}, \quad (2.51)$$

уношењем израза за брзину у горе наведене диференцијалне једначине добијају се адекватни изрази:

- израз за једначину енергије за материјал који се суши:

$$\rho_{asm} \cdot (c_{asm} + c_w \cdot u) \cdot \frac{d\theta}{d\tau} + r_i \cdot \rho_{asas} \cdot v_{as} \cdot \frac{dx}{dh} + \rho_{asas} \cdot v_{as} \cdot \frac{dx}{dh} \cdot c_{pd} \cdot t_d - \rho_{asas} \cdot \frac{dx}{d\tau} \cdot c_w \cdot \theta_i + \sum k_{gpi} \cdot F_{gpi} \cdot \Delta t_{sri} = \alpha_{sr} \cdot (t_{as} - \theta), \quad (2.52)$$

- израз за једначину енергије за агенс сушења:

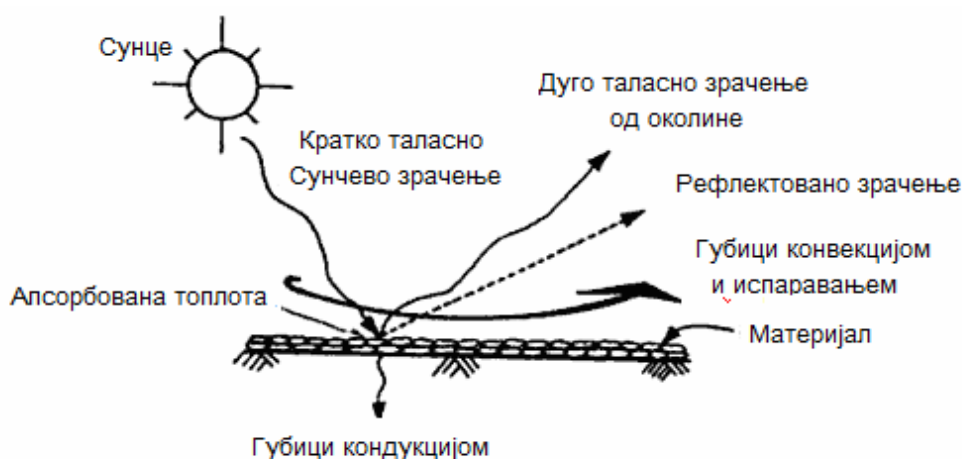
$$\rho_{asas} \cdot v_{as} (c_{asas} + c_w \cdot x_{as}) \cdot \frac{dt_{as}}{dh} = -\alpha_{sr} \cdot (t_{as} - \theta). \quad (2.53)$$

- израз за једначину преноса материје:

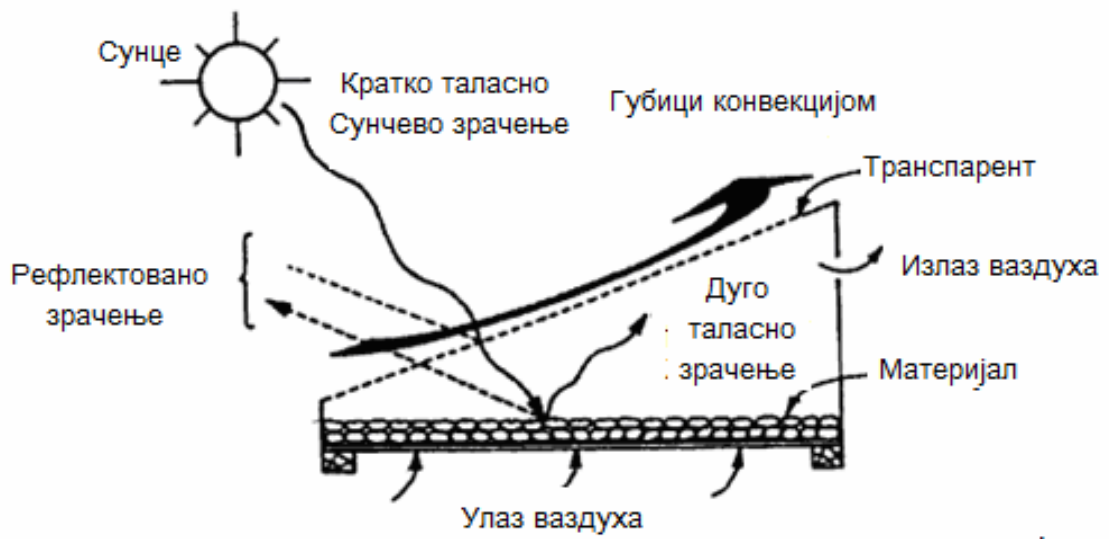
$$\frac{dx}{dh} = -\frac{\rho_{asm}}{\rho_{asas} \cdot v_{as}} \cdot \frac{du}{d\tau}. \quad (2.54)$$

Овај систем једначина омогућава дефинисање промене параметара материјала и агенса сушења у правцу струјања агенса сушења, при прострујавању или омивању слоја материјала.

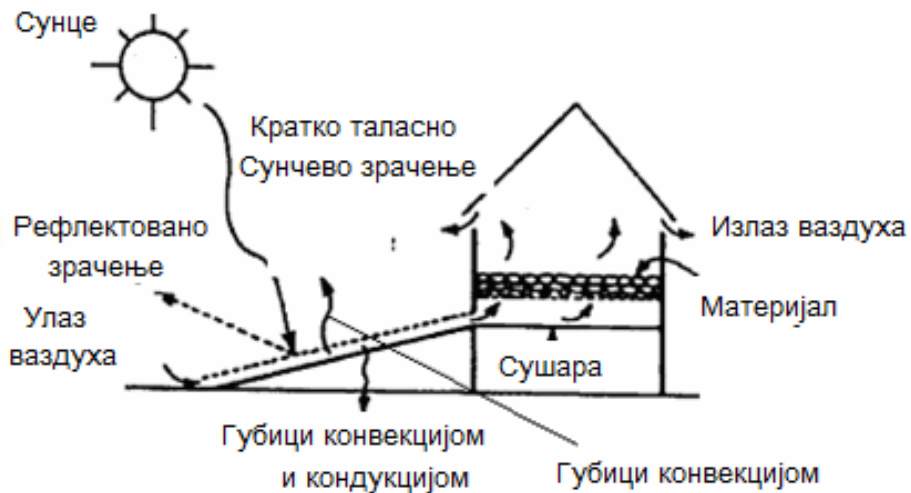
На сл.2.1., сл.2.2., и сл.2.3., су приказани графички топлотни биланси процеса сушења Сунчевим зрачењем на отвореном простору, у директној соларној сушари и у пасивној индиректној сушари.



Сл. 2.1. Биланс процеса сушења на отвореном простору, коришћењем Сунчеве енергије



Сл.2.2. Биланс процеса сушења у директној соларној сушари, коришћењем Сунчеве енергије



Сл.2.3. Биланс процеса сушења у индиректној пасивној сушари, коришћењем Сунчеве енергије

3. Математички опис процеса сушења

Моделирање процеса сушења у танком слоју материјала доприноси разумевању процеса сушења пољопривредних производа.

Модел сушења у танком слоју спадају у три категорије: теоријске, полутеоријске и емпиријске.

Теоријски приступи су засновани на једначини дифузије или симултаног загревања и једначини преноса материје.

Полутеоријски приступ се односи на коришћење апроксимативних (приближних) теоријских једначина.

Емпиријске једначине се лако примењују у симулацији сушења, пошто зависе од експерименталних података.

Између ових модела, теоријски приступи рачунају само на унутрашњи отпор преноса влаге, док полутеоријски и емпиријски приступи рачунају само на спољни отпор преноса влаге између производа и околине (агенса сушења).

Циљ је да се:

- проучи кинетика процеса сушења спанаћа у соларној конвективној, покретној, индиректној, еколошкој, активној сушари,
- одреди утицај параметара агенса сушења и материјала, који се суши на кинетику процеса сушења спанаћа,
- одреди карактеристична крива брзине процеса сушења (ККС) и
- упореде експерименталне криве сушења са 13 математичких модела из литературе
- одреде вредности ефективне дифузивности спанаћа.

3.1. Дефинисање карактеристичне, бездимензионе, релативне, условне влажности и брзине сушења

Експериментално одређивање времена трајања процеса сушења је везано за одређени материјал и услове при којима се изводи сваки експеримент, (Кей, 1983). Одређивање времена трајања процеса сушења за друге услове мора да се врши аналитички и дефинише се посебно за први а посебно за други период сушења. У принципу се полази од израза за брзину процеса сушења. Карактер одвијања

процеса сушења најпотпуније се описује кинетиком сушења што значи кривом сушења (у координатама влажност материјала – време сушења), кривом брзине сушења (у координатама брзина сушења материјала – влажност материјала) и температурном кривом (у координатама температура материјала – влажност материјала). Упоредивање рада сушара различитих капацитета није могуће на основу промене масе материјала у процесу сушења. То је могуће на основу криве сушења као елемента кинетике процеса сушења. Квантитативне законитости процеса сушења је могуће дефинисати на основу методе, карактеристичне брзине процеса сушења. 1958. године D.A. Van Meel је предложио да се при одређеним условима извођења процеса, карактеристична крива процеса сушења влажног материјала може извести на основу експерименталне криве процеса сушења.

Експериментални резултати дозвољавају да се одреди карактеристична крива сушења (ККС), која је потребна за израчунавање брзине процеса сушења производа.

Брзина преноса влаге са јединице слободне површи је:

$$N_I = f k_o (x_F - x_d), \quad (3.1)$$

где је f карактеристична брзина процеса сушења, одређена помоћу карактеристичне криве а k_o је коефицијент који зависи од димензија материјала и параметара агенса сушења.

Брзина сушења по јединици слободне површине се може одредити из израза:

$$N_{II} = f u_k k_o (x_F - x_d), \quad (3.2)$$

Треба нагласити да је f , функција влажности која узима у обзир термофизичка својства материјала који се суши. Ова формулација коју је дао први Van Den Meel при анализи периодичног процеса сушења; даје претпоставку за схватање процеса сушења, јасно наглашавајући појединачни утицај материјала (f), карактера рада постројења за сушење (k_o) и параметара влажности [$u_k \cdot (x_F - x_d)$].

Ако се узме да је N_I брзина сушења у првом период сушења, а N_{II} у другом периоду сушења, карактеристична брзина процеса сушења је:

$$f=N_{II}/N_I, \quad (3.3)$$

(* бездимензиона, условна, релативна брзина сушења).

Карактеристична брзина сушења f се може дефинисати и као однос брзине сушења при датој влажности материјала и максималне брзине првог периода сушења N_I :

$$f=du/d\tau \cdot (1/N_I)=du/d\tau/(du/d\tau)_{\max} \quad (3.4)$$

Метода карактеристичне брзине сушења даје могућност да се на основу анализе експерименталних истраживања процеса сушења успостави веза између брзине сушења и влажности материјала, и да релативно једноставан израз за прорачун времена сушења. Очигледно је да ако влага покрива површину (материјал не игра никакву улогу у процесу испаравања) па је $f=1$, за $u_k > 1$ следи $f=1$; за $0 < u_k < 1$ следи $f_r < f < 1$. То значи да је за период константне брзине сушења при u_{kr} је $f=1$, а на крају процеса сушења при постизању равнотежне влажности ($u=u_r$) је $f=0$, што значи да се мења у границама од 0 до 1. Издвајање влаге у периоду константне брзине сушења зависи само од параметара агенса сушења и не зависи од физичко-хемијских својстава материјала.

У периоду опадајуће брзине сушења процес издвајања влаге зависи како од влажности, карактера везе влаге са материјалом и физичко хемијских својстава материјала, тако и од параметара агенса сушења.

Метода карактеристичне брзине сушења f омогућава искључивање утицаја параметара агенса сушења на интензитет процеса сушења, зато се математички модел добијен на основу експеримента, може користити у инжењерским прорачунима. Целисходно је изразити апсолутну влажност тела преко количине влаге коју садржи тело у првој критичној тачки.

За нехигроскопне материјале карактеристична влажност u_k се дефинише изразом:

$$u_k = u / u_{krI}, \quad (3.5)$$

За хигроскопна тела је погодније трансформисати тај израз, користећи одговарајући израз за део влаге, која се у процесу сушења може лако одстранити претварањем у пару.

На овај начин, користећи такозвану слободну влагу, тј. влажност која превазилази вредност равнотежне влажности добија се:

$$u_k = \frac{u_{sr} - u_r}{u_{krlsr} - u_r}, \quad (3.6)$$

где је: u_r - равнотежна апсолутна влажност.

Могуће је претпоставити исти карактер сушења само за материјале истог облика и дефинисати криву сушења „карактеристичну“ (карактерну) за дати материјал.

Појам карактерне, карактеристичне криве подразумева зависност:

$$f = (u_k). \quad (3.7)$$

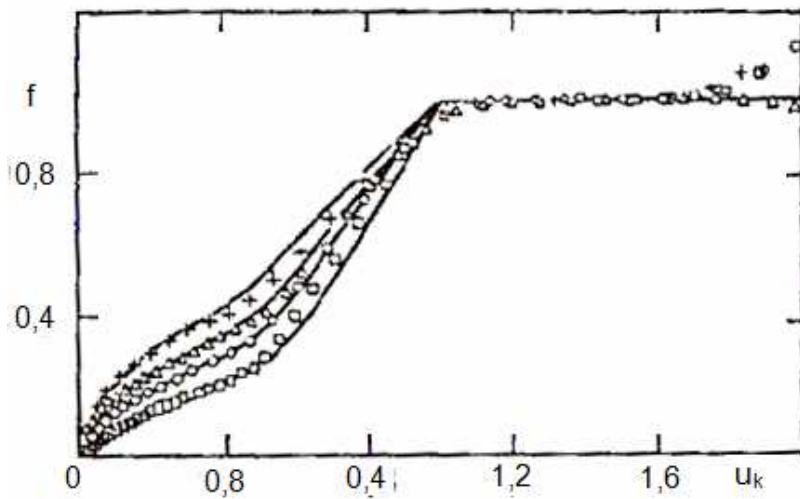
Непостојање јединствене карактеристичне криве сушења је приказано на сл.3.1.

На сл.3.2., је приказан случај када постоји јединствена карактеристична крива брзине сушења, слична зависности нормалне расподеле.

Може да се јави и случај да је јединствена карактеристична крива брзине сушења линеарна.

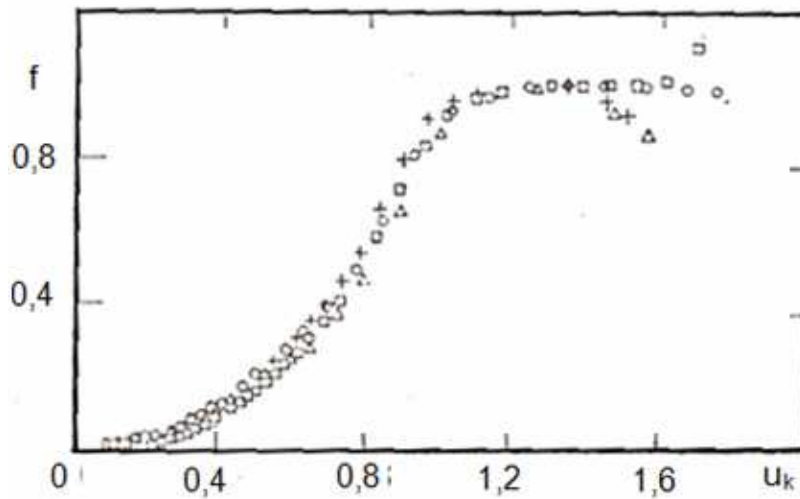
Ако се користи средња вредност апсолутне влажности у својству квалитетног показатеља чини се одговарајућа претпоставка. Степен сушења при средњој влажности ће такође зависити од релативне површине слободне површи, која долази на јединицу запремине материјала. То значи да се може претпоставити исти карактер сушења само за материјале истог облика.

Функција f карактерише утицај чврстог тела на интензитет процеса испаравања, које се јавља већ у првом периоду сушења.



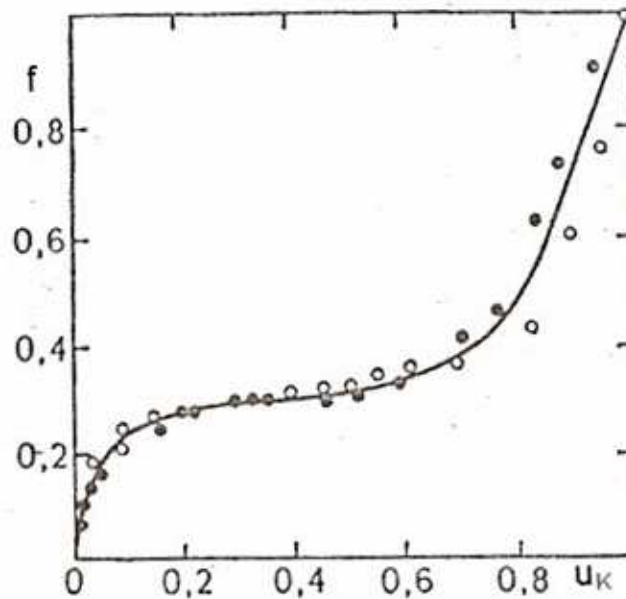
Сл. 3.1. Случај када не постоји јединствена карактеристична крива брзине сушења

Тако се уместо појма критичне тачке може користити појам графичке критичке тачке, која не одговара континуалном прелазу.



Сл. 3.2. Случај када постоји јединствена карактеристична крива сушења, облика нормалне расподеле

Случај када такође постоји јединствена карактеристична крива облика полинома је приказана на сл.3.3.



Сл. 3.3. Јединствена карактеристична крива сушења, облика полинома

Нема основа да се сматра да функција f мора да прими сваки графички облик, ради повољности карактеристична крива сушења се често апроксимира у целости или делимично по интервалима. После одређивања карактеристичне криве сушења могуће је одредити брзину сушења, а то значи и време сушења између одређених вредности влажности за задате услове процеса сушења.

Преглед литературе показује да је велики број аутора, имајући у виду трансформацију Van den Meel - а, користио почетну апсолутну влажност (u_0), равнотежну апсолутну влажност (u_r) и почетну брзину сушења ($-du/d\tau$) да би дефинисали карактеристичну влажност и карактеристичну брзину сушења:

$$u_k = \frac{u - u_r}{u_0 - u_r}, \quad (3.8)$$

$$f = \left[\frac{\left(\frac{-du}{d\tau} \right)}{\left(\frac{du}{d\tau_0} \right)} \right]. \quad (3.9)$$

Daud (2000) је предложио математички модел:

- редукована карактеристична брзина сушења:

$$g = \frac{\left[\frac{\left(\frac{du}{d\tau} \right)}{\left(\frac{du}{d\tau} \right)_{kr2}} \right]}{\left[\frac{\left(\frac{du}{d\tau} \right)_i}{\left(\frac{du}{d\tau} \right)_{kr2}} \right]} \cdot \quad (3.10)$$

- редукована карактеристична влажност:

$$\eta = \frac{\left[\frac{u - u_r}{u_{kr2} - u_r} \right]}{\left[\frac{u_i - u_r}{u_{kr2} - u_r} \right]} \cdot \quad (3.11)$$

Одређивање изотерми сорпције је неизбежан корак у студији сушења сваког производа. Оно даје прецизну информацију о хигроскопској равнотежи производа и дозвољава да се одреде услови стабилности производа после сушења.

Равнотежна апсолутна влажност u_r је одређена из изотерме сорпције спанаћа. Аналитички израз је одређен користећи израз GAB и има облик:

$$u_r = b_1 \cdot e^{(b_2/T)} \cdot \left[\frac{\varphi}{1-\varphi} \right]^{b_3} \quad (3.12)$$

Коришћен је Marquardt - Levenbergov метод нелинеарне оптимизације, користећи компјутерски програм "Curve Expert 3.1" за проналажење најбоље једначине за карактеристичну криву сушења холандског спанаћа.

3.1. Математичко моделирање кривих соларног сушења

Како је истакнуто преглед литературе је показао да су у најширој употреби модели процеса сушења пољопривредних производа полуемпиријски и емпиријски у танком слоју. Криве кинетике соларног сушења које су добијене, поређене су са 13 различитих једначина за карактеристичне влажности, табела 1.1.

Коефицијент корелације R^2 је био један од првих коефицијената за избор најбоље једначине да би се дефинисале криве соларног сушења холандског спанаћа. Уз коефицијент корелације R^2 , коришћен је статистички параметар редукованог Chi - квадрата (c^2) да се одреди квалитет подударана. Изрази за дефинисање ових параметара су:

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_{\text{exp}i} - u_{pi}), \quad (3.13)$$

и

$$c^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (u_{\text{exp}i} - u_{pi})^2}{N - n}, \quad (3.14)$$

где је $u_{\text{exp}i}$ експериментална вредност влажности, u_{pi} и - та прогнозирана влажност, N број мерења и n број константи.

За одређивање коефицијената сваког модела и најпогоднијег модела коришћен је такође компјутерски програм "Curve Expert 3.1".

Познат је и модел кинетике сушења са раздвајањем другог периода сушења на два дела:

- први период сушења, константна брзина сушења:

$$\frac{du}{dt} = \text{const. } u^3 - u_{krl}, \quad (3.15)$$

- други период сушења, опадајућа брзина сушења:

$$\frac{du}{dt} = - \frac{A}{m_{asm}} \cdot \{a \times u + b\} u_{kr} \text{ \& } u \text{ \& } u_{krl}, \quad (3.16)$$

- други период сушења, опадајућа брзина:

$$\frac{du}{dt} = - \frac{A}{m_{asm}} \cdot \{c \times u\} u_r \text{ \& } u_{krl}. \quad (3.17)$$

За одређивање коефицијента сушења користи се:

- вишефакторна линеарна регресија:

$$k = a_1 + a_2 \times T + a_3 \times D, \quad (3.18)$$

- степена функција:

$$k = b_1 \times T^{b_2} \times D^{b_3}, \quad (3.19)$$

- полином првог реда:

$$k = c_1 + c_2 \times T \times D + c_3 \times T + c_4 \times D. \quad (3.20)$$

4. Експериментална истраживања

Да би се дефинисала кинетика сушења, која подразумева криву сушења, температурску криву и криву брзине сушења, потребно је мерити промену влажности материјала који се суши у процесу сушења и температуру материјала.

Такође, да би се дефинисале, израчунале вредности апсолутних влажности потребних за дефинисање кривих сушења, морају се одредити вредности маса апсолутно сувог материјала.

4.1. Опис модула покретне, универзалне, еколошке, коморне соларне сушаре за сушење биолошких материјала

Испитивања су изведена на прототипу једног модула покретне, универзалне, еколошке, коморне сушаре за сушење биолошких материјала коришћењем сунчеве енергије, сл.4.1., (Торић и други 2005). Капацитет решења по влажном материјалу зависи од врсте материјала (оптерећења површине решетке материјалом).

Основне техничке карактеристике прототипа модула сушаре су:

- габаритне димензије кретног дела, приколице 1300x2650 mm,
- габаритне димензије коморе за сушење 800x1000x1200 mm,
- димензије апсорбера 805x1180 mm,
- габаритне и корисне димензије таве 800x1000 mm; 760x920 mm,
- снага и површина PV модула, $N = 75 \text{ W}$, $F = 0,66 \text{ m}^2$,
- центрифугални вентилатор са три радне брзине,
- максимална и минимална висина доњег рама сушаре у радном положају 600 и 960 mm.

На приколици је на средини уграђена механичка (хидраулична) дизалица. помоћу које се сушара може да се у ужем смислу подигне или спусти на висину која одговара оптималном углу радног положаја пријемника сунчеве енергије.

Такође помоћу предњег точка може се заокретањем приколице доведе пријемник у најповољнији положај у односу на угао простирања сунчевог



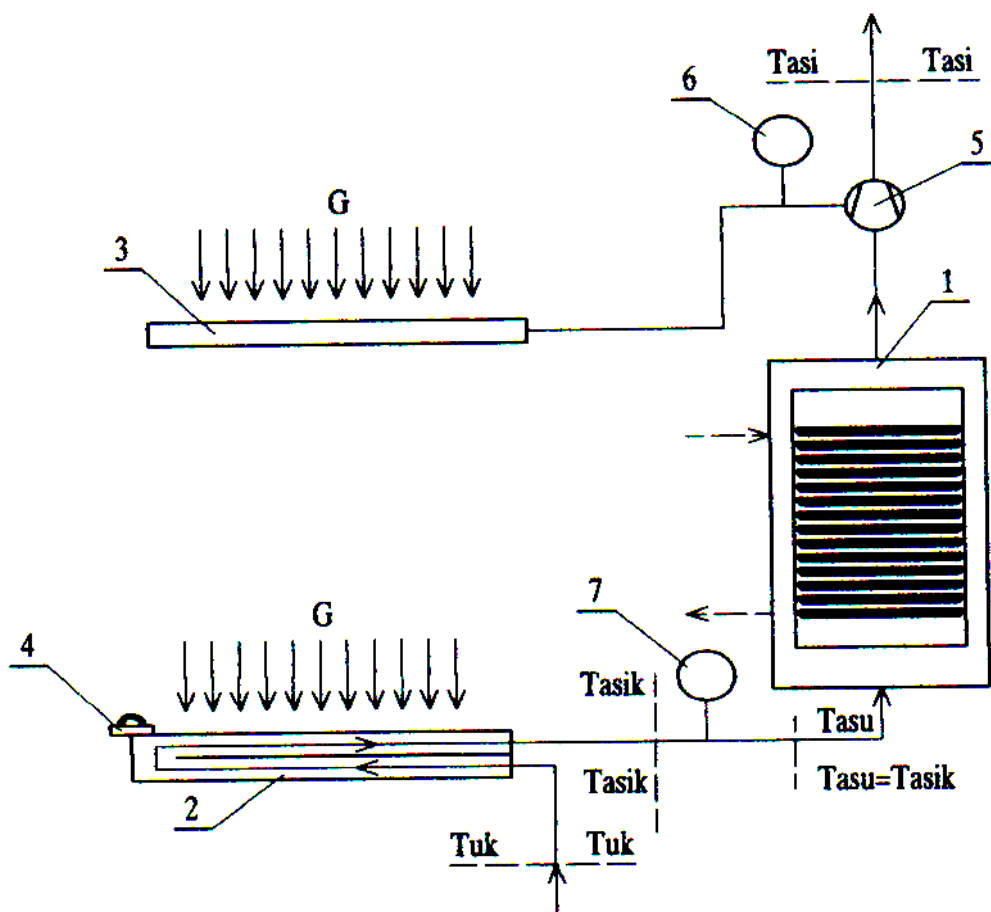
Сл. 4.1. Прототип модула покретне универзалне соларне сушаре (Торић и други 2005)

зрачења у зависности од доба дана и дате локације, што се контролише штапом уграђеним на раму пријемника. Пријемник сунчеве енергије, који се користи за загревање ваздуха, је постављен бочно са стране сушаре и зглобно је везан за рамску конструкцију коморе за сушење, тако да се може обртати око хоризонталне осе и окретањем поставити у вертикалну раван. Овим окретањем пријемник сунчеве енергије се може подићи и фиксирати у вертикални положај ради транспорта, а такође и спустити на одговарајући угао од 40° , испод хоризонтале. За обезбеђење електричне енергије за погон електромотора вентилатора за кретање агенса сушења, који је постављен на врху коморе за сушење, користи се фотонапонски панел који је постављен на нагнутој површи крова и чији нагиб може да се мења зависно од потреба. На задњем делу

приколице уграђена је акумулаторска батерија са одговарајућим реглером. На улазу у комору за сушење уграђен је систем са клапном, која омогућава мешање ваздуха из изолационог простора зида коморе за сушење са загрејаним ваздухом из пријемника, одржавајући при томе захтевану режимску температуру на улазу у комору за сушење.

Опис мерне инсталације

У циљу добијања представе о величинама које се мере и мерним местима на сл. 4.2., је дата шема мерне инсталације.



Сл. 4.2. Шема мерне инсталације

Вентилатором (5), који се покреће електричном струјом добијеном ПВ модулом (3), ваздух се доводи у равни пријемник соларне енергије (2), где се загрева до потребне, режимске температуре тасу и уводи у комору за сушење (1).

Проток агенса сушења кроз комору за сушење, а такође однос између количине спољњег ваздуха и рециркулисаног, израђеног агенса сушења се регулише клапном, постављеном на улазу у комору за сушење и клапном постављеном на излазу из коморе за сушење. У току експеримента мерена је брзина струјања агенса сушења на излазу из сушаре одговарајућим анемометром.

Регулисање температуре агенса сушења и одржавање на задатом нивоу се врши променом протока рециркулисаног агенса сушења, клапном постављеном на улазу у комору за сушење.

Промена температуре узорка материјала, агенса сушења на улазу у комору за сушење, излаз из пријемника соларне енергије у току процеса сушења се региструје уређајем "Норма", термокомпензатором.

Као давач температуре се користи термоелемент.

За одређивање параметара околине (температуре сувог и влажног термометра) коришћен је Асманов психрометар.

Брзина струјања агенса сушења је мерена анемометром.

Било је предвиђено да се паралелно мери и озраченост, међутим, из објективних разлога то није било могуће.

4.1. Начин извођења експеримента

Што се тиче експерименталних истраживања (Торић и други 2005), прво су вршени експерименти у циљу утврђивања карактеристика пријемника соларне енергије. Мерене су вредности температура околине, улаз у пријемник соларне енергије и температуре на излазу из пријемника, улазу у комору за сушење при различитим брзинама рада вентилатора што значи при различитој ирадијанцији сунчевог зрачења, пошто је вентилатор директно везан на PV модул.

Припрема материјала

Влажан материјал, лист холандског спанаћа (додатак 1), је на почетку сушења распоређен у 10 тава у комори за сушење, а према препорукама о оптерећењу јединице површине таве влажним материјалом .

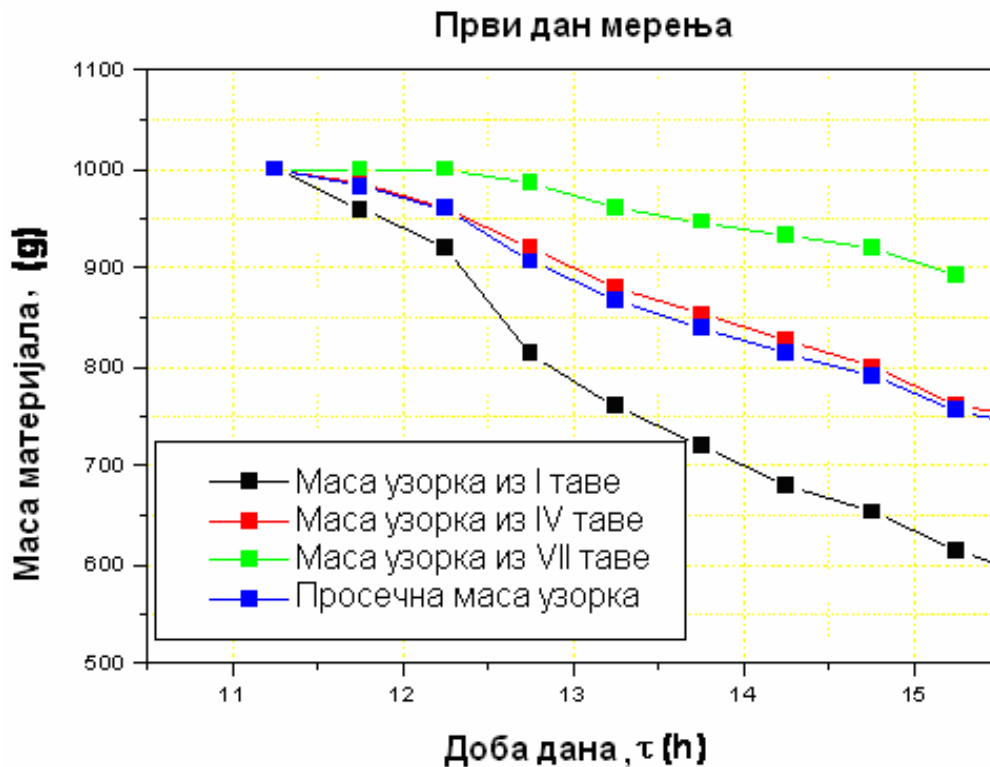
У процесу извођења експеримента да би се пратило издвајање влаге из влажног материјала периодично су одређиване вредности маса узорака, почетне масе од 7,5 g листа, узиманих са тава 1. 4. и 7. Маса узорка материјала у процесу сушења су одређиване помоћу дигиталне ваге Gibertini, задовољавајуће тачности.

Вредности регистрованих маса су дате у табели 5.1, а њихове промене у току процеса сушења на дијаграмима сл.4.3. и сл.4.4.

Табела 4.1. Вредности маса материјала на репрезентативним тавама 1, 4. и 7.

Редни број	Време, доба дана τ , h,min	Маса материјала ₁ , m_{vm1} , g	Маса материјала, m_{vm4} , g	Маса материјала, m_{vm7} , g	Средња вредност масе материјала, g
Први дан, 09.09.05.					
1	11 ¹⁵	1000	1000	1000	1000
2	11 ⁴⁵	959,260	986,420	1000	982,060
3	12 ¹⁵	919,770	959,760	1000	959,843
4	12 ⁴⁵	813,313	919,770	986,420	906,501
5	13 ¹⁵	759,981	879,978	959,760	866,573
6	13 ⁴⁵	719,982	853,312	946,643	839,979
7	14 ¹⁵	679,983	826,646	933,310	813,313
8	14 ⁴⁵	653,170	799,98	919,919	791,043
9	15 ¹⁵	613,332	759,998	893,331	755,553
10	15 ⁴⁵	586,665	746,665	879,998	737,776
Други дан, 10.09.05.					
11	11 ⁰⁰	426,656	599,998	759,998	599,995
12	11 ³⁰	413,332	586,665	759,998	586,665
13	12 ⁰⁰	399,999	573,332	746,665	573,332

14	12 ³⁰	386,666	546,665	719,998	551,109
15	13 ⁰⁰	373,332	533,332	706,665	537,776
16	13 ³⁰	359,999	506,665	693,33	519,998
17	14 ⁰⁰	346,665	493,332	666,665	502,215
18	14 ³⁰	333,332	466,665	653,332	484,443
19	15 ⁰⁰	333,332	453,312	639,998	475,547



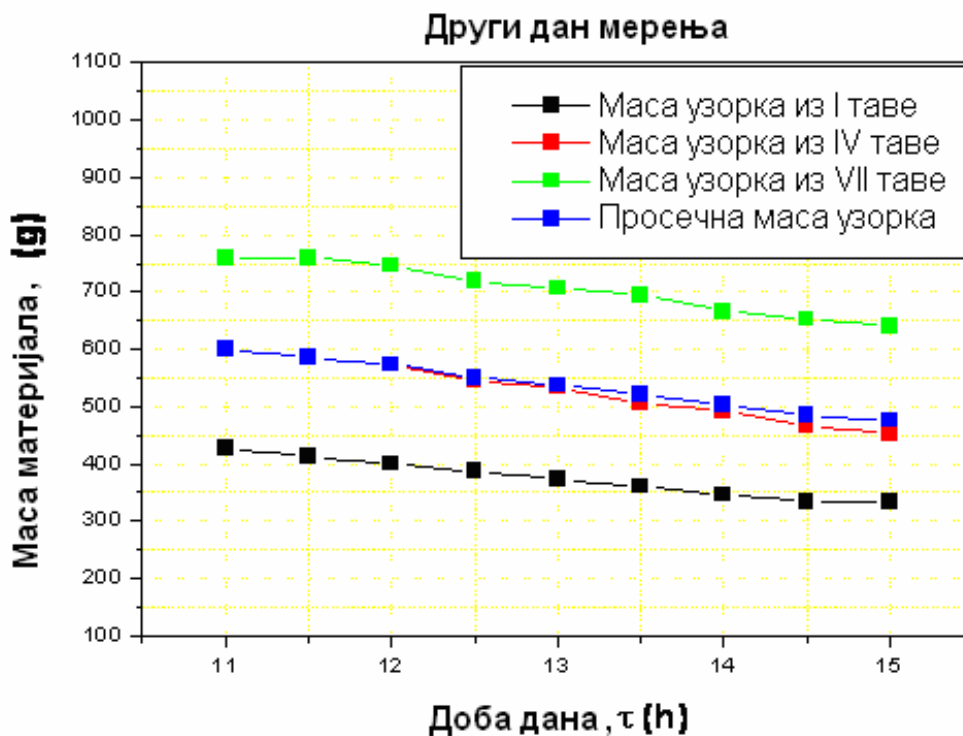
Сл.4.3. Промене маса материјала на репрезентативним тавама

Дефинисање масе апсолутно сувог материјала

Маса апсолутно сувог материјала, потребна за дефинисање вредности апсолутних влажности, је одређена сушењем у микроталасној пећи (фирма Samsung) узорка материјала масе од 20 g, узетог на почетку процеса сушења уз мерење масе на почетку и крају процеса сушења.

Мерење температуре

Промена температуре ваздуха околине на улазу у пријемник соларне енергије, агенса сушења на улазу у комору за сушење, излаз из пријемника соларне енергије и температуре материјала у току процеса сушења се региструје уређајем "Норма" термокомпензатором а вредности температура су мерене термопаром NiCr - Ni.



Сл.4.4. Промене маса материјала на репрезентативним тавама

Температура материјала је мерена помоћу термопара NiCr - Ni специјално постављеног у материјал (нанизани листови) на тави 1.

Вредности регистрованих температура у току испитивања карактеристика пријемника соларне енергије су дате у табелама 4.2. и 4. 3, одговарајуће графичке зависности су дате на дијаграмима сл.4.5. и сл.4.6.

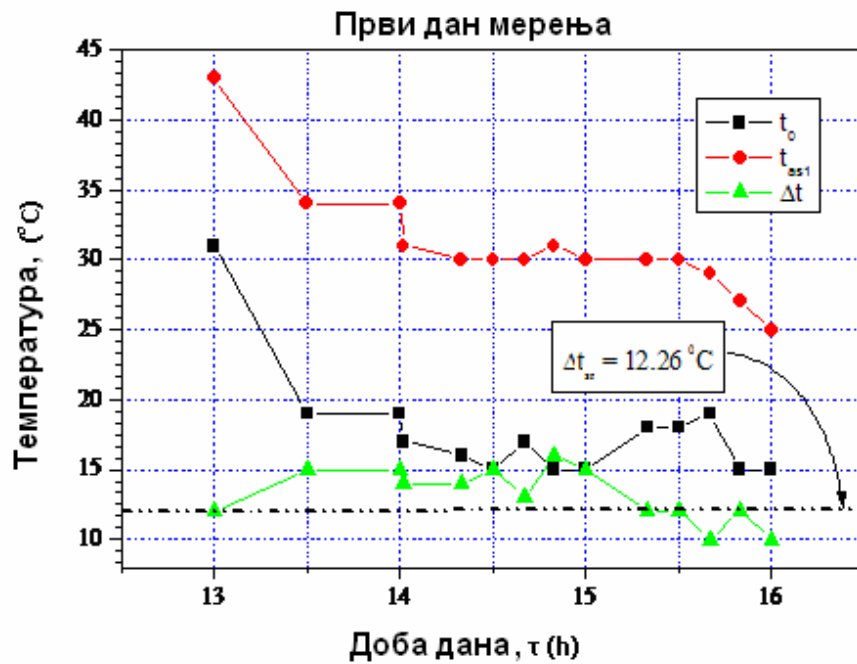
Табела 4.2. Вредности температура околине, вредности температуре агенса сушења на улазу у комору за сушење и одговарајуће температурске разлике (први дан 03.09.05.)

Редни број	Време, доба дана τ , h.min	Температура околине, улаз у пријемник t_0 . $^{\circ}\text{C}$	Темпеатура на излазу из пријемника, улаз у комору за сушење. t_{as1} . $^{\circ}\text{C}$	Температурска разлика. Δt . $^{\circ}\text{C}$
1	13 ⁰⁰	31	43	12
2	13 ³⁰	19	34	15
3	14 ⁰⁰	19	34	15
4	14 ¹⁰	17	31	14
5	14 ²⁰	16	30	14
6	14 ³⁰	15	30	15
7	14 ⁴⁰	17	30	13
8	14 ⁵⁰	15	31	16
9	15 ⁰⁰	15	30	15
10	15 ¹⁰	17	31	14
11	15 ²⁰	18	30	12
12	15 ³⁰	18	30	12
13	15 ⁴⁰	19	29	10
14	15 ⁵⁰	15	27	12
15	16 ⁰⁰	15	25	10
				$\Delta t_{sr}=13.26^{\circ}\text{C}$

Табела 4.3. Вредности температура околине, вредности температуре агенса сушења на улазу у комору за сушење и одговарајуће температурске разлике (други дан. 04.09.05.)

Редни број	Време, доба дана τ , h.min	Температура околине, улаз у пријемник t_0 , °C	Температура на излазу из пријемника, улаз у комору за сушење. t_{as1} , °C	Температурска разлика. Δt , °C
1	10 ³⁰	19	34	15
2	10 ⁴⁰	20	37	17
3	10 ⁵⁰	20	41	21
4	11 ⁰⁰	20	41	21
5	11 ¹⁰	20	42	22
6	11 ²⁰	22	43	21
7	11 ³⁰	24	41	17
8	11 ⁴⁰	25	42	17
9	11 ⁵⁰	20	41	21
10	12 ⁰⁰	20	41	21
11	12 ¹⁰	20	39	19
12	12 ²⁰	26	39	13
13	12 ³⁰	25	35	10
14	12 ⁴⁰	26	34	8
				$\Delta t_{sr}=17.35^{\circ}\text{C}$

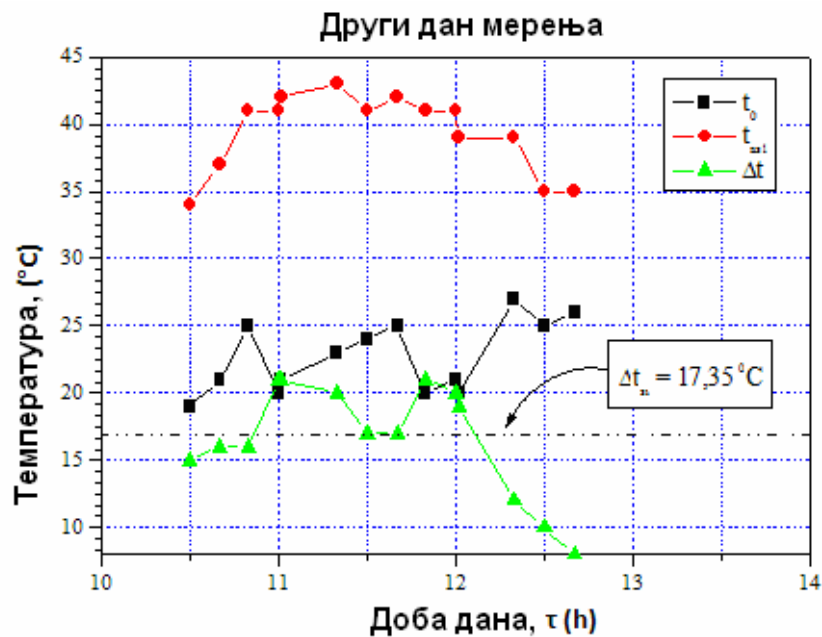
Вредности одговарајућих температура ваздуха и агенса сушења, материјала и вредности апсолутних влажности материјала, садржаја воде, добијене у процесу сушења су дате у табели 4.4.



Сл.4.5. Промене температура околине и агенса сушења на улазу у комору за сушење

Мерење протока агенса сушења

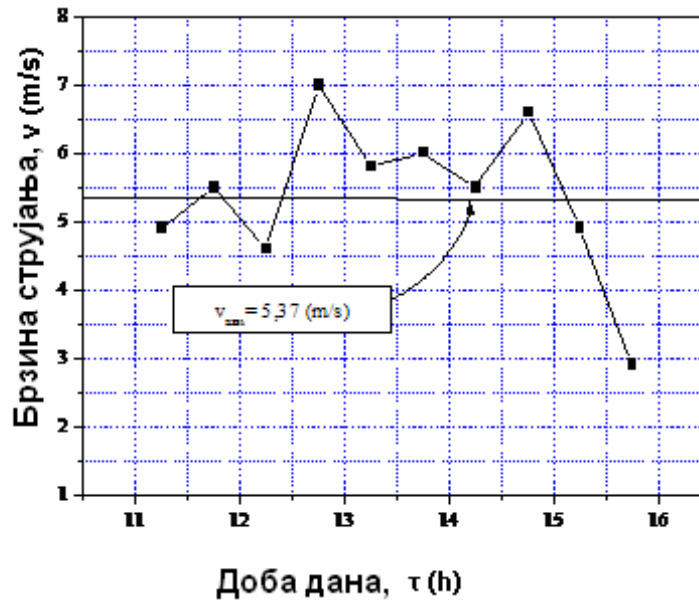
Проток агенса сушења је одређиван мерењем брзине струјања агенса



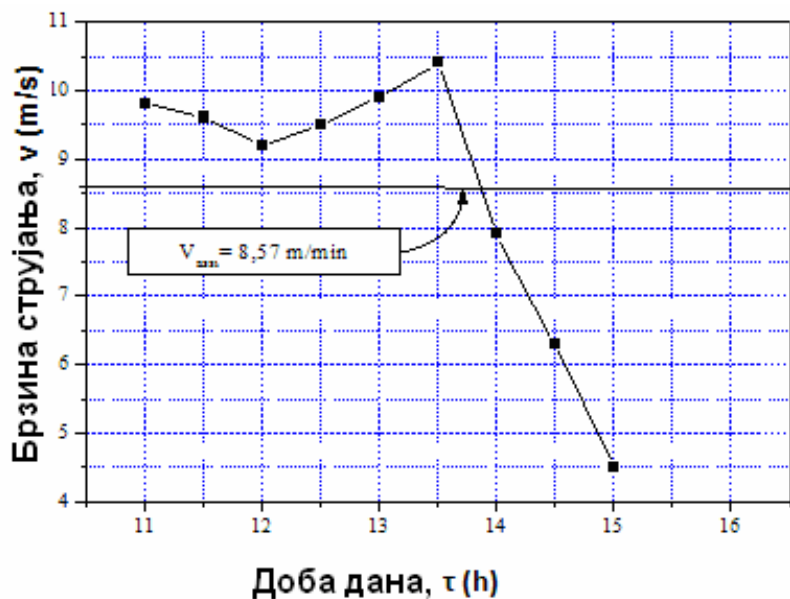
Сл.4.6. Промене температуре и агенса сушење на улазу у комору за сушење

сушења помоћу анемометра са крилцима на излазу из коморе за сушење.

Измерене вредности су дате у табели 4.5., а њихове промене на дијаграмима сл.4.7. и сл.4.8.



Сл. 4.7. Промене брзине струјања агенса сушења



Сл. 4.8 Промене брзине струјања агенса сушења

На основу промена вредности брзина струјања агенса сушења могуће је на индиректан начин извести закључак о интензитету Сунчевог зрачења. На основу одређених вредности релативних влажности и дефинисане количине издвојене

влаге на свакој од референтних тава, користећи општу једначину материјалног биланса:

$$W_i = m_1 \cdot \frac{y_1 - y_2}{1 - y_2}, \quad (4.1)$$

дефинисан је и аналитички израз за масу (проток) издвојене влаге у процесу сушења, W , облика:

- за први дан:

$$W_i = a + b \cdot z + c \cdot z^2, \quad (4.2)$$

где је: $a=470.46744$; $b=-60.208556$; и $c=1.5061111$

Графички приказ промене количине издвојене влаге је дат на сл.4.9, тако да је могуће праћење промене масе материјала, који се суши по висини коморе за сушење, при константној вредности количине апсолутно сувог агенса сушења.

- за други дан:

$$W_i = a + b \cdot z + c \cdot z^2, \quad (4.3)$$

где је: $a=57.748222$; $b=40.022889$; и $c=-4.4471111$; $s=0,00018649$;

$r=1,0000000$

Графички приказ промене количине издвојене влаге је дат на сл.4.10, тако да је могуће праћење промене масе материјала, који се суши по висини коморе за сушење, при константној вредности количине апсолутно сувог агенса сушења.

Различити карактери промене и различити одговарајући аналитички изрази за количину издвојене влаге по висини коморе за сушење у току првог и другог

Табела 4.4. Вредности температура ваздуха, агенса сушења и апсолутних влажности

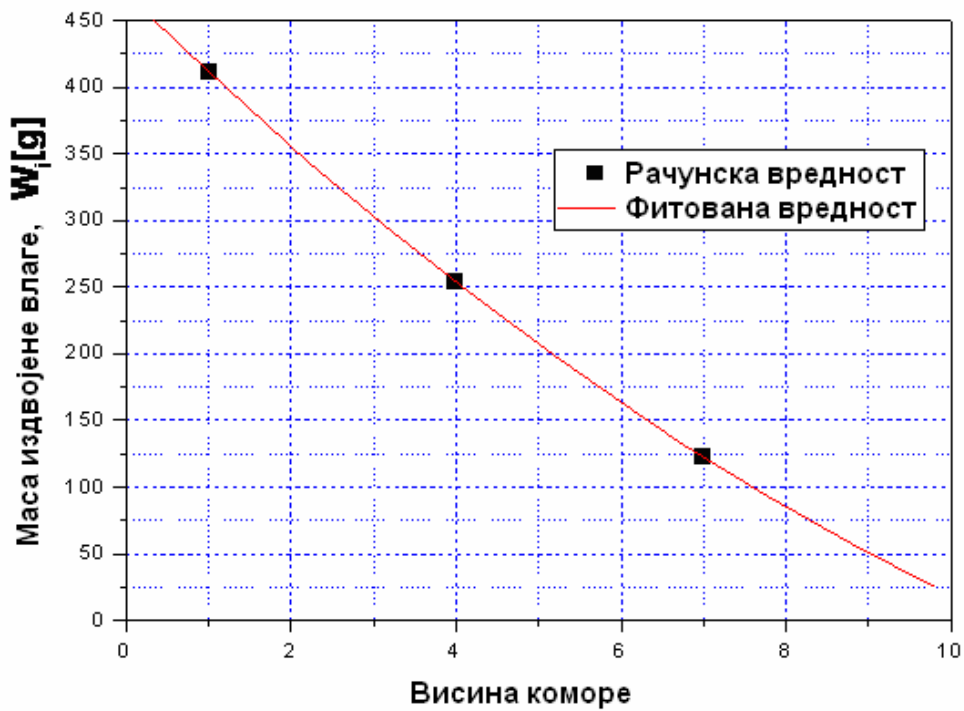
Ред број	Време, доба дана, τ (h.min)	Темп. на излазу из пријемника, улаз у комору за сушење, $t_{as1}, ^\circ\text{C}$	Температура околине, улаз у пријемник $t_0, ^\circ\text{C}$	Температура материјала, прва тава, $t_m, ^\circ\text{C}$	Температурска разлика, $\Delta t, ^\circ\text{C}$	Апсолутна влажност материјала, $u_1, \text{kg}_w/\text{kg}_{asm}$	Апсолутна влажност материјала, $u_4, \text{kg}_w/\text{kg}_{asm}$	Апсолутна влажност материјала, $u_7, \text{kg}_w/\text{kg}_{asm}$	Средња вредност апсолутне влажности, u_{sr}
Први дан 09.09.'05.									
1	11 ¹⁵	56	36	28	20	9,000	9,000	9,000	9,000
2	11 ⁴⁵	50	28	29	22	8,600	8,864	9,000	8,821
3	12 ¹⁵	50	29	31	21	8,198	8,598	9,000	8,598
4	12 ⁴⁵	51	30	34	21	7,133	8,198	8,864	8,065
5	13 ¹⁵	50	31	33	19	6,600	7,780	8,598	7,659
6	13 ⁴⁵	50	32	33	18	6,200	7,533	8,466	7,400
7	14 ¹⁵	47	32	32	15	5,800	7,266	8,333	7,133
8	14 ⁴⁵	46	32	33	14	5,532	6,699	8,199	6,810
9	15 ¹⁵	43	31	31	12	5,133	6,599	7,933	6,555
10	15 ⁴⁵	42	32	30	10	4,867	6,467	7,799	6,378

Други дан 10.09.'05.									
11	11 ⁰⁰	32	26	30	6	3,267	4,999	6,699	4,955
12	11 ³⁰	40	26	32	14	3,133	4,867	6,599	4,822
13	12 ⁰⁰	40	27	35	13	2,999	4,733	6,467	4,644
14	12 ³⁰	40	29	32	11	2,867	4,467	6,200	4,767
15	13 ⁰⁰	39	30	33	9	2,733	4,333	6,067	4,377
16	13 ³⁰	40	30	35	10	2,599	4,067	5,933	4,196
17	14 ⁰⁰	37	30	32	7	2,467	3,933	5,667	4,021
18	14 ³⁰	37	31	32	6	2,333	3,667	5,533	3,844
19	15 ⁰⁰	35	31	32	4	2,333	3,533	5,399	3,755

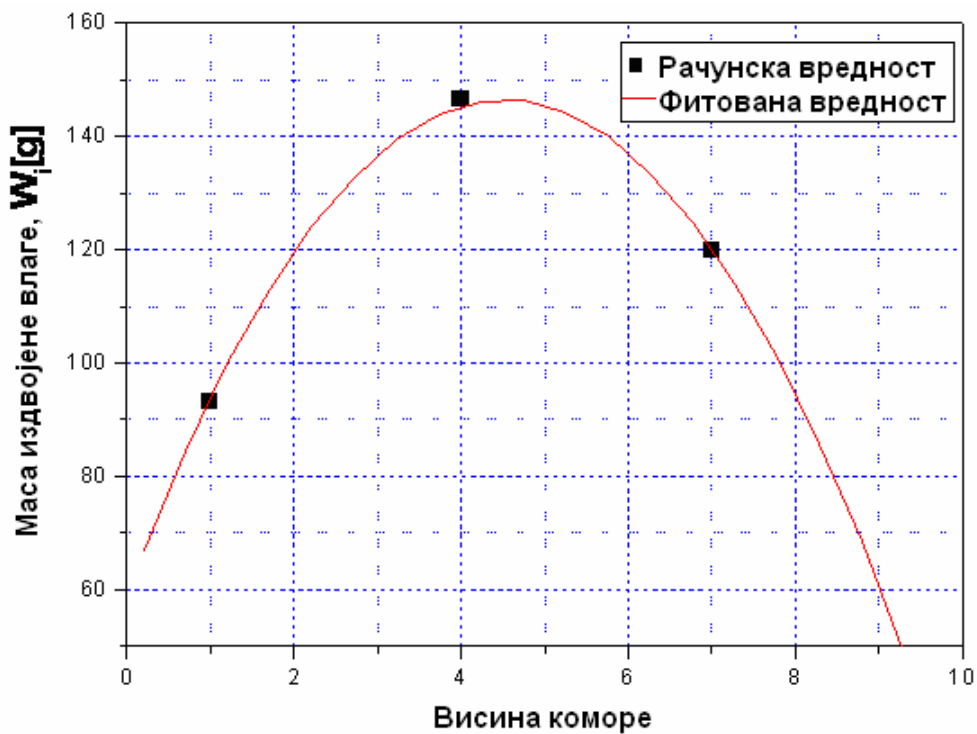
Први дан - $\Delta t_{srI}=16.85^{\circ}\text{C}$. Други дан - $\Delta t_{srII}=8.89^{\circ}\text{C}$

Табела 4.5. Параметри агенса сушења и пријемника соларне енергије

Редни број	Време . доба дана τ , (h.min)	Угао нагиба пријемника α°	Брзина струјања агенса сушења $v, \text{m/s}$	Температура околине, улаз у пријемник $t_0, ^\circ\text{C}$	Температура влажног термометра $t_w, ^\circ\text{C}$	Релативна влажност ваздуха околине, $\varphi, \%$
Први дан, 09.09.'05.						
1	11 ¹⁵	45	4,9			
2	11 ⁴⁵	45	5,5	28,0	20,3	48,0
3	12 ¹⁵	45	4,6	29,1	20,3	45,0
4	12 ⁴⁵	45	7,0	29,2	19,4	38,0
5	13 ¹⁵	45	5,8	29,4	19,8	40,0
6	13 ⁴⁵	45	6,0	30,0	21,8	50,0
7	14 ¹⁵	45	5,5	29,6	19,8	40,0
8	14 ⁴⁵	45	6,6	30,4	20,2	40,0
9	15 ¹⁵	45	4,9	29,6	19,6	39,5
10	15 ⁴⁵	45	2,9	29,8	20,4	41,0
Други дан, 10.09.'05.						
11	11 ⁰⁰	45	9,8	25,2	19,4	60,0
12	11 ³⁰	45	9,6	25,2	19,4	56,0
13	12 ⁰⁰	45	9,2	26,4	19,8	53,0
14	12 ³⁰	45	9,5	27,2	20,8	55,0
15	13 ⁰⁰	45	9,9	29,6	20,6	45,0
16	13 ³⁰	45	10,4	28,0	21,2	53,0
17	14 ⁰⁰	45	7,9	28,0	20,0	48,0
18	14 ³⁰	45	6,3	28,2	20,4	46,0
19	15 ⁰⁰	45	4,5	28,6	20,4	46,0



Сл. 4.9. Промена количине издвојене влаге по висини коморе за сушење



Сл. 4.10. Промена количине издвојене влаге по висини коморе за сушење

дана су резултат врсте везе влаге, почетне вредности влаге и параметара агенса сушења.

На тави 7. издвојена је мања количина влаге, јер се релативна влажност, ϕ знатно повећала.

Такође, на тави 4. је највећа количина издвојене влаге, јер и ако је та нижа испред ове таве у односу на таву 1. због мањег ϕ . Мање количине издвојене влаге су и резултат мањих вредности влажности материјала (мања количина везане влаге – теже издвајање).

За услове експеримента, услове околине и температуру агенса сушења на улазу у комору за сушење, могуће је уз претпоставку да се ради о сушари без губитака, дефинисати процес сушења у $x - h$ дијаграму и дефинисати стања агенса сушења испред сваке таве за оба дана.

Израчунате вредности су приказане у табели 4.6, а дат је пример прорачуна за први дан.

Табела 4.6. Количина издвојене влаге и параметри агенса сушења

Количина издвојене влаге			Параметри агенса сушења					
W_i [g]								
Број тава	Први дан	Други дан	x_{asI} , (kg _w /kg _L)	t_{asI} , (°C)	ϕ_{asI} , (-)	x_{asII} , (kg _w /kg _L)	t_{asII} , (°C)	ϕ_{asII} , (-)
I	411,765	93,324	0,012	46,50	0,18	0,012	39,0	0,27
II	356,075	120,006	0,013	43,70	0,23	0,013	38,3	0,28
III	303,397	137,793	0,014	41,20	0,29	0,013	37,7	0,29
IV	253,731	146,686	0,015	39,00	0,34	0,013	37,0	0,31
V	207,077	146,685	0,016	37,10	0,39	0,014	36,3	0,33
VI	163,436	120,000	0,016	35,40	0,45	0,014	35,7	0,36
VII	122,807	137,790	0,017	34,00	0,50	0,014	35,0	0,40
VIII	85,190	93,316	0,017	32,90	0,55	0,014	34,3	0,44
IX	60,585	57,738	0,018	32,10	0,61	0,015	33,7	0,49
X	18,993	13,266	0,018	31,50	0,66	0,015	33,0	0,54

За измерене податке околине

$$t_0 = 31.3^\circ\text{C}$$

$$\varphi_0 = 42.3\%$$

$$t_{as} = 46.5^\circ\text{C}$$

израчунате су вредности апсолутне влажности.

$$x_d = 0.622 \frac{\varphi \rho_d}{\rho - \varphi \rho_d}$$

$$x_d = 0.012 \text{kg}_W / \text{kg}_L = x_{as1}$$

За параметре агенса сушења и димензије канала израчунат је проток апсолутно сувог агенса сушења.

$$\rho_{as} = 1.09 \text{kg} / \text{m}^3$$

$$F = 0.004 \text{m}^2$$

$$v_{as1} = 5.37 \text{m} / \text{s}$$

$$L = \rho_{as} \cdot F \cdot v_{as1}$$

$$L = 0.0234 \text{kg} / \text{s} = 84.2875 \text{kg} / \text{h} = 379.294 \text{kg} / \text{ciklusu}$$

На основу оптерећења таве материјалом израчунате су вредности маса издвојене влаге у процесу сушења по тавама:

$$m_{mt} = 1000 \text{g}$$

$$W_1 = m_1 \frac{y_1 - y_2}{1 - y_2} = 411.765 \text{g}$$

$$W_4 = m_4 \frac{y_4 - y_5}{1 - y_5} = 253.731 \text{g}$$

$$W_7 = m_7 \frac{y_7 - y_8}{1 - y_8} = 122.807 \text{g}$$

Вредности апсолутних влажности су израчунате према изразу:

$$x_{asi} = x_{as1} + \frac{\sum_{i=1}^{10} W_i}{L}. \quad (4.4)$$

Остале вредности параметара агенса сушења су одређене са дијаграма и дате су у табели 4.6.

5. Резултати и дискусија

5.1. Кинетика сушења

На основу експерименталних резултата дефинисане су криве сушења и криве брзине сушења (Торић и други 2005).

5.1.1. Дефинисање кривих сушења и кривих брзине сушења

На дијаграму сл.5.1, приказане су криве сушења листа холандског спанаћа за први дан сушења, за три референтне таве (1, 4 и 7) и за средњу вредност влажности.

Анализа кривих сушења показује да постоји период константне брзине сушења и период опадајуће брзине сушења (не постоји период предгревања материјала), што значи да се у почетку материјал суши при оквашеној површи материјала.

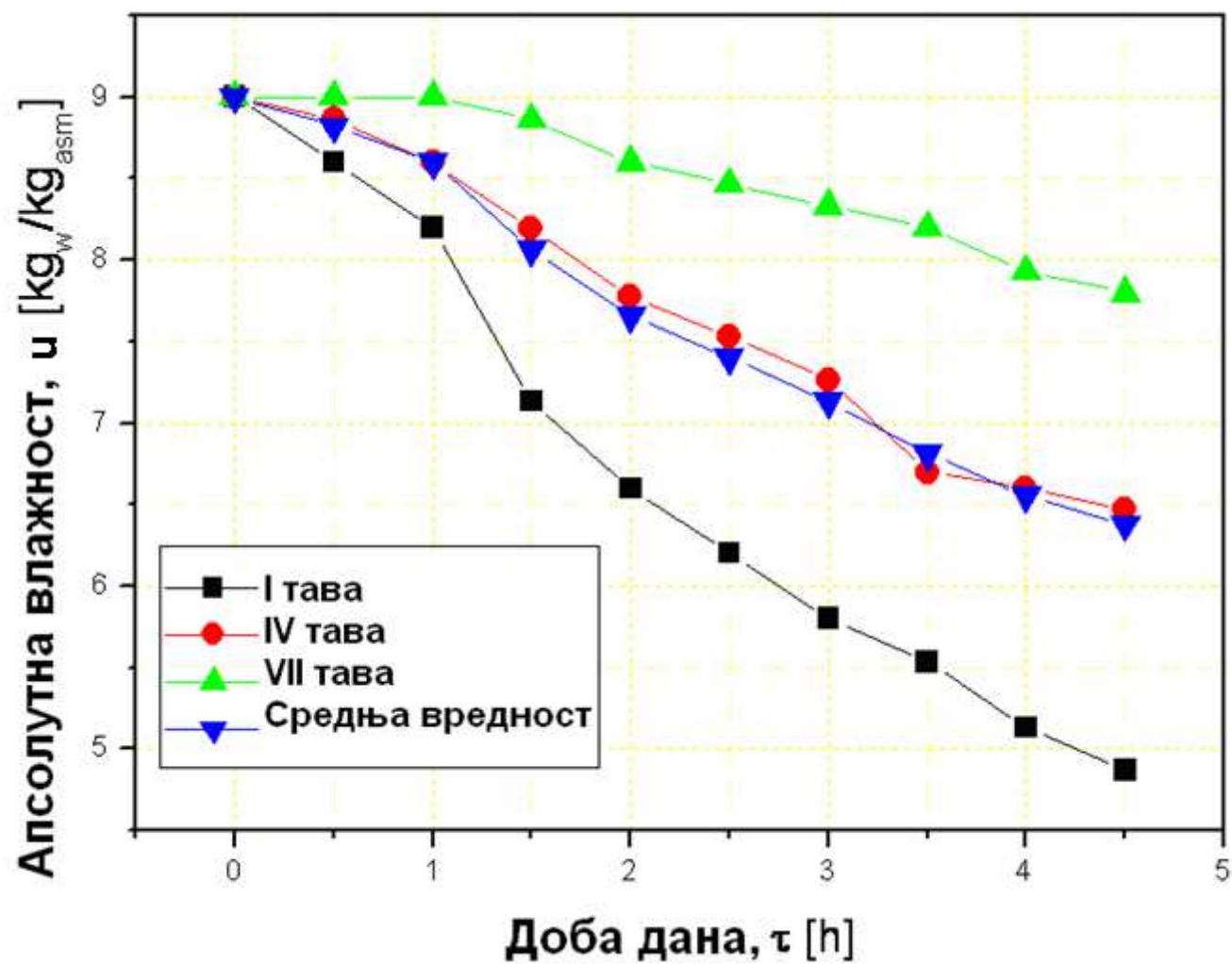
Непостојање периода предгревања се објашњава тиме, да се ради о нискотемпературном сушењу и не тако дебелом слоју материјала.

Уочавају се такође и различите дужине трајања првог периода сушења и различите вредности одговарајућих критичних влажности материјала (I тава, $\tau_I = 3$ h, $u_{krl} = 5.8$ kg_w/kg_{asm}; IV тава, $\tau_{IV} = 2$ h, $u_{krl} = 7.780$ kg_w/kg_{asm} и VII тава, $\tau_{VII} = 2$ h, $u_{krl} = 8.598$ kg_w/kg_{asm}, што се објашњава променом вредности температуре агенса сушења на улазу у комору за сушење и испред тава (виша температура дужи први период процеса сушења).

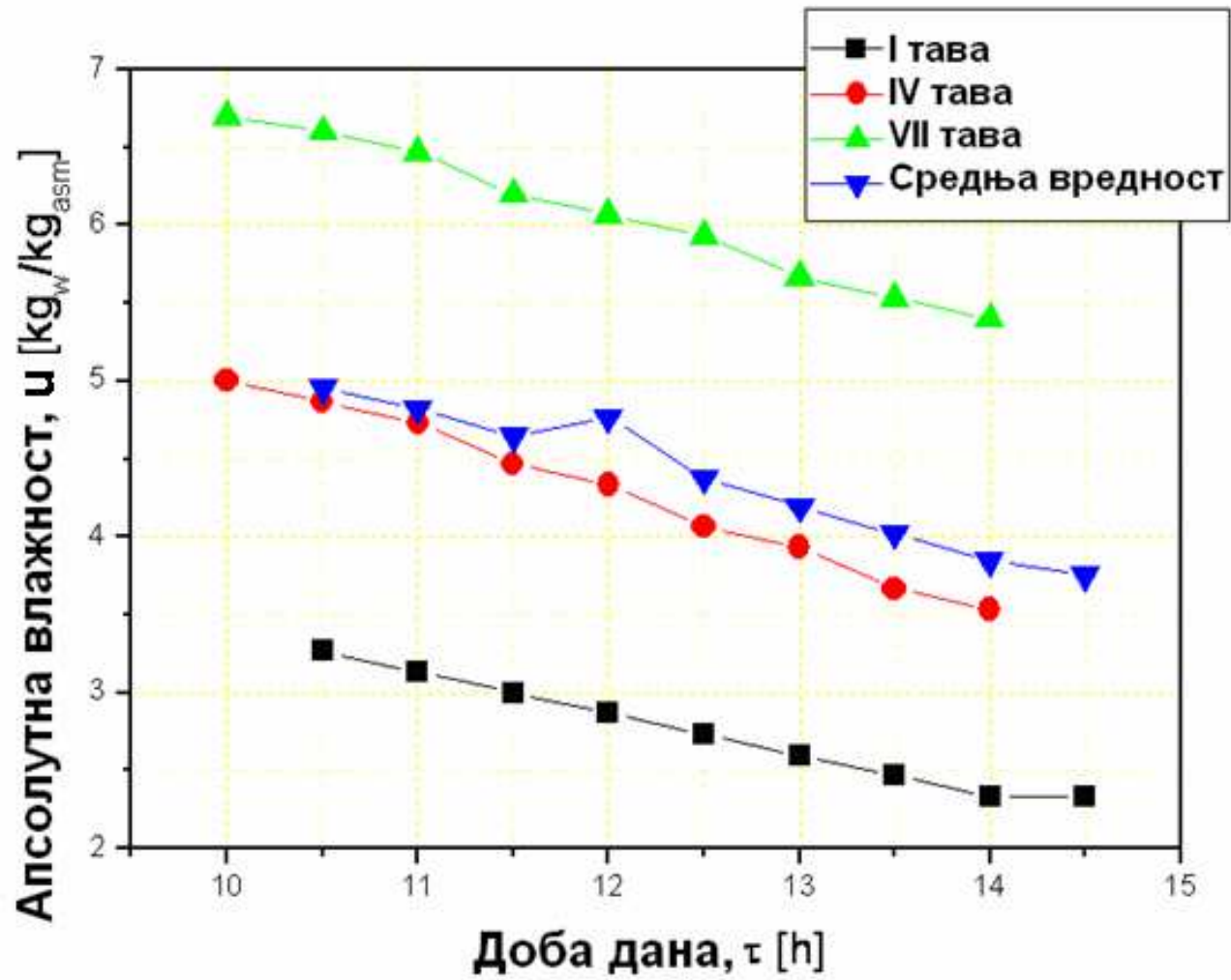
Први период сушења за четврту таву је краћи, што се објашњава нижом вредношћу температуре агенса сушења испред таве.

За седму таву је због релативно исте вредности температуре, време трајања првог периода сушења исто као и за четврту таву.

Крива сушења сл.5.1, може послужити за анализу утицаја различитих параметара агенса сушења (t_{ac} , ϕ_{ac}) на положај криве сушења при истој почетној вредности влажности.



Сл.5.1. Криве сушења

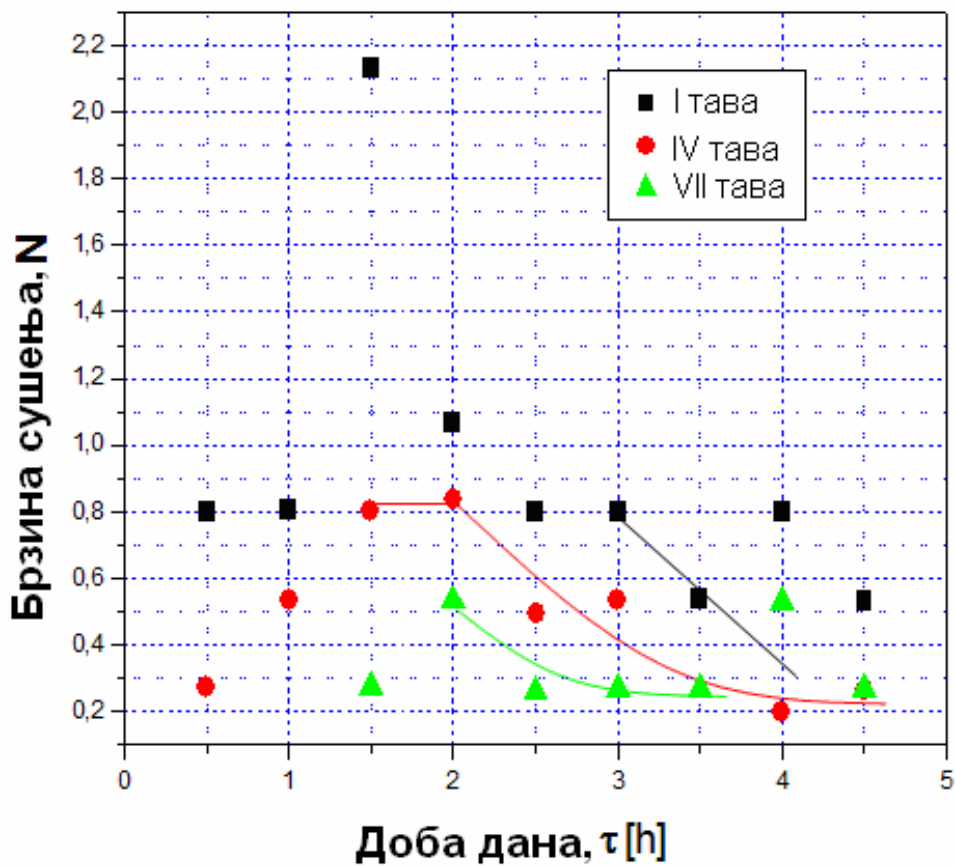


Сл.5.2. Криве сушења

Очигледан је утицај смањења температуре на криву сушења, а то значи на издвајање влаге у посматраним тавама ($W_I=0.412$ kg; $W_{IV}= 0.254$ kg; $W_{VII}=0.123$ kg).

Криве сушења за други дан сл.5.2. могу послужити за анализу утицаја почетне влажности материјала и параметара агенса сушења на облик и положај кривих сушења.

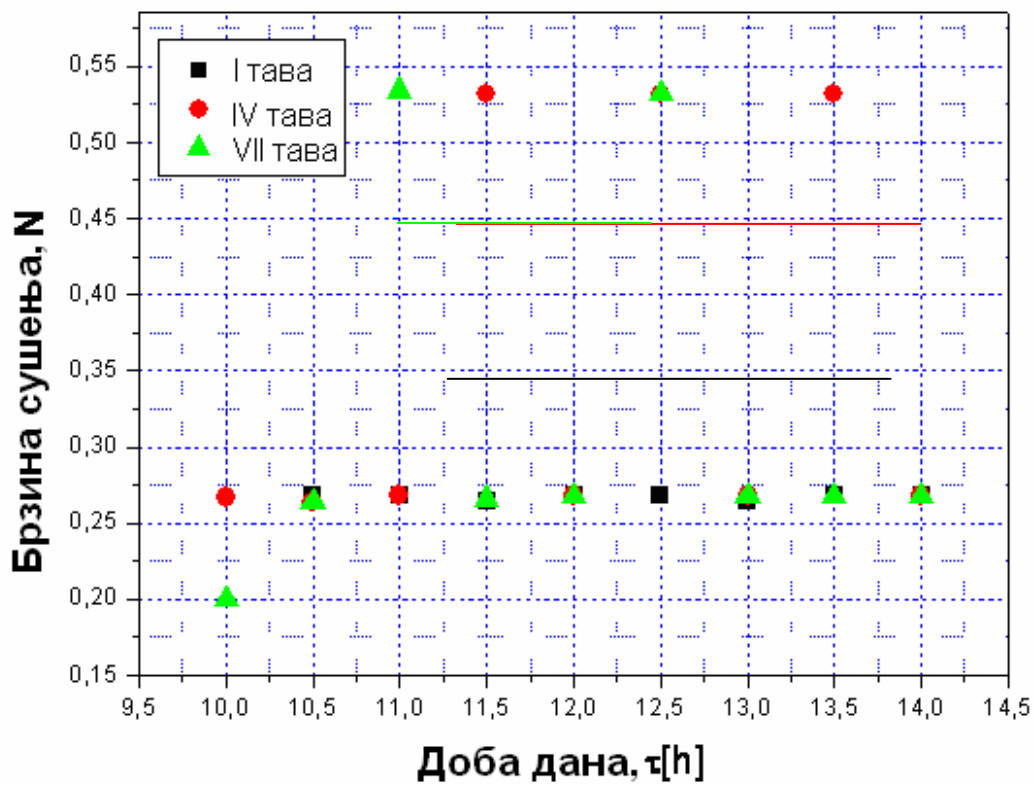
На сл.5.3, 5.4, 5.5. и 5.6. су приказане и одговарајуће криве брзина сушења за први и други дан: у координатама $N - \tau$; и $N - u$.



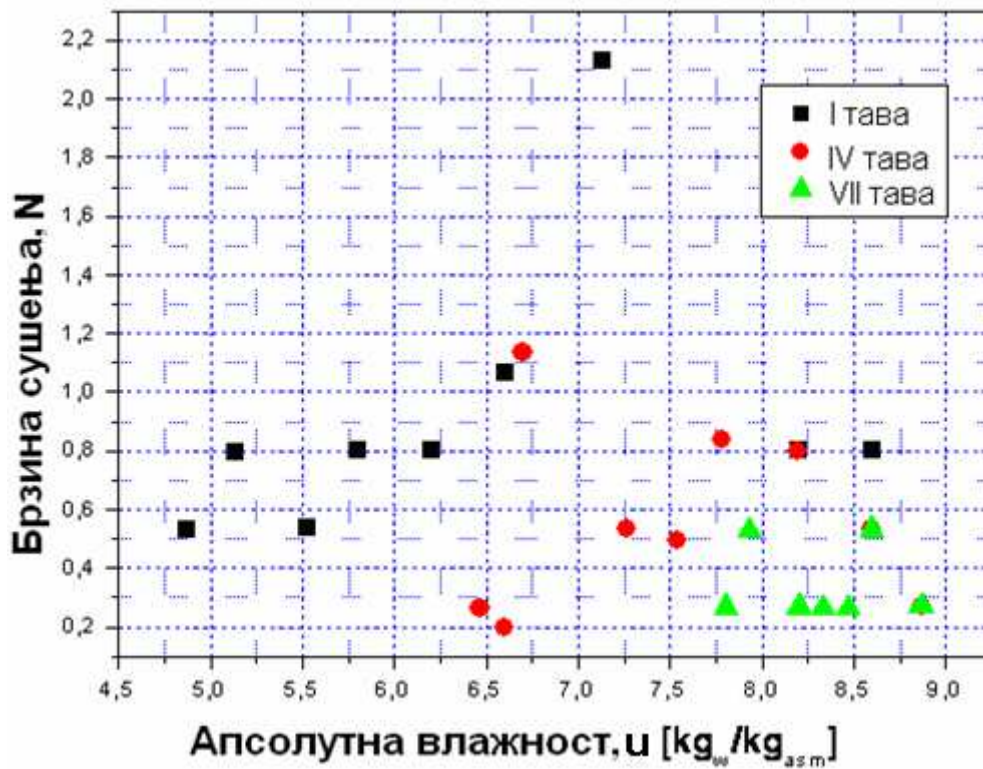
Сл.5.3. Крива брзине сушења $N - \tau$

Такође, на дијаграмима су дате и фитоване криве и одговарајући аналитички изрази.

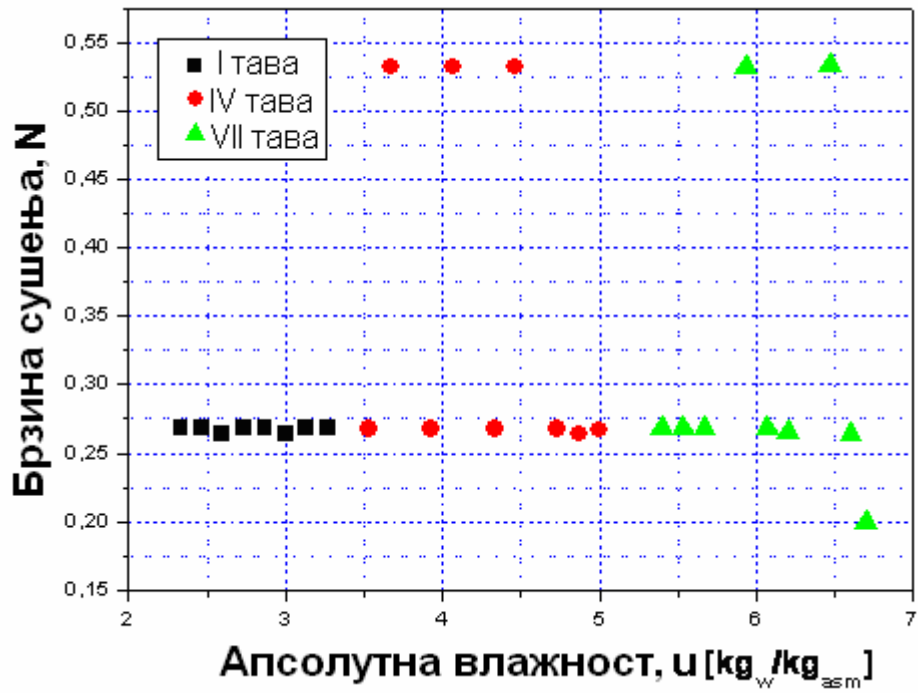
На сл.5.7, 5.8, 5.9. су приказана одступања експерименталних и претпостављених вредности.



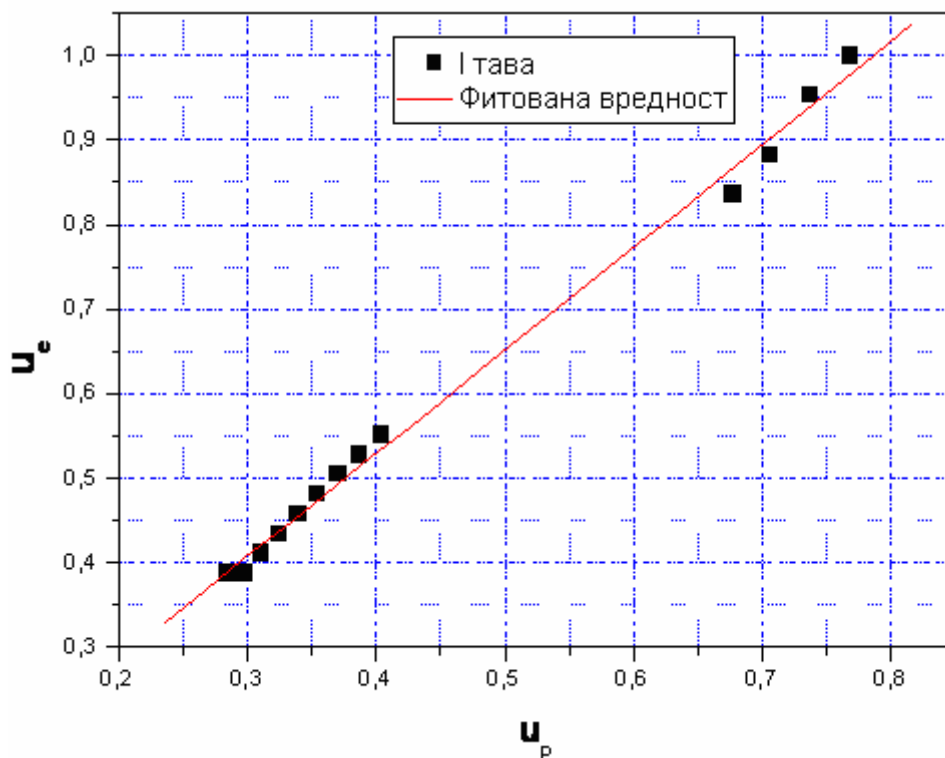
Сл.5.4. Крива брзине сушења $N - \tau$



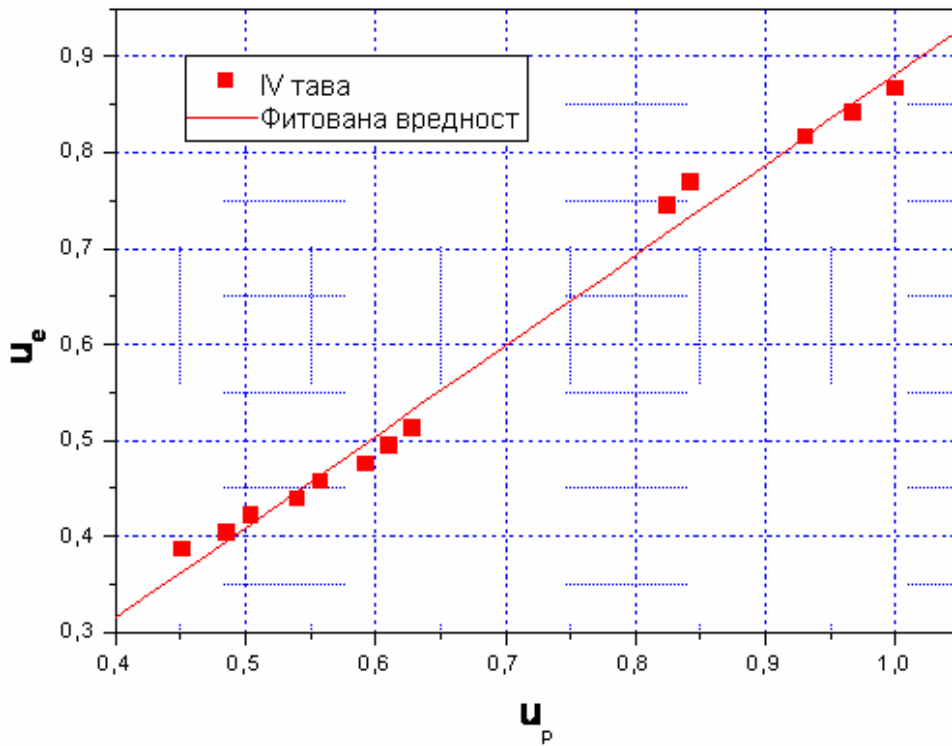
Сл.5.5. Крива брзине сушења $N - u$



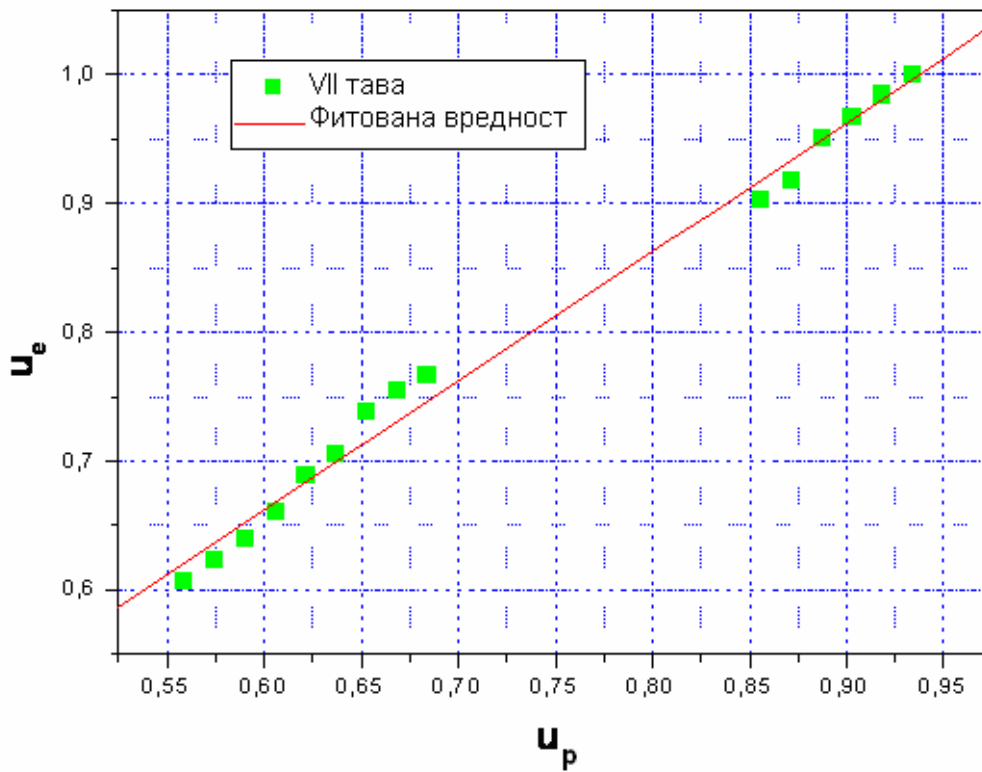
Сл.5.6. Крива брзине сушења $N - u$



Сл.5.7. Приказ одступања експерименталних и претпостављених вредности



Сл.5.8. Приказ одступања експерименталних и претпостављених вредности



Сл.5.9. Приказ одступања експерименталних и претпостављених вредности

5.2. Одређивање карактеристичне криве сушења

Да би се дефинисале карактеристичне влажности, потребно је одредити вредности равнотежних влажности u_r . Подаци који дефинишу, статистику процеса сушења, изотерму сорпције холандског спанаћа су приказани у табели 5.1.(Торић 2010).

Табела 5.1. Вредности равнотежне влажности материјала и релативне влажности агенса сушења

Експериментални подаци:(М.К.Кrokida – 2003.). за $\vartheta = 30^0 C$	
Апсолутна влажност материјала $u_r, \frac{kg_w}{kg_{asm}}$	Релативна влажност средине $\varphi, \%$
4,28	90
3,29	80
2,79	70
2,00	63
1,72	59
1,00	48
0,21	40
Експериментални подаци:(М.К.Кrokida – 2003.). за $\vartheta = 70^0 C$	
0,50	90
0,25	85
0,20	80
0,15	70
0,12	60
0,12	50
0,10	46

При константном притиску и температури, апсолутна равнотежна влажност у неком материјалу u_{hr} (апсолутна влажност у стању равнотеже када је материјал засићен влагом - сатуратед) се мења са променом релативне влажности

окоLINE φ по кривој која има облик слова S и назива се крива сорпције или десорпције. Изотерма сорпције се добија тако што се постепено, почев од стања апсолутно сувог ваздуха ($\varphi=0$) мења релативна влажност ваздуха при константном притиску (обично атмосферски) и температури. За сваку влажност ваздуха мери се, пошто се успостави равнотежа (не мења се више са временом маса узорка хране), маса узорка и из разлике маса влажног и сувог узорка одређује се u_{hr} за ту релативну влажност ваздуха.

Изглед изотерме за неки материјал дат је дијаграмом на на сл.5.10. На кривој се могу уоћити три карактеристичне тачке: А, В и С, које изотерму деле на три области у којима су различити процеси сорпције.

Тачка С одговара максималној равнотежној хигроскопној влажности материјала чија се статика сушења одређује. Неки материјал може да има и већу влажност од максималне хигроскопне и тај вишак влаге представља слободну влагу, која није везана никаквим сорпционим нити значајнијим капиларним силама за скелет материјала.

Она испуњава макрокапиларе у материјалу и покрива његову површину. На изотерми сорпције слободне влаге одговара дуж CD. Енергија за издвајање слободне влаге, која се прво издваја у процесу сушења, једнака је латентној топлоти испаравања воде.

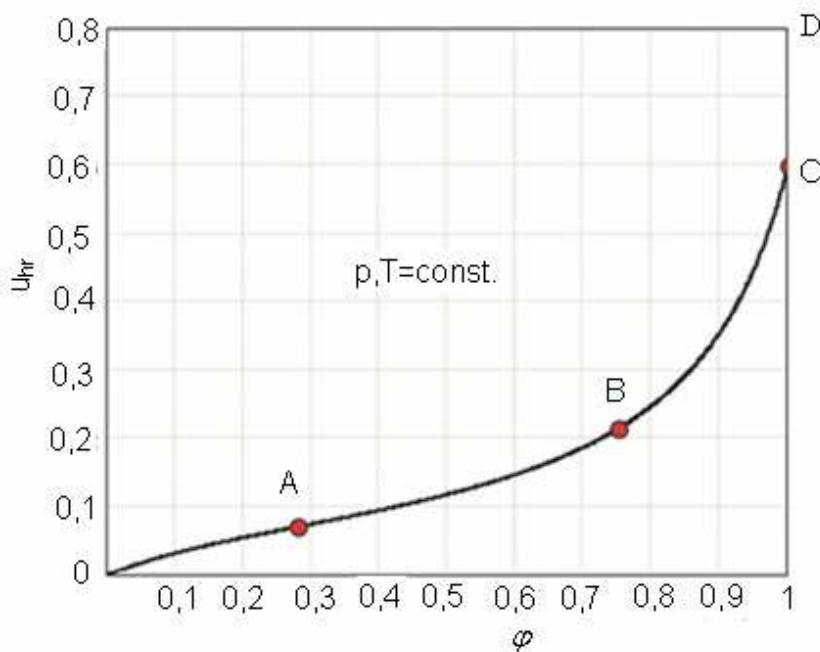
Тачка А представља превојну тачку криве изотерме сорпције. У области ОА (изотерма сорпције) влага је везана у мономолекулском слоју за површину капилара у материјалу, адсорпционим силама. Дакле, нема влаге у течном стању. Мономолекулска адсорпција влаге је егзотерман процес, с топлотом адсорпције реда 103kJ/kg. Енергија потребна за издвајање ове влаге једнака је збиру латентне топлоте испаравања воде и топлоте адсорпције влаге.

У области АВ (изотерма сорпције), влага је везана за скелет материјала капиларном кондензацијом и полимолекулском (вишеслојном) адсорпцијом.

Молекули воде у слојевима су везани силама које потичу од поларности молекула воде за претходно формиран мономолекуларни слој. Како су сорпционе силе у овој области знатно слабије него у претходној и топлота потребна за одстањивање ове влаге у знатно мањем износу превазилази латентну топлоту испаравања воде.

У области ВС, у којој се запажа повећање нагиба изотерме, кондензована влага испуњава макрокапиларе и мали део те воде је везан капиларним силама, па је топлота потребна за њено издвајање незнатно већа од латентне топлоте испаравања воде.

При сушењу материјала, обично се уклања само ова, слабо везана влага, с обзиром да је област АВ обично област највеће стабилности намирнице у погледу кварења.



Сл.5.10. Изотерма сорпције

Аналитичке зависности које приближно описују изотерме сорпције материјала

Од више десетина зависности могу се издвојити две које у ограниченом опсегу релативне влажности ваздуха φ , успешно фитују експерименталне податке о изотермама сорпције:

1. Bruner - Emmet - Teller (BET) једначина и
2. Guggenheim – Anderson - de Boer (GAB) једначина.

Пошто ове зависности имају теоријску основу, оне омогућују процењивање врло важног параметра u_{hrms} количине воде по килограму апсолутно сувог материјала, која је веза на у мономолекуларном слоју.

Ако садржај воде у биолошком материјалу падне испод u_{hrms} , расте оксидација липида, јер нема довољно воде да би се формирао заштитини мономолекуларни слој. Зато је та величина битна за одређивање потребног степена сушења намирнице као и услова њеног складиштења.

BET једначина

Ова двопараметарска зависност представља линеаризовани облик изотерме сорпције:

$$y = \frac{\varphi}{u_{hr}(1-\varphi)} = \frac{1}{u_{hrms} \cdot C} + \frac{C-1}{u_{hrms} \cdot C} \cdot \varphi, \quad (5.1)$$

и успешно описује област ОА изотерме сорпције. Параметар C је у вези са топлотом адсорпције воде.

GAB једначина

Ова тропараметарска зависност:

$$y = \frac{\varphi}{u_{hr}(1-\varphi)} = \frac{1}{u_{hrms} \cdot C} + \frac{C-1}{u_{hrms} \cdot C} \cdot \varphi, \quad (5.2)$$

је новија и боље фитује експерименталне податке од BET једначине. Применљива је у ширем опсегу и успешно описује и ОА и АВ области изотерме.

Смисао параметра C је сличан оном у BET једначини, док трећи параметар k омогућује узимање у обзир присуства течне воде (поред адсорбоване) у материјалу.

Аналитичка зависност GAB се може трансформисати у израз линеаран по параметрима, полином другог степена по релативној влажности φ :

$$y = \frac{\varphi}{u_{hr}} = \frac{1}{u_{hrms} \cdot C \cdot k} + \frac{C-2}{u_{hrms} \cdot C} \cdot \varphi + \frac{k \cdot (1-C)}{u_{hrms} \cdot C} \cdot \varphi^2. \quad (5.3)$$

Пошто се линеарно MNK одреде параметри b_o , b_1 и b_2 , из три једначине са три непознате:

$$b_o = \frac{1}{u_{hrms} \cdot C \cdot k}, \quad b_1 = \frac{C-2}{u_{hrms} \cdot C} \quad \text{и} \quad b_2 = \frac{k \cdot (1-C)}{u_{hrms} \cdot C}$$

се добијају параметри изотерме: u_{hrms} , C и k .

Ако се изједначе изрази за u_{hrms} , добијени из прве, друге и треће једначине (у коефицијенте) добија се зависност:

$$u_{hrms} = \frac{1}{b_o \cdot C \cdot k} = \frac{C-2}{b_1 \cdot C} = \frac{k \cdot (1-C)}{b_2 \cdot C}, \quad (5.4)$$

из које следе две независне једначине по непознатим параметрима k и C :

$$C = 2 + \frac{b_1}{k \cdot b_o}, \quad k^2 (1-C) = \frac{b_2}{b_o}. \quad (5.5)$$

Смена израза за C у другу једначину даје квадратну једначину по k ,

$$k^2 + \frac{b_1}{b_o} \cdot k + \frac{b_2}{b_o} = 0,$$

чији позитивни корен представља тражену вредност параметра k :

$$k = \frac{1}{2} \left[-\frac{b_1}{b_o} + \sqrt{\left(\frac{b_1}{b_o}\right)^2 - 4 \cdot \frac{b_2}{b_o}} \right]. \quad (5.6)$$

Вредност параметра C се добија сменом израза (5.8) у први израз израза (5.5).

Апсолутна хигроскопна равнотежна влажност мономолекуларног слоја се добија заменом добијених вредности k и C у један од израза у изразу (5.4).

Сегмент ВС изотерме сорпције на основу експерименталних података се може успешно фитовати једнопараметраским изразом који важи за течне материјале, јер се може утицај чврсте фазе занемарити у овој области.

На основу података из табеле 5.1, а користећи израз GAB, аналитичка зависност за изотерму сорпције је:

$$u_r = 3 \cdot 10^{-8} \cdot e^{\left[\frac{3647.025}{(273.15 + \theta_g)} \right]} \cdot \left[\frac{\varphi}{1 - \varphi} \right]^{0.7647}$$

$$\theta_g = 31.5^\circ\text{C}$$

$$\varphi_1 = 0.18$$

$$u_{r1} = 0.145$$

$$\varphi_4 = 0.34$$

$$u_{r4} = 0.29$$

$$\varphi_7 = 0.5$$

$$u_{r7} = 0.47$$

на основу којег су одређене одговарајуће равнотежне влажности за услове извођења експеримента.

Да би се дефинисала карактеристична брзина сушења, прво су одређене вредности карактеристичних влажности, на основу раније одређених вредности критичних и равнотежних влажности према изразу:

$$u_k = \frac{u_{sr} - u_r}{u_{krlsr} - u_r}$$

за све таве које су дате у табелама 5.2, 5.3, 5.4.

Табела 5.2. Карактеристичне влажности и брзине за I таву

Интервал	Време, τ [h]	Апсолутна влазност, u [kg _w /kg _{asm}]	Брзина сушења N [kg _w /kg _{asm}]	Генералисана влазност, u_k	Генералисана брзина, f
----------	----------------------	---	---	------------------------------------	--------------------------------

]		
11 ¹⁵	0,0	9,000			
11 ⁴⁵	0,5	8,600	0,800		
12 ¹⁵	1,0	8,198	0,804		
12 ⁴⁵	1,5	7,133	2,130		
13 ¹⁵	2,0	6,600	1,066		
13 ⁴⁵	2,5	6,200	0,800		
14 ¹⁵	3,0	5,800	0,800	1,000	1,000
14 ⁴⁵	3,5	5,532	0,536	0,953	0,670
15 ¹⁵	4,0	5,133	0,798	0,882	0,997
15 ⁴⁵	4,5	4,867	0,532	0,836	0,665
11 ⁰⁰	10,5	3,267	0,268	0,552	0,335
11 ³⁰	11,0	3,133	0,268	0,528	0,335
12 ⁰⁰	11,5	2,999	0,264	0,505	0,330
12 ³⁰	12,0	2,867	0,268	0,481	0,335
13 ⁰⁰	12,5	2,733	0,268	0,458	0,335
13 ³⁰	13,0	2,599	0,264	0,434	0,330
14 ⁰⁰	13,5	2,467	0,268	0,411	0,335
14 ³⁰	14,0	2,333	0,268	0,387	0,335
15 ⁰⁰	14,5	2,333		0,387	0,335

На основу кривих брзина сушења одређене су вредности брзина сушења у првом периоду, које представљају и максималне вредности брзина сушења ($N_{krl}=0.8kg_w/kg_{asm,h}$)I, ($N_{krl}=0.836kg_w/kg_{asm,h}$)IV и ($N_{krl}=0.532kg_w/kg_{asm,h}$)VII, које су послужиле за одређивање вредности карактеристичних брзина сушења, табеле 5.2, 5.3, 5.4, а према изразу:

$$f = \left[\frac{\left(-\frac{du}{d\tau} \right)}{\left(-\frac{du}{d\tau} \right)_{krl}} \right]$$

Табела 5.3. Карактеристичне влажности и брзине за IV таву

Интервал	Време, τ [h]	Апсолутна влажност, u [kg _w /kg _{asm}]	Брзина сушења N_I [kg _w /kg _{asm}]	Генералисана влажност, u_k	Генералисана брзина, F
11 ¹⁵	0,0	9,000			
11 ⁴⁵	0,5	8,864	0,272		
12 ¹⁵	1,0	8,598	0,532		
12 ⁴⁵	1,5	8,198	0,800		
13 ¹⁵	2,0	7,780	0,836	1,000	1,000
13 ⁴⁵	2,5	7,533	0,494	0,967	0,591
14 ¹⁵	3,0	7,266	0,534	0,931	0,639
14 ⁴⁵	3,5	6,699	1,134	0,586	
15 ¹⁵	4,0	6,599	0,200	0,842	0,239
15 ⁴⁵	4,5	6,467	0,264	0,825	0,316
11 ⁰⁰	10,0	4,999	0,267	0,629	0,319
11 ³⁰	10,5	4,867	0,264	0,611	0,316
12 ⁰⁰	11,0	4,733	0,268	0,593	0,321
12 ³⁰	11,5	4,467	0,532	0,558	0,636
13 ⁰⁰	12,0	4,333	0,268	0,540	0,321
13 ³⁰	12,5	4,067	0,532	0,504	0,636
14 ⁰⁰	13,0	3,933	0,268	0,486	0,321
14 ³⁰	13,5	3,667	0,532	0,451	0,636
15 ⁰⁰	14,0	3,533	0,268	0,591	0,321

Обједињена (за оба дана) крива сушења карактеристичне влажности је приказана на сл.5.11..

5.3. Валидација кривих сушења

У циљу провере експерименталних кривих сушења (валидације) искоришћени су познати модели из литературе. Добијени изрази су приказани у табели 5.5. На основу анализе и вредности статистичких параметара најповољнији

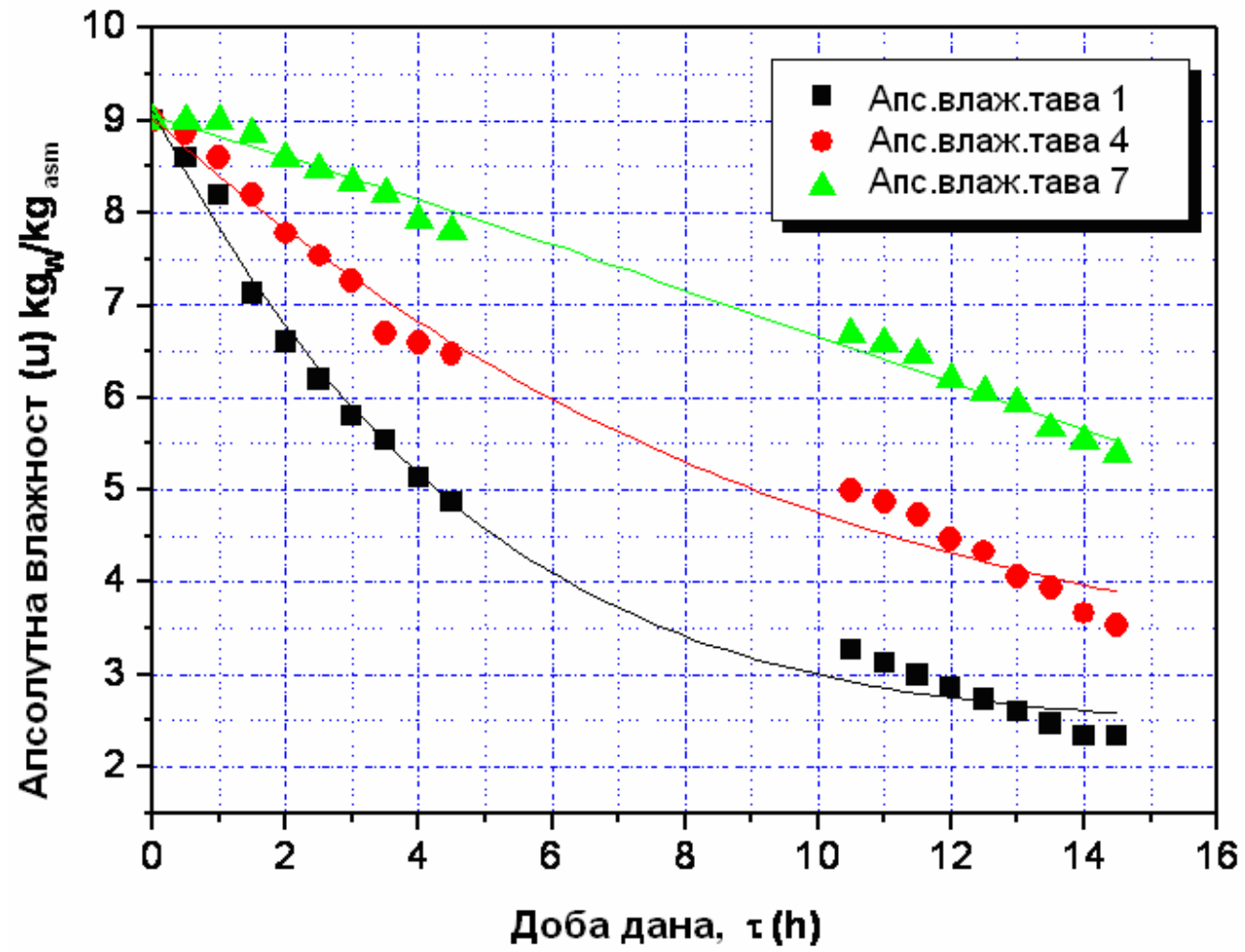
Табела 5.4. Карактеристичне влажности и брзине за VII тава

Интервал	Време, τ [h]	Апсолутна влажност, u [kg _w /kg _{asm}]	Брзина сушења, N_I [kg _w /kg _{asm}]	Генералисана влажност, u_k	Генералисана брзина, F
11 ¹⁵	0,0	9,000			
11 ⁴⁵	0,5	9,000			
12 ¹⁵	1,0	9,000			
12 ⁴⁵	1,5	8,864	0,272		
13 ¹⁵	2,0	8,598	0,532	1,000	1,000
13 ⁴⁵	2,5	8,466	0,264	0,984	0,496
14 ¹⁵	3,0	8,333	0,266	0,967	0,500
14 ⁴⁵	3,5	8,199	0,268	0,951	0,504
15 ¹⁵	4,0	7,933	0,529	0,918	0,994
15 ⁴⁵	4,5	7,799	0,268	0,902	0,504
11 ⁰⁰	10,0	6,699	0,200	0,766	0,376
11 ³⁰	10,5	6,599	0,264	0,754	0,496
12 ⁰⁰	11,0	6,467	0,534	0,738	
12 ³⁰	11,5	6,200	0,266	0,705	0,500
13 ⁰⁰	12,0	6,067	0,268	0,689	0,504
13 ³⁰	12,5	5,933	0,532	0,660	1,000
14 ⁰⁰	13,0	5,667	0,268	0,639	0,504
14 ³⁰	13,5	5,533	0,268	0,623	0,504
15 ⁰⁰	14,0	5,399	0,268	0,606	0,504

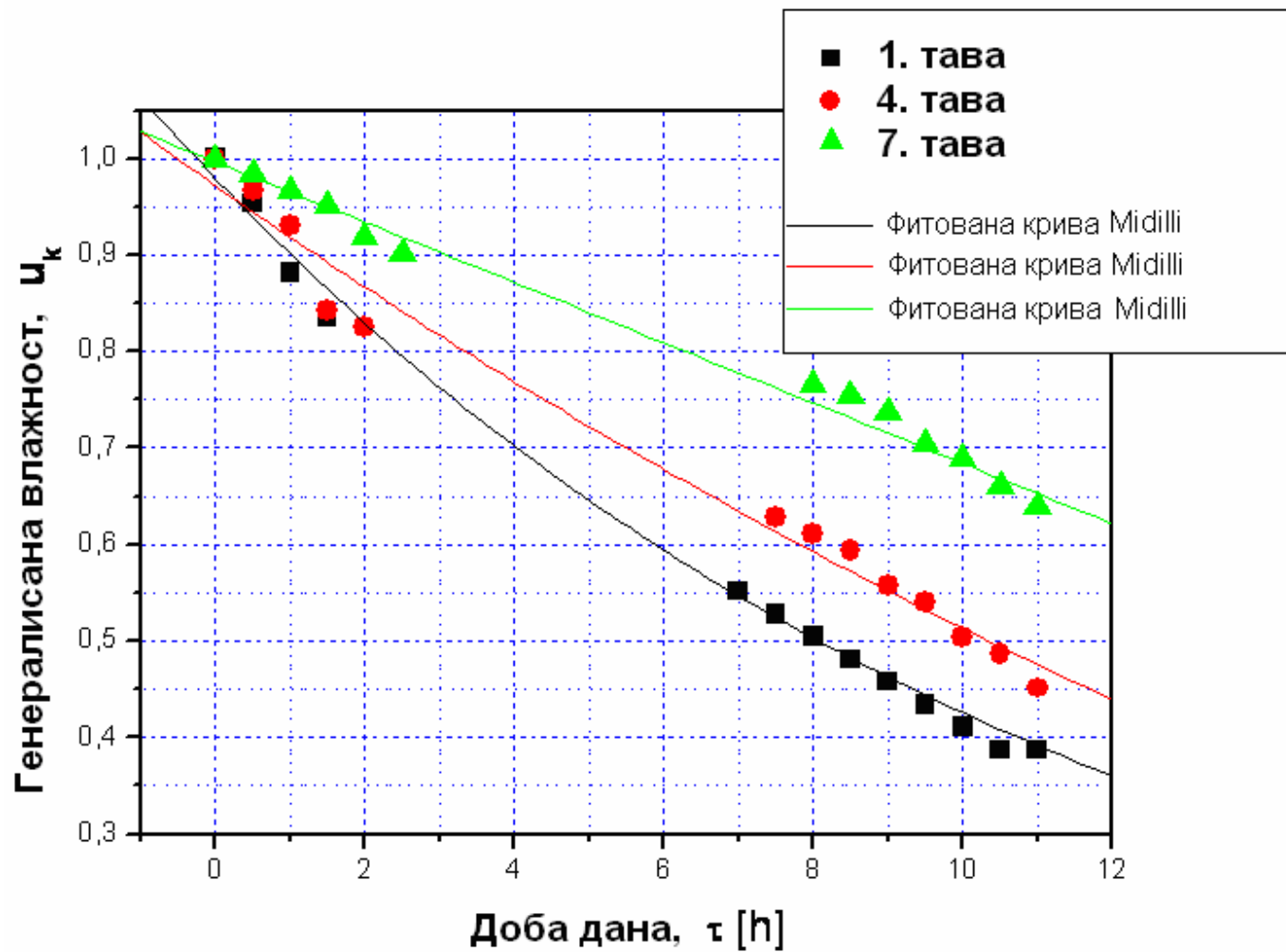
је модел је Midilli и Кусук, чији су статистички параметри $R^2=0,99820313$ и $S_r=0,01497622$ која је графички приказана на сл. 5.12.

Графички приказ осталих модела кинетике сушења су дати у додатку 2..

На основу података из табела 5.2, 5.3, 5.4, су дате криве карактеристичних брзина сушења, $f - u_k$, сл.5.13., за три разматране таве и оба дана, на основу којих се може закључити да ли постоји јединствена карактеристична крива брзине сушења.



Сл.5.11. Крива сушења



Сл. 5.12. Криве сушења са генералисанисаним (карактеристичним) влажностима за модел Мидили и Кучук

Аналитички израз за јединствену карактеристичну криву брзине сушења је тражен у облику полинома:

$$f = a + b \cdot x + c \cdot x^2 + d \cdot x^3 \quad (5.6)$$

и који представља добру основу и помоћ за инжењеријске прорачуне.

Аналитички израз и јединствена карактеристична крива, сл.5.13., показује да све криве соларног сушења добијене карактеристичном влажношћу и карактеристичном брзином сушења, за различите услове експеримента, падају у уско подручје, показујући да утицај промена при различитим условима је мали у испитиваном интервалу. Критеријум да се одреди ваљаност поклапања је била стандардна грешка $S_r=0,19073570$ и коефицијент корелације $R^2=0,61709354$.

5.4. Одређивање ефективне дифузивности

Циљ је да се одреди вредност ефективне дофузивност D_{ef} , за испитиван материјал, (Торић 2010).

Да би се добио профил апсолутне влажности $u(z, \tau)$ по дебљини слоја, који је од неког момента $\tau=0$ са обе стране изложен дејству агенса сушења, предпоставља се пре свега униформно температурно поље (изотермно). У супротном, проблем би био врло комплексан јер би захтевао симултано решавање (интеграцију) једначине преноса топлоте и преноса материје са одговарајућим почетним и граничним условима.

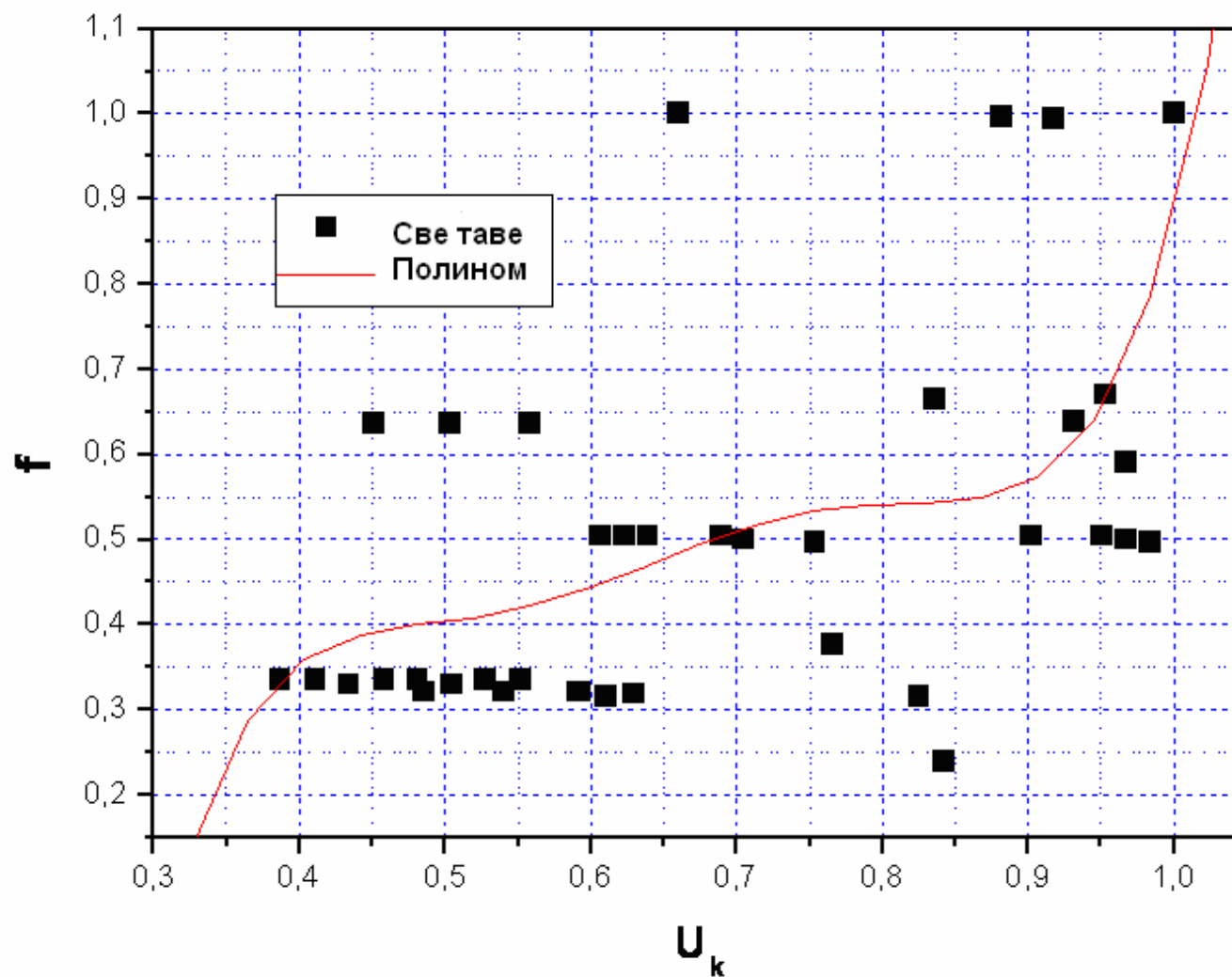
Потребни су почетни и гранични услови за решавање диференцијалне једначине преноса материје, влаге. Предпоставља се да је отпор спољној размени влаге (пренос влаге са површи материјала у непоремећену струју агенса сушења) много мањи од отпора унутрашњем преносу влаге (кроз слој), што значи да је Biot - ов дифузиони број Bi^d :

$$Bi^d = \frac{\beta_e \cdot l}{D_e}, \quad (5.7)$$

Табела 5.5. Валидација кривих кинетике сушења

Назив модела	Израз модела	Коефицијенти			Статистички параметри	
		I тава	IV тава	VII тава	S	R
Newton	$u_k = \exp(-k \times t)$	k=0,87530173	k=0,06668741	k=0,03800567	0,01676532 0,02808774 0,01801819	0,99729658 0,98976323 0,99216460
Page	$u_k = \exp(-k_o \times t^n)$					
Modifikovani Page	$u_k = \exp(-k \times t)^n$					
Henderson & Pabis	$u_k = a \times \exp(-k \times t)$	a=0,98071573 k=0,08506797	a=0,97851883 k=0,06396872	a=1,00395130 k=0,03844616	0,01855971 0,02666592 0,01429630	0,99819884 0,99154985 0,99228083
Logaritamski	$u_k = a \times \exp(-k \times t) + c$	a=0,99023715 k=0,08375905 c=-0,0098548	a=1,4452431 k=0,038207695 c=-0,47292574	a=1,68623020 k=0,02057368 c=-0,68570906	0,01499119 0,02756570 0,01753470	0,99819953 0,99179188 0,99364426
Двопериодични	$u_k = a \times \exp(-k_o \times t) + b \times \exp(-k_1 \times t)$	a=0,49035721 k ₀ =0,08506760 b=0,49035721 k ₁ =0,08506769	a=0,48925942 k ₀ =0,06396867 b=0,48925942 k ₁ =0,06396878	a=0,50197560 k ₀ =0,03844614 b=0,50197560 k ₁ =0,03844614	0,01580515 0,02948029 0,02017652	0,99819884 0,99154985 0,99228083
Двопериодични експоненцијални	$u_k = a \times \exp(-k \times t) + (1 - a) \times \exp(-k \times a \times t)$					

Wang & Singh	$u_k = 1 + a \times t + b \times t^2$	a=-0,0838337 b= 0,0022568	a=-0,06448976 b= 0,00158745	a=-0,02774508 b=-0,00037911	0,01946047 0,03060078 0,01371615	0,99666000 0,98885696 0,99579149
Апроксимативно дифузиони	$u_k = a \times \exp(-k \times t) + (1 - a) \times \exp(-k \times b \times t)$					
Модификован Henderson & Pabis	$u_k = a \times \exp(-k \times t) + b \times \exp(-g \times t) + c \times \exp(-h \times t)$	a=0,32690480 k=0,08506769 c=0,32690480 d=0,08506769 e=0,32690480 f= 0,08506769	a=0,32617295 k=0,06396872 c=0,32617295 d=0,06396872 e=0,32617295 f= 0,06396872	a=0,33465045 k=0,03844618 c=0,33465045 d=0,03844618 e=0,33465045 f= 0,03844618	0,01792136 0,03342751 0,02230599	0,99819884 0,99154985 0,99228083
Топић	$u_k = a + b \cdot \exp(-0,5 \cdot ((\tau - c) / d)^2)$	a=0,09773005 b=6,74272120 c=-44,780736 d=22,1962430	a=-0,34115762 b= 9,14450960 c=-95,1890980 d= 48,3036510	a=-3,03544963 b= 4,15624697 c=-12,0477556 d= 46,9517776	0,01634575 0,02917416 0,01332810	0,99807340 0,99172516 0,99579149
Midilli & Kucuk	$u_k = a \cdot \exp(-k_o \cdot \tau) + b \cdot \tau$	a=0,97996367 k=0,08322396 b=-0,0007989	a=0,97182025 k=0,04587649 b=-0,01012341	a=0,99671319 k=0,0001577145 b=-0,031111345	0,01497622 0,02748153 0,01510060	0,99820313 0,99184214 0,99529023



Сл.5.13. Јединствена карактеристична крива брзине сушења, f - u_k

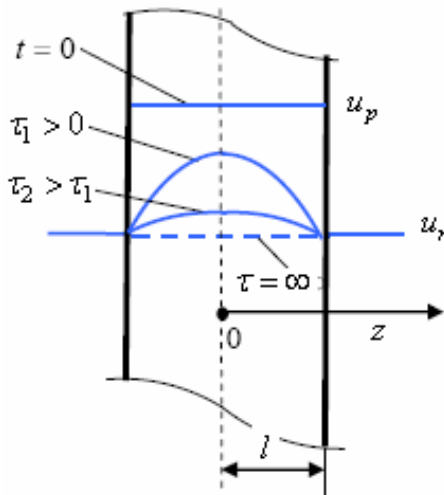
који је аналоган Biot - овом броју за пренос топлоте, врло велики, ($Bi^d \rightarrow \infty$). То значи да се у процесу спољашње дифузије успоставља термодинамичка равнотежа, што значи да концентрација влаге у спољашњим површима слоја одговара равнотежној влажности u_r , у посматраном материјалу, за дату вредност релативне влажности агенса сушења. Ако се предпостави униформност поља влажности (изостерност) материјала пре излагања процесу сушења могуће је представити одговарајуће профиле сл.5.14., и формулисати почетне и граничне услове:

$$\tau = 0 \quad u(z, 0) = u_o, \quad (5.8)$$

$$z = 0 \quad \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (\text{услов екстремних вредност, или симетричности}), (5.9)$$

$$z = l \quad u(l, \tau) = u_r \quad (Bi^d \rightarrow \infty). \quad (5.10)$$

Увођењем нових, бездимензионих променљивих z_g, τ_g и u_g , сменама:



Сл.5.14 Профил влажности у слоју који се суши

$$z_g = \frac{z}{l}, \quad \tau_g = \frac{\tau \cdot D_e}{l^2}, \quad u_g = \frac{u - u_r}{u_p - u_r}, \quad (5.11)$$

преводи се у бездимензиони облик диференцијална једначина преноса влаге (други Fick -ов закон):

$$\frac{\partial^2 u_g}{\partial z_g^2} = \frac{\partial u_g}{\partial \tau_g}, \quad (5.12)$$

са почетним и граничним условима:

$$\tau_g = 0 \quad u_g(z_g, 0) = 1, \quad (5.13)$$

$$z_g = 0 \quad \frac{\partial u_g}{\partial z_g} = 0, \quad (5.14)$$

$$z = 1 \quad u_g(1, \tau_g) = 0. \quad (5.15)$$

Решење је идентично бездимензионом решењу једначине преноса топлоте кроз слој при врло великом Биот - овом броју:

$$u_g(z_g, \tau_g) = 2 \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-1)^i}{(i+0,5) \cdot \pi} \exp\left[-(i+0,5)^2 \pi^2 \cdot \tau\right] \cos\left[(i+0,5) \cdot \pi \cdot z_g\right], \quad (5.16)$$

Уношењем решења за генерализане величине, тражени нестационарни профил влажности је:

$$u(z, \tau) = u_r + u_g\left(\frac{z}{l}, \frac{D_e \tau}{l^2}\right) \cdot (u_p - u_r). \quad (5.17)$$

У практичним прорачунима, за веће вредности бездимензионог времена τ_g , (Фуријеовог броја) $\tau_g > 0,2$ довољно је узети само први члан ($i=0$) од бесконачно много чланова збира (5.16):

$$u_g(z_g, \tau_g) \approx \frac{4}{\pi} \cos\left(\frac{\pi z_g}{2}\right) \cdot \exp\left[-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \tau_g\right], \tau_g > 0,2, \quad (5.18)$$

а за $0 < \tau_g < 0,5$ довољна су прва три или четири члана збира.

Експериментално одређивање ефективне дифузивности

Од практичног интереса за процес сушења је праћење средње апсолутне влажности у слоју за различита времена сушења. Средња апсолутна влажност се дефинише као количник укупне количине влаге у неком материјалу и укупне апсолутно суве масе у њему. У неком моменту τ након отпочињања сушења, математички се може одредити средња вредност апсолутне влажности посматраног слоја полудебљине l као средња вредност функције $u(z, \tau)$ у интервалу $0 < z < l$:

$$u(\tau)_{sr} = \frac{1}{l} \int_0^l u(z, \tau_g) dz. \quad (5.19)$$

Једначина уствари даје средњу влажност полуслоја дебљине l , али због симетричности, сл.5.14., што је истовремено и средња влажност целог слоја. Средња влажност у неком материјалу, након сушења у трајању τ се експериментално добија као количник укупне измерене количине влаге у материјалу и масе апсолутно сувог материјала.

Уместо да се користи израз (5.19) практичније је по аналогном изразу одредити средњу бездимензиону влажност слоја, што значи средњу вредност функције $u_g(z_g, \tau_g)$ у одговарајућем интервалу бездимензионе координате: $0 < z_g < l$:

$$u_{gsr}(\tau) = \int_0^1 u_g(z_g, \tau_g) dz_g, \quad (5.20)$$

а онда, имајући у виду да је веза између u_g и u_{gsr} идентична вези u и u_g (што се лако може доказати смењујући везу између u и u_g у израз за средњу влажност ,

одакле се израчунава:

$$u_{sr}(\tau) = u_r + u_{gsr} \left(\frac{D_e \tau}{l^2} \right) \cdot (u_p - u_r). \quad (5.21)$$

Како подинтегрална функција у (5.20) има облик збира, може се искористити правило да је интеграл збира једнак збиру интеграла. Тражени интеграл општег члана (чији је индекс i) у збиру (5.16) је:

$$\begin{aligned} & \int_0^1 \frac{(-1)^i}{(i+0,5) \cdot \pi} \exp \left[-(i+0,5)^2 \pi^2 \cdot \tau_g \right] \cos \left[(i+0,5) \cdot \pi \cdot z_g \right] \cdot dz_g \\ &= \frac{(-1)^i}{(i+0,5) \cdot \pi} \exp \left[-(i+0,5)^2 \pi^2 \cdot \tau_g \right] \int_0^1 \cos \left[(i+0,5) \cdot \pi \cdot z_g \right] \cdot dz_g \\ &= \frac{(-1)^i}{(i+0,5)^2 \cdot \pi^2} \exp \left[-(i+0,5)^2 \pi^2 \cdot \tau_g \right] \sin \left[(i+0,5) \cdot \pi \cdot z_g \right]_0^1 \\ &= \frac{(-1)^i}{(i+0,5)^2 \cdot \pi^2} \exp \left[-(i+0,5)^2 \pi^2 \cdot \tau_g \right] \sin \left[(i+0,5) \cdot \pi \right] \end{aligned}$$

па је интеграл бесконачног реда (5.18), што значи средња влажност (5.20):

$$u_{gsr}(\tau_g) = 2 \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-1)^i}{(i+0,5)^2 \cdot \pi^2} \exp \left[-(i+0,5)^2 \pi^2 \cdot \tau_g \right] \sin \left[(i+0,5) \cdot \pi \right]$$

Имајући у виду да је:

$$\sin \left[(i+0,5) \pi \right] = (-1)^i \quad i = 0, 1, 2, \dots$$

за средњу бездимензиону влажност се добија бесконачан ред:

$$u_{gsr}(\tau_g) = 2 \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\exp \left[-(i+0,5)^2 \pi^2 \tau_g \right]}{(i+0,5)^2 \pi^2}. \quad (5.22)$$

За веће вредности бездимензионог времена (Фурјеовог броја) τ_g , $\tau_g > 0,2$ приближна вредност средње апсолутне влажности добија се као први члан реда (5.22):

$$u_{gsr}(\tau_g) = 2 \frac{\exp\left[-\frac{\pi^2 \tau_g}{4}\right]}{\frac{\pi^2}{4}}, \tau_g > 0,2, \quad (5.23)$$

или у функцији оригиналног времена:

$$u_{gsr}(\tau) = \frac{8}{\pi^2} \cdot \exp\left[-D_e \frac{\pi^2}{4 \cdot l^2}\right] \frac{D_e \cdot \tau}{l^2} > 0,2 \quad (5.24)$$

а за мање вредности τ_g од практичног интереса, довољна су прва или три или највише четири члана.

Ако се логаритмује (5.24), добија се праволинијска зависност логаритма средње бездимензионе влажности од времена:

$$\ln u_{gsr} = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{D_e \pi^2}{4 \cdot l^2} \cdot \tau. \quad (5.25)$$

па из нагиба праве у експериментално добијеном дијаграму $\tau - \ln u_{gsr}$, може се добити вредност ефективне дифузивности влаге D_e .

Вредности ефективне дифузивности за неке биолошке материјала се крећу на основу података из литературе у интервалу од 10^{-9} - 10^{-11} m²/s.

Најшире је коришћен теоријски модел сушења различитих врста биолошких материјала који се заснива се на другом Fick - овом закону (Doymaz and Pala, 2002; Sacilik et al., 2005; Diamante and Munro, 1993; Liu and Bakker – Arkema, 1997):(Gokhan Gurlek, 2009).

Fick - ов закон за пренос материје је дефинисан изразом:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = D_e \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}, \quad (5.26)$$

где је: u - локална апсолутна влажност,

τ - време,

z - координата и

D_e - ефективна дифузивност по m^2/s .

Да би се Fick - ов закон применио, узима се да је узорак биолошког материјала обично једнодимензионалан, да има униформно поље влажности и да постоји унутрашње кретање влаге.

Решење Fick - овог закона је дато изразом:

$$\frac{u_\tau - u_e}{u_{krl} - u_e} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \cdot \exp\left[-(2n+1)^2 \cdot \pi^2 \cdot \frac{D_e \cdot \tau}{4 \cdot l^2}\right], \quad (5.27)$$

где је: u_τ , u_e , u_{krl} - респективно апсолутне влажности, тренутна, равнотежна и прва критична,

τ - време,

l - полу дебљина слоја, узорка, спанаћа.

За дужа времена процеса сушења (предпоставка $n=1$), израз (5.28) добија облик:

$$\ln\left(\frac{u_\tau - u_e}{u_{krl} - u_e}\right) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 \cdot D_e \cdot \tau}{4 \cdot l^2}\right), \quad (5.28)$$

Генералисана, бездимензиона влажност се дефинише изразом:

$$u_g = \frac{u_\tau - u_e}{u_{krl} - u_e} \quad . \quad (5.29)$$

Криве сушења које су добијене су тестиране са дванаест различитих аналитичких израза за генералисану влажност, различитих аутора, табела 5.5..

Вредности ефективне дифузивности су многи истраживачи дефинисали преко $\ln(u/u_p)$, (Ozdemir и Devers, 1999; Ayensu, 1977; Doymaz, 2004).

5.4.1. Анализа експерименталних резултата

Експериментални подаци о сушењу за спанаћ тестирани су према моделима кинетике сушења у табели 5.5., коришћењем регресионе анализе.

Коефицијент корелације (R^2) био је један од значајних критеријума за одабир најбоље једначине за соларне криве сушења за сушене узорке спанаћа.

Поред коефицијента корелације (R^2), коришћен је и корен главне квадратне грешке (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (u_{gprei} - u_{gexpi})^2}{N}}, \quad (5.30)$$

RMSE приказује одступања између предвиђених вредности и експерименталних вредности и од њега се захтева да дође на нулу.

У једначинама u_{gexpi} је експериментална вредност генералисане апсолутне влажности која се може наћи у било ком мерењу, а $u_{gpre,i}$ је предвиђена вредност генералисане апсолутне влажности у датом мерењу.

N је број мерења, n је број константи, а u_{expsr} је средња вредност експерименталних вредности апсолутних генералисаних влажности.

Најбољи модел који описује понашање спанаћа одабран је као модел са највећим коефицијентом одређивања и кореном главне квадратне грешке.

5.4.2. Резултати и анализа

Током извођења експеримената, температура ваздуха околине се мењала у границама од 26 до 36°C, релативна влажност ваздуха околине од 38 до 60%., (Торић 2010).

Експериментални подаци добијени су за агенс сушења температуре у границама од 32 до 56°C. Током експеримената, време сушења за добијање крајње апсолутне влажности од 3,75 kg_w/kg_{asm} за сушење у соларној коморној сушари је 14.5 h. Одговарајуће криве приказане су на сл.5.2. и 5.3., за следеће режиме: $t_{asI} = 46.5^{\circ}C$, $t_{ol} = 31.3^{\circ}C$, $\varphi_{ol} = 42.3\%$ и $t_{asII} = 38.778^{\circ}C$, $t_{ol} = 28.8^{\circ}C$, $\varphi_{ol} = 46.3\%$.

На основу параметара регресионе анализе табела 5.5., најповољнији модел је модел Midilli & Kucuk –а чији су статистички параметри R^2 и RMSE, у границама од 0.019286116 до 0.0295703 и од 0.99323527 до 0.994545223.

У складу са табелом 5.5, модели Midilli & Kucuk - а показују добар склад са експерименталним подацима и дају бољи резултат за узорке спанаћа, сл.5.14..

За одређивање вредности ефективне дифузивности према моделу Midilli & Kucuk коришћена је зависност:

$$\left(\frac{u_{\tau} - u_e}{u_{krI} - u_e} \right) = a \cdot \exp(-k_o \cdot \tau) + b \cdot \tau, \quad (5.32)$$

где је: $a=0.979996367$, $k_o=0.048290633$ и $b= - 0.01401192$ за спанаћ.

Вредности ефективне дифузивности су: $2.05 \cdot 10^{-10} m^2 / s$; $1.54 \cdot 10^{-10} m^2 / s$ и $0.763 \cdot 10^{-10} m^2 / s$, редом, за прву, четврту и седму таву.

Ефективна дифузивност рачуната помоћу једначине (5.7) за сушење у коморној соларној сушари је $1,45 \cdot 10^{-10} m^2 / s$.

Модел Midilli & Kucuk обезбедио је задовољавајуће добру сагласност између експерименталних и предвиђених апсолутних влажности и даје вредности који су углавном распоређени око праве линије, што је показало адекватност овог модела у описивању процеса сушења листа холандског спанаћа приликом сушења у соларној коморној, еколошкој, покретној индиректној, активној сушари и дефинисању карактеристичне криве сушења и одређивању вредности ефективне дифузивности.

Закључак

Познато је да је експериментално одређивање времена трајања процеса сушења везано за одређени материјал који се суши и услове при којима се изводи сваки експеримент.

Зато се одређивање времена трајања процеса сушења за друге услове мора да врши аналитички на основу уопштавања резултата кинетике процеса сушења.

Такође упоређење рада сушара различитих капацитета није могуће на основу промене масе материјала у процесу сушења. То је могуће на основу криве сушења као елемента кинетике процеса сушења.

У овом раду је проучавана кинетика конвективног процеса сушења спанаћа у танком слоју, а на основу експерименталних резултата добијених испитивањем модула покретне, универзалне, еколошке, конвективне, индиректне коморне, соларне сушаре, који је приказан у раду.

Експериментални резултати су послужили за дефинисање кинетике сушења (кривих сушења и кривих брзина сушења), анализу утицаја параметара материјала и агенса сушења на кинетику процеса сушења.

Анализа кривих кинетике сушења показује да постоје оба периода процеса сушења.

Експериментални резултати су такође послужили за одређивање ефективне дифузивности и карактеристичне криве брзине сушења и валидацију резултата помоћу модела из литературе, за други период сушења – период опадајуће брзине сушења.

Дефинисане су и аналитичке зависности промене количине издвојене влаге у процесу сушења по висини коморе, па је могуће без обзира што су у току експеримента праћене само три реперезентне таве (I, IV и VII) дефинисати стања са аспекта агенса сушења и материјала који се суши за свих десет тава које су смештене у комори за сушење.

Преглед литературе и постојећих модела је показао да се за биолошке материјале који се суше у слоју у коморним сушарама за анализу процеса сушења, други период сушење или период опадајуће брзине сушења, може користити успешно математички модел карактеристичне брзине сушења.

Квантитативне законитости процеса сушења је могуће дефинисати на основу методе, карактеристичне брзине процеса сушења.

Дефинисане влажности на основу мерења промене масе влажног материјала у процесу сушења су послужиле за дефинисање карактеристичне влажности и карактеристичне брзине сушења, према Van Den Millu, које су неопходне за дефинисање карактеристичних кривих сушења и јединствене карактеристичне криве брзине сушења.

Такође у ту сврху су дефинисане и вредности равнотежних влажности према зависности GAB.

Анализа је показала да постоји јединствена карактеристична крива брзине процеса сушења облика полинома, чији аналитички израз је наведен у раду, која представља личну карту материјала који се суши.

У циљу валидације података, кривих кинетике сушења, извршено је упоређење са 13 модела конвективног процеса сушења, познатих у литератури. На основу статистичких параметара [$R^2=0,99820313$, (C^2)] може се закључити да најбоље поклапање од свих модела даје модел Midilli & Kucuk.

Користећи зависност криве сушења по моделу Midilli & Kucuk, која најбоље покрива експеримент, одређена је вредност ефективне дифузивности D_{ef} , коришћењем модела другог закона Fick - а, и решавањем истог за случај танког слоја материјала и узимајући да је карактеристична влажност:

$$u_g = \frac{u_\tau - u_e}{u_{krl} - u_e}$$

Коришћење методе карактеристичне брзине сушења f обезбеђује при анализи процеса сушења јасан увид утицаја материјала, карактера рада постројења за сушење и параметара околине, влажности на процес сушења.

Метода карактеристичне брзине сушења даје могућност да се на основу анализе експерименталних истраживања процеса сушења успостави веза између карактеристичне брзине сушења и апсолутне влажности материјала, и да

релативно једноставан израз за прорачун времена сушења на основу вредности карактеристичне брзине сушења.

Пошто метода карактеристичне брзине сушења f омогућава искључивање утицаја параметара агенса сушења на интензитет процеса сушења, добијени математички модел на основу експерименталних резултата се може успешно користити у инжењерским прорачунима и дефинисању правих решења.

Даља истраживања би се могла одвијати у извођењу експерименталних резултата у циљу потврђивања дефинисаних математичких модела билансирања решења покретне, универзалне, еколошке, коморне, конвективне, индиректне, активне соларне сушаре и процеса сушења.

Литература

Alvarez et al., 1995., C.A. Alvarez, R. Aguerre, R. Gomez, S. Vidales, S.M. Alzamora, L.N. Gerschenson, Air dehydration of strawberries: effect of blanching and osmotic pretreatments on the kinetics of moisture transfer, *Journal of Food Engineering*, 25 (1995), pp. 167–178

Bala and Woods., 1992, B.K. Bala, J.L. Woods Thin layer drying model for malt, *Journal of Food Engineering*, 16 (1992), pp. 239–249

Becker, 1959., H.A. Becker, A study of diffusion in solids of arbitrary shape, with application to the drying of the wheat kernel, *Journal of Applied Polymer Science*, 1 (2) (1959), pp. 212–226

Berna et al., 1991., A. Berna, C. Roselló, J. Cañellas, A. Mulet, Drying kinetics of a Majorcan seedless grape variety, *Technology Today*, 3 (1991), pp. 134–137

Bird et al., 1960., R.B. Bird, W.E. Stewart, E.N. Lightfoot, *Transport phenomena*, Wiley Publishers, Inc., New York (1960)

Chavez-Mendez et al., 1995., C. Chavez-Mendez, M.A. Salgado-Cervantes, H.S. García-Galindo, J. DE LA Cruz-Medina, M.A. García-Alvarado, Modelling of drying curves for some foodstuffs using a kinetic equation of high order, *Drying Technology*, 13 (8&9) (1995), pp. 2113–2122

Comans 2000., Coumans, W. J., (2000): Models for drying kinetics based on drying curves of slabs, *Chemical Engineering and Processing*, Volume 39, Issue 1, pp. 53-68.

Crank, 1975., J. Crank, *The mathematics of diffusion*, (2nd ed.)Oxford university Press (1975)

Дедеић 2006, Дедеић, Е., Анализа погонских карактеристика на тунелској сушари у „ИГМ“ Слога из Новог Пазара, 13 Симпозијум Електране, 19 – 22 септембар, Врњачка Бања.

Дедеић и други 2006., Дедеић, Е., Вучковић, Г., Вукић, М., Енергетски биланс сушаре у „ИГМ“ Слога из Новог Пазара, 13 Симпозијум термичара Србије, СИМТЕРМ 2007, Зборник апастраката, ИСНБ 86 – 80587 – 70 – 2, с.с. 38.

Дедеић и други 2008., Дедеић, Е., Вучковић, Г., Вукић, М., Вучковић, М., Вукић, М.: Упоредна анализа коморне и тунелске сушаре у „ИГМ“ Слога из Новог Пазара са аспекта енергетске ефикасности, конференција Индустијска енергетика и заштита животне средине у земљама југоисточне Европе, Зборник апстраката, ИСНБ 978 – 86 – 7877 – 010 – 4, с.с. 31.

Di Matteo et al., 2000., M. Di Matteo, L. Cinquanta, G. Galiero, S. Crescitelli, Effect of a novel physical pre-treatment process on the drying kinetics of seedless grapes, Journal of Food Engineering, 46 (1) (2000), pp. 83–89

Di Matteo et al., 2002., M. Di Matteo, L. Cinquanta, G. Galiero, S. Crescitelli, Physical pre-treatment of plums (*Prunus domestica*). Part 1. Modelling the kinetics of drying, Journal of Food Engineering, 79 (1) (2002), pp. 227–232

Di Matteo et al., 2003., M. Di Matteo, L. Cinquanta, G. Galiero, S. Crescitelli, A mathematical model of mass transfer in spherical geometry: plum (*Prunus domestica*) drying, Diffusive drying kinetics in wheat. Part 1. Potential for a simplified analytical solution, Journal of Agricultural Engineering Research, 80 (2001), pp. 351–362

Giner et al., 1996., S.A. Giner, R.H. Mascheroni, M.E. Nellist, Cross-flow drying of wheat. A simulation program with a diffusion-based deep-bed model and a kinetic equation for viability loss estimations, Drying Technology, 14 (7&8) (1996), pp. 1625–1671

Hawladar et al., 1999., M.N.A. Hawladar, J.C. Ho, Z. Qing, A mathematical model for drying of shrinking materials, Drying Technology, 17 (1&2) (1999), pp. 27–47

Hernandez et al., 2000., J.A. Hernandez, G. Pavón, M.A. García, Analytical solution of mass transfer equation considering shrinkage for modelling food drying kinetics Journal of Food Engineering, 45 (2000), pp. 1–10

Himmelblau and Bischoff, 1976., D.M. Himmelblau, K.B. Bischoff, Process analysis and simulation, John Wiley & Sons, Inc., New York (1976)

Idlimam et al., 2007., Idlimam A., C.S. Ethmane Kane and M. Kouhila, (2007), Single layer drying behaviour of grenade peel in a forced convective solar dryer *Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°2 (2007) 191 – 203.*

- Karathanos et al., 1990.,** V.T. Karathanos, G. Villalobos, G.D. Saravacos
Comparison of two methods of estimation of the effective moisture diffusivity from drying data, *Journal of Food Science*, 55 (1) (1990), pp. 218–231
- Kechaou and Maalej, 2000.,** N. Kechaou, M. Maalej, A simplified model for determination of moisture diffusivity of date from experimental drying curves, *Drying Technology*, 18 (4&5) (2000), pp. 1109–1125
- Крокида атал 2003.,** Krokida, M.K., Karathanos, V.T., Maroulis, Z.B., Marinos-Kouris, D., (2003): Drying kinetics of some vegetables, *Journal of Food Engineering*, Volume 59, Issue 4, pp. 391- 403.
- Lima De and Nebra, 2000.,**A.G.B. Lima De, S.A. Nebra, Theoretical analysis of the diffusion process inside prolate spheroidal solids, *Drying Technology*, 18 (1&2) (2000), pp. 21–48
- Lima De et al., 2002.,** A.G.B. Lima De, M.R. Queiroz, S.A. Nebra, Simultaneous moisture transport and shrinkage during drying of solids with ellipsoidal configuration, *Chemical Engineering Journal*, 86 (2002), pp. 85–93
- Marquez, 2003.,** Marquez, C. A. (2003). Deshidratación de Rosa Mosqueta (Rose Hip). Tesis Doctoral. Departamento de Tecnología de Alimentos, Universidad Politécnica de Valencia.
- Masi and Riva, 1988.,** P. Masi, M. Riva, Modelling grape drying kinetics, S. Bruin (Ed.), *Preconcentration and drying of food materials*, Elsevier science
- Maskan et al., 2002.,** A. Maskan, S. Kaya, M. Maskan, Hot air and sun drying of grape leather (pestil), *Journal of Food Engineering*, 54 (2002), pp. 81–88
- Medeiros and Sereno, 1994.,** G.L. Medeiros, A.M. Sereno, Physical and transport properties of peas during warm air drying, *Journal of Food Engineering*, 21 (1994), pp. 355–363
- Midilli and Kucuk, 2003.,** A. Midilli and H. Kucuk, ‘*Mathematical Modelling of Thin Layer Drying of Pistachio by Using Solar Energy*’, *Energy Conversion and Management*, Vol. 44, N°7, pp. 1111 - 1122, 2003.
- Mulet, 1994.,** A. Mulet, Drying modelling and water diffusivity in carrots and potatoes, *Journal of Food Engineering*, 22 (1994), pp. 329–348

Ochoa et al., 2002., M.R. Ochoa, A.G. Kessler, B.N. Pirone, C.A. Marquez A. De Michelis Shrinkage during convective drying of whole rose hip (*Rosa Rubiginosa* L.) Fruits Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie, 35 (5) (2002), pp. 400–406

Pangavhane et al., 1999., D.R. Pangavhane, R.L. Sawhney, P.N. Sarsavadia, Effect of various dipping pretreatment on drying kinetics of Thompson seedless grapes, Journal of Food Engineering, 39 (1999), pp. 211–216

Pangavhane et al., 2000., D.R. Pangavhane, R.L. Sawhney, P.N. Sarsavadia Drying kinetic studies on single layers Thompson seedless grapes under controlled, heated air conditions, Journal of Food Processing and Preservation, 24 (2000), pp. 335–352

Park et al., 2001., K.J. Park, M.K.M. Yado, F.P.R. Brod, Estudo da Secagem de Pera Bartlett (*Pyrus* sp.) em Fatias, Ciencia e Tecnología de Alimentos. Campinas, 21 (3) (2001), pp. 288–292

Parry, 1985., J.L. Parry, Mathematical modelling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying: a review, Journal of Agricultural Engineering Research, 32 (1) (1985), pp. 1–29

ПЕ., Пољопривредна енциклопедија, том 3., (1973), Југословенски лексикографски завод, Загреб.

Queiroz and Nebra, 2001., M.R. Queiroz, S.A. Nebra, Theoretical and experimental analysis of the drying kinetics of

Ratti, 1991., Ratti, C. (1991). Diseño de Secaderos de Productos Frutihortícolas. Tesis Doctoral. Departamento de Química e Ingeniería Química, Planta Piloto de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.

Rovedo et al., 1995., C.O. Rovedo, C. Suarez, P. Viollaz, Drying of foods: evaluation of a drying model Journal of Food Engineering, 26 (1995), pp. 1–12

Sabarez and Price, 1999., H.T. Sabarez, W.E. Price, A diffusion model for prune dehydration Journal of Food Engineering, 42 (1999), pp. 167–172

Simal et al., 1997., S. Simal, E. Deyá, M. Frau, C. Roselló, Simple modelling of air drying curves of fresh and osmotically pre-dehydrated apple cubes, Journal of Food Engineering, 33 (1997), pp. 139–150

Simal et al., 1996., S. Simal, J. Mulet, P.J. Catalá, J. Cañellas, C. Roselló, Moving boundary model for simulation moisture movement in grapes, *Journal of Food Science*, 61 (1) (1996), pp. 157–160

Thakor et al., 1999., N.J. Thakor, S. Sokhansanj, F.W. Sosulski, S. Yannacopoulos, Mass and dimensional changes of single canola kernels during drying, *Journal of Food Engineering*, 40 (1999), pp. 153–160

Togrul and Pehlivan, 2002., I.T. Togrul, D. Pehlivan, Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers, *Journal of Food Engineering*, 55 (2002), pp. 209–216

Togrul and Pehlivan, 2003., I.T. Togrul, D. Pehlivan, Modelling of drying kinetics of single apricots, *Journal of Food Engineering*, 58 (2003), pp. 23–32

Topić 2002., Topic M. R.,: Direct use of Solar Energy for drying medicinal herbs, aromatic plants and spices, *Proceedings, SETT- 2002 – Moscow, Russia, Volume 2*, pp. 130-135.

Topić 2003., Topic M. R.,: Small capacity Mobile Dryers for Drying Biological Materials, Dedicated to professor Chong Wen Cao on the occasion of his 75 th birthday, *Drying technology an International journal*, volume 21, number 6, Marcel Dekker, New York,

Topić 2004., Топић, М. Р.,: Покретна сушара за сушење биолошких материјала комбинованим коришћењем соларне енергије, Савезни завод за интелектуалну својину, Патентна пријава 138/04.

Topić et al 2005., Topic M.R.,: A Mathematical model of the solar drying process of biological materials, *SETT 2005 - Moscow, Russia*.

Topić 2005., Топић, М. Р.: Завршни извештај за пројекат, Истраживање и развој покретне универзалне соларне сушаре за сушење биолошких материјала, НПЕЕ 216068, Министарство за науку и заштиту животне средине Републике Србије, Београд.

Топић и други 2008., Топић, Р.М., Петровић, А.Љ., Божовић, М. Р., Ћупрић, Н. Љ., Дедеић, Е.: Међузависност процеса сушења, обновљивих извора енергије и одрживог развоја, конференција „Одрживи развој и климатске промене“ 19 и 20 јун , 2008, Зборник радова, Ниш.

Топић 2010., Topic M. R.: Solar cabinet drying characteristics and mathematical modelling of spinach leaf, Proceedings 18th International Drying symposium, Magdenburg, Germany.

Топић и други 2011., Topić, R., Ћупрић, N., Topić, J. (2011): Justification of utilization of solar dryers and selecting the right technology choises, Proceedings of the First International Coference, PTEP, Zrenjanin, Serbia. pp. 218-223.

Tsami and Katsioti, 2000., E. Tsami, M. Katsioti, Drying kinetics for some fruits: predicting of porosity and color during dehydration , Drying Technology, 18 (7) (2000), pp. 47–60

Wang and Brennan, 1995., N. Wang, J.G. Brennan, A mathematical model of simulation heat and moisture transfer during drying of potato Journal of Food Engineering, 24 (1995), pp. 209–216

Zogzas etal., 1996., N.P. Zogzas, Z.B. Maroulis, D. Marinos-Kouris, Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs, Drying Technology, 14 (10) (1996), pp. 2225–2253

Вукојевић 1998., Вукојевић, Ж. Л.: Предпројекат соларне мобилне сушаре за лековито, зачинско и ароматично биље, дипломски рад, Београд.

Додатак

Додатак 1.

Спанаћ (спинациа олерацеа, Л) (РЕ), је једногодишња дводома биљка и то је врло проширена врста лиснатог поврћа из фамилије Chenopodiaceae.

Спанаћ је највероватније приведен култури у Персији, а први подаци о њему се налазе у арапским списима из IX века, мада у литератури има навода да се у Кини гаји од VII века.

Први подаци о гајењу спанаћа у Европи односе се на његову културу у околини Севиље у XII веку.

Свеж спанаћ има релативну влажност од 92 %, остало чине сирови протеини, биљне масти, шећер, сирова целулоза и минералне материје.

Међу поврћем, спанаћ има највише азотних материја.

За исхрану се користи лишће, у домаћинствима се од њега припремају различита јела, у прерађивачкој индустрији пире, готова јела, сок, замрзава се или суши.

Заблуде око гвожђа

Дуго је спанаћ сматран најбољим извором гвожђа, што потиче од др Е. Von Volfa, из 1870. године.

Његова «рачуница» је била непроверена до 1973. године, када је откривено да је стварна количина гвожђа у спанаћу тек десетина од оног што је тврдио - због погрешно написане децимале.

Ипак, спанаћ садржи релативно велику количину тог елемента.

Зашто је спанаћ здрав?

Спанаћ има високу хранљиву вредност, са великом количином лако пробављивих беланчевина. Сматра се да нитрати, којих у изобиљу има код лиснатог, зеленог поврћа свих врста, покрећу напајање у ћелијама које им даје енергију. Само један залогај спанаћа довољан је да се повећа

ефикасност митохондрија, малих тела пасуљастог облика која покрећу активност и раст ћелија.

Раније се сматрало да садржај гвожђа у спанаћу ову биљку чини супер - храном. Сада су научници открили да су заправо нитрати састојак овог поврћа који покреће енергију.

До скоро се сматрало да ова неорганска хемијска компонента нема праву хранљиву вредност. Иако шведски научници не тврде да ћете имати исте резултате као Попај када будете јели спанаћ, открили су да након узимања мале дозе неорганског нитрата током три дана, здрави људи троше мање кисеоника док возе собни бицикл.

Водећи истраживач, професор Eddie Weitzberg, са Instituta Karolinska u Stokholmu, тврди да се ради о количини нитрата која је једнака оној која се налази у две или три цвекле или тањиру спанаћа - зна се да исхрана богата воћем и поврћем може да помогне у превенцији кардиоваскуларних обољења и дијабетеса, али улога активних хранљивих састојака никад није била сасвим јасна. Ово показује да би неоргански нитрат могао да да одговор на та питања.

У ранијој студији, професор Weitzberg и његов колега професор Jon Lundberg показали су да уз помоћ бактерија нитрат у виду хране повећава ниво азот-моноксида у телу. Азот - моноксид је молекул који отвара крвне судове, снижава крвни притисак и побољшава циркулацију.

Ново истраживање, које је објавио часопис "Cell Metabolism", показује да нитрати чине митохондрије мање "пропустљивим", чиме повећавају њихову ефикасност.

Обиље витамина

Богат је извор фолне киселине, али и осталих витамина Б групе, који имају важну улогу у метаболизму угљених хидрата и раду нервног система.

Обилује витамином Ц, који јача имунитет и помаже ресорпцију гвожђа, као и бета-каротеном (провитамин А), који одржава здравом кожу и слузокожу.

Витамин К, значајан за здравље костију, у шољи свежег спанаћа се налази у готово двоструко већој количини од дневно препорученог уноса, а ако је скуван - шест пута већој!

Важни минерали

Највише има калијума, који поспешује излучивање воде из организма и тиме олакшава рад бубрега и срца.

Шоља куваног спанаћа садржи око 40 % препоручене дневне дозе магнезијума, који помаже у превенцији болести срца и крвних судова. Обилује и калцијумом, важним за раст здравих костију и зуба, али и гвожђем - у шољи куваног спанаћа има око 30 одсто препоручене дневне количине.

У мањим количинама су заступљени фосфор, манган, бакар, цинк и јод.

Изглед свежег спанаћа је приказан сл.1..



Сл.1. Изглед свежег спанаћа

Таве са осушеним спанаћем сушеним у покретној, универзалној, еколошкој, коморној, конвективној, индиректној, активној соларној сушари је приказана на сл.2.



Сл.2. Таве са осушеним спанаћем

Берба спанаћа почиње када биљке образују 5 - 6 крупних листова.

При баштенској производњи спанаћ се бере сукцесивно. Берба може бити двојака, да се биљке чупају са кореном или да се одсецају зелени листови а да се вегетативни врх са кореном оставља у земљишту.

При индустријској производњи за прераду спанаћ се бере механизовано.

За ближа тржишта спанаћ се бере ујутро, док има росе, а за даљи транспорт бере се кад је сув.

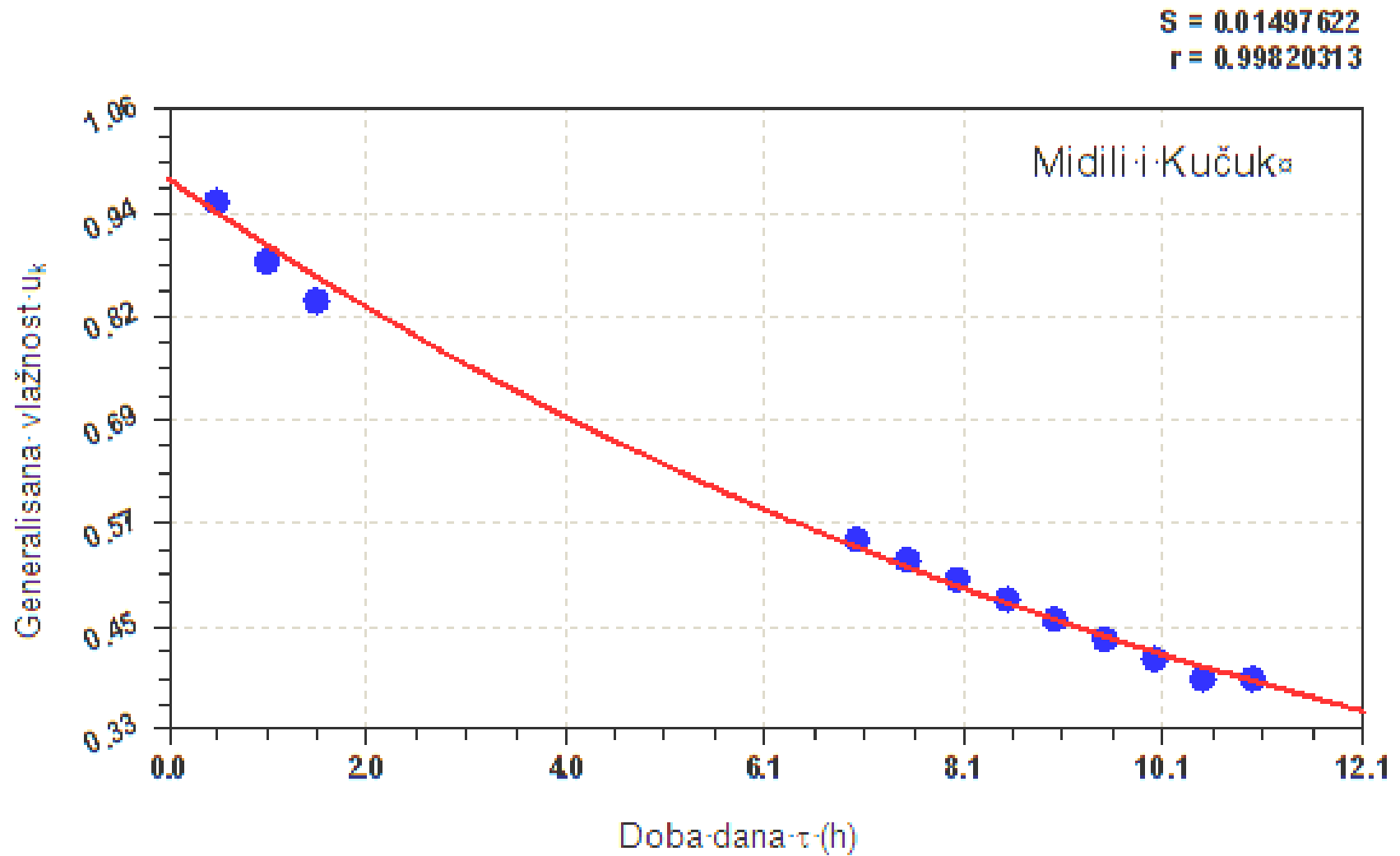
Спанаћ се лоше чува и треба избегавати чување убраног спанаћа, јер тада интензивно накупља штетне материје (нитрате и нитрите), нарочито у неповољним условима чувања.

При повољним условима чувања може се чувати 4 - 5 дана.

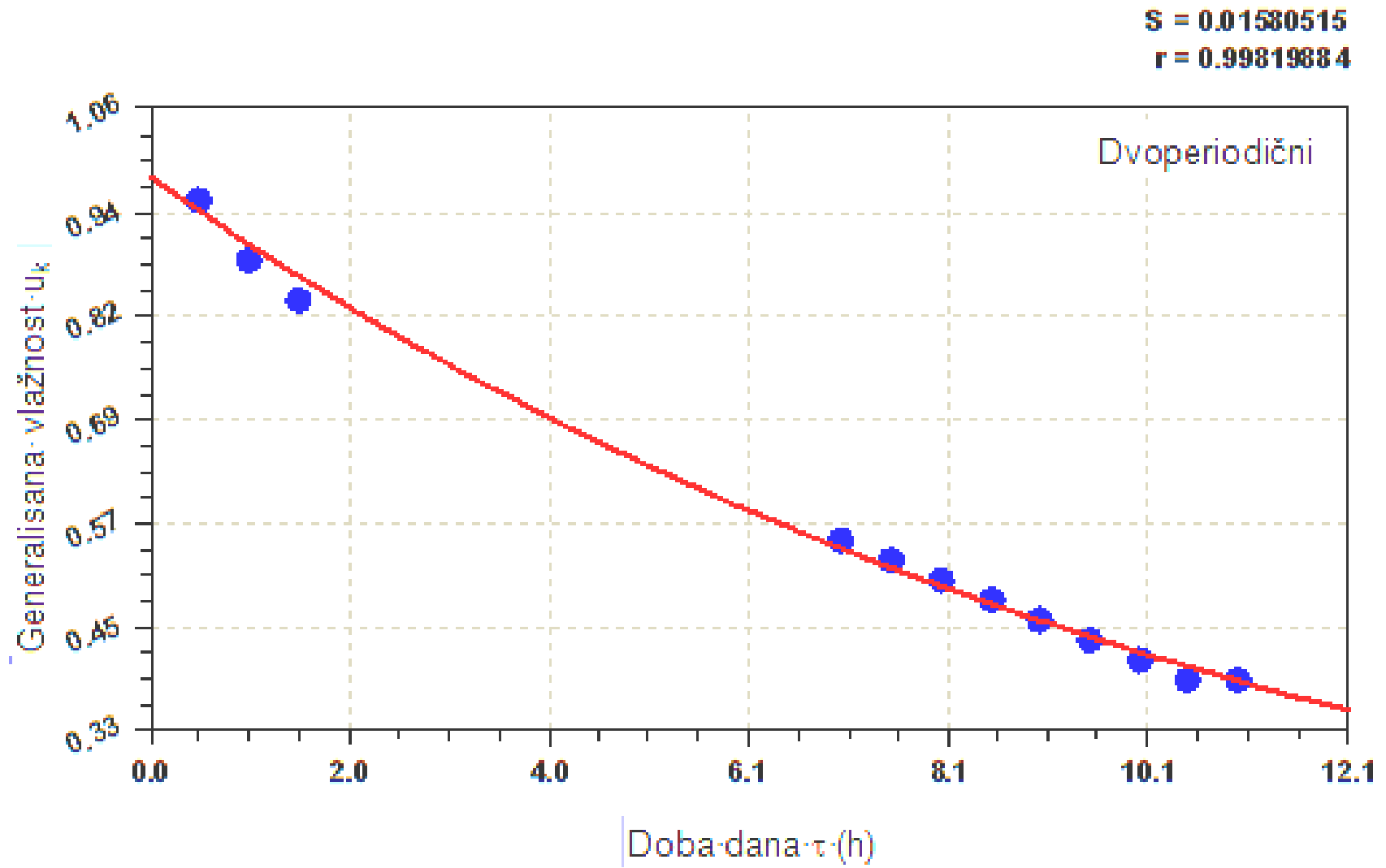
Принос спанаћа јако варира, у зависности од услова гајења и сорте, и креће се у просеку од 10 - 25 t/ha

Додатак 2.

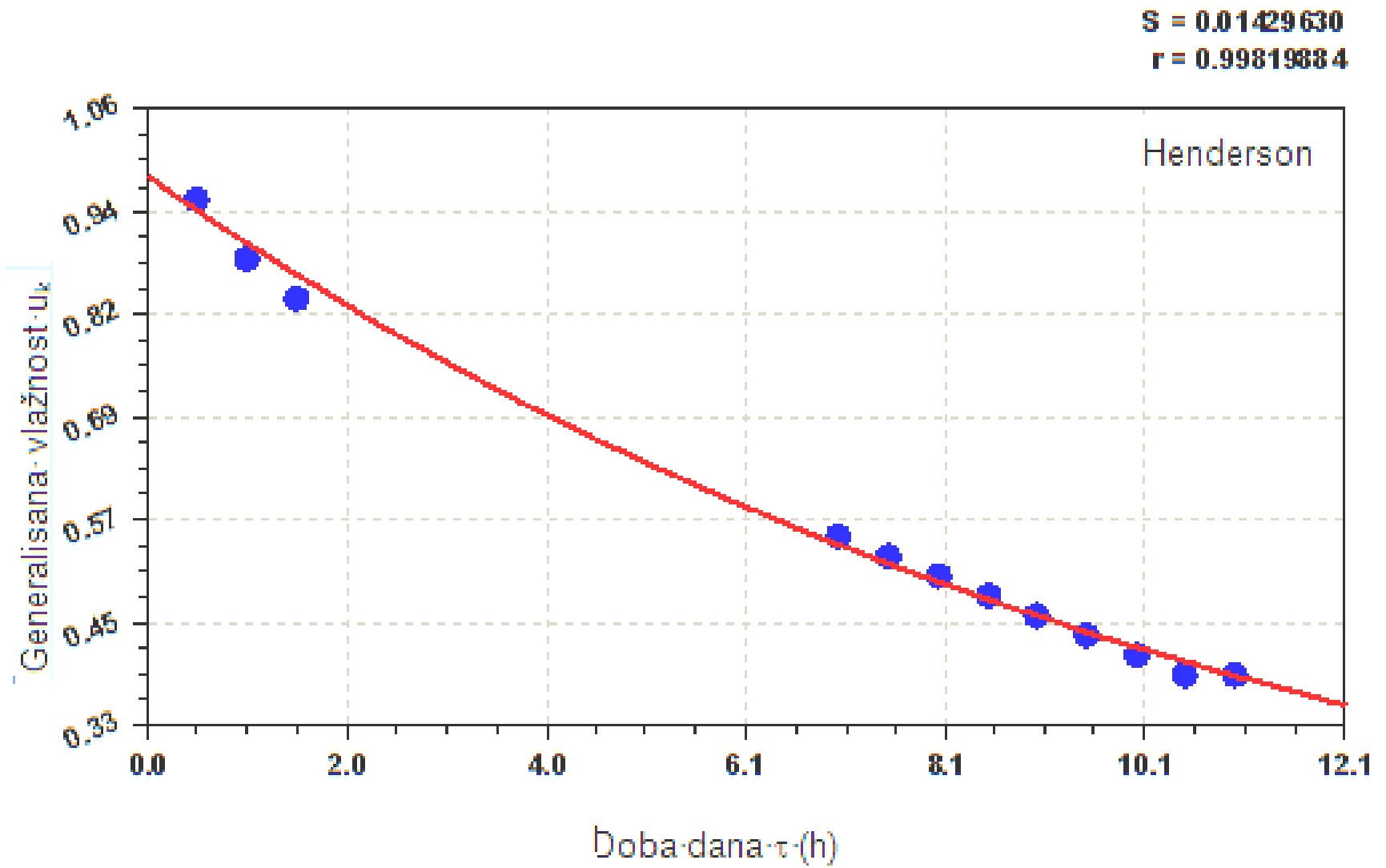
I тава



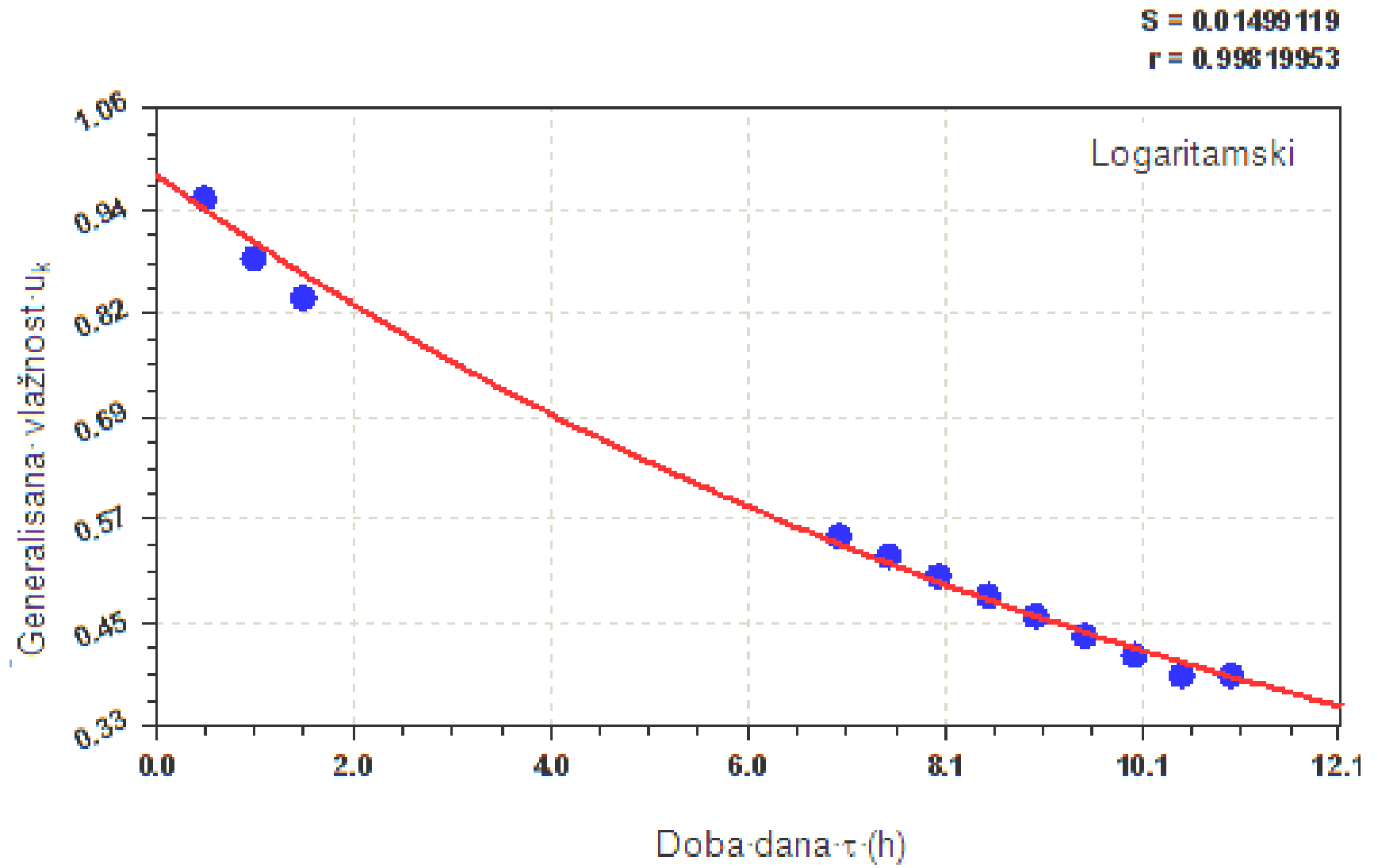
I тава



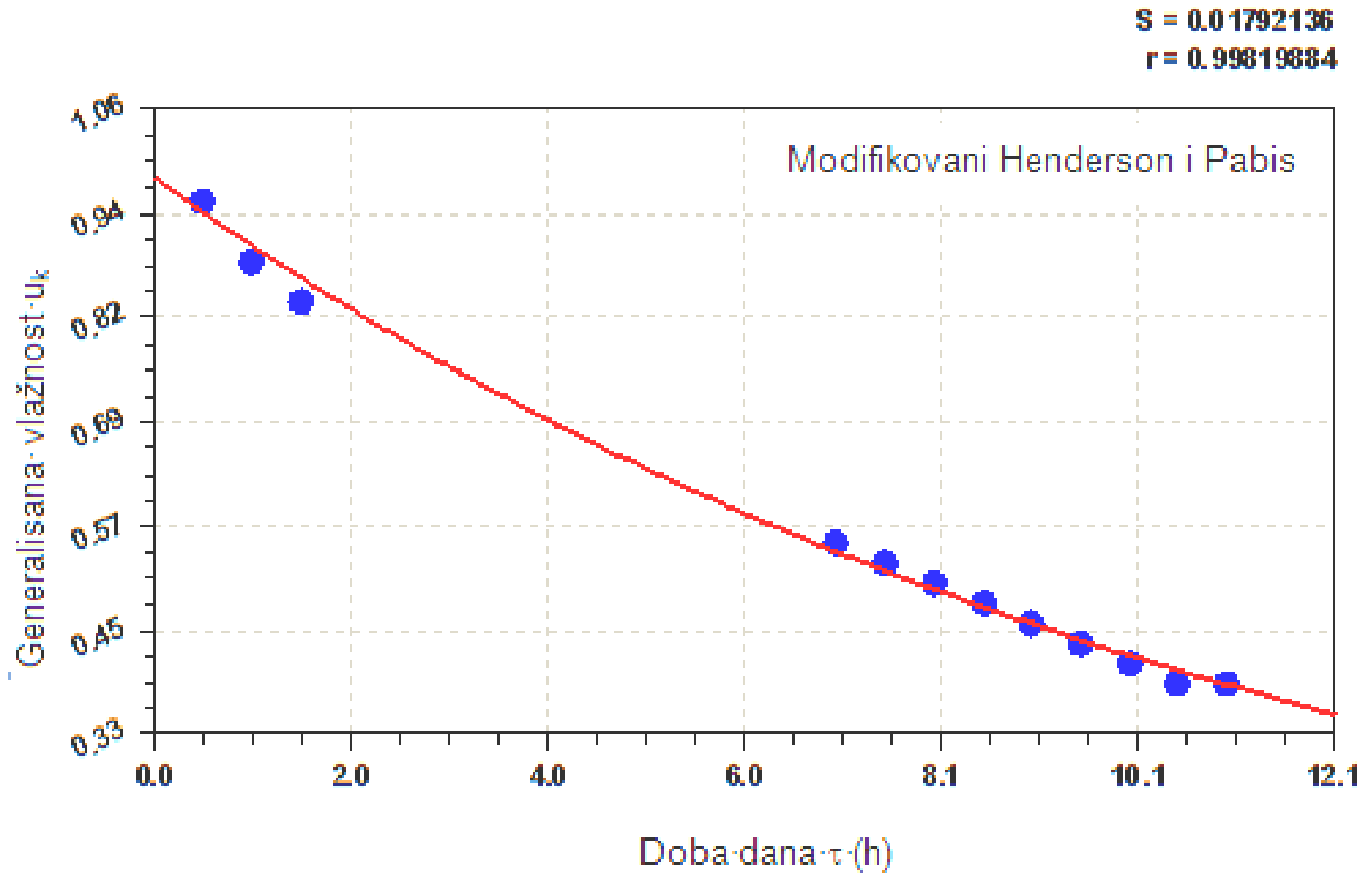
I тава



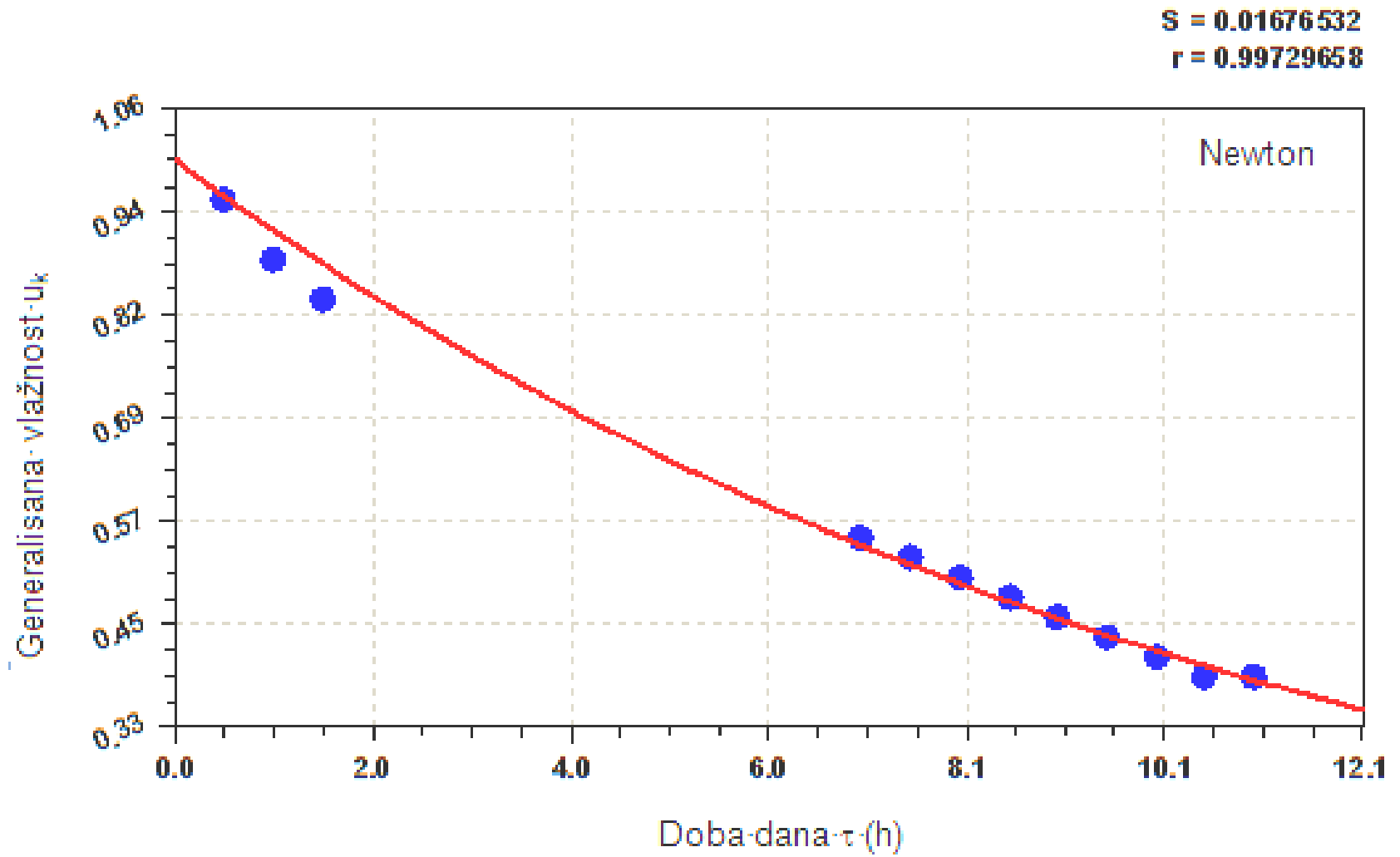
I глава



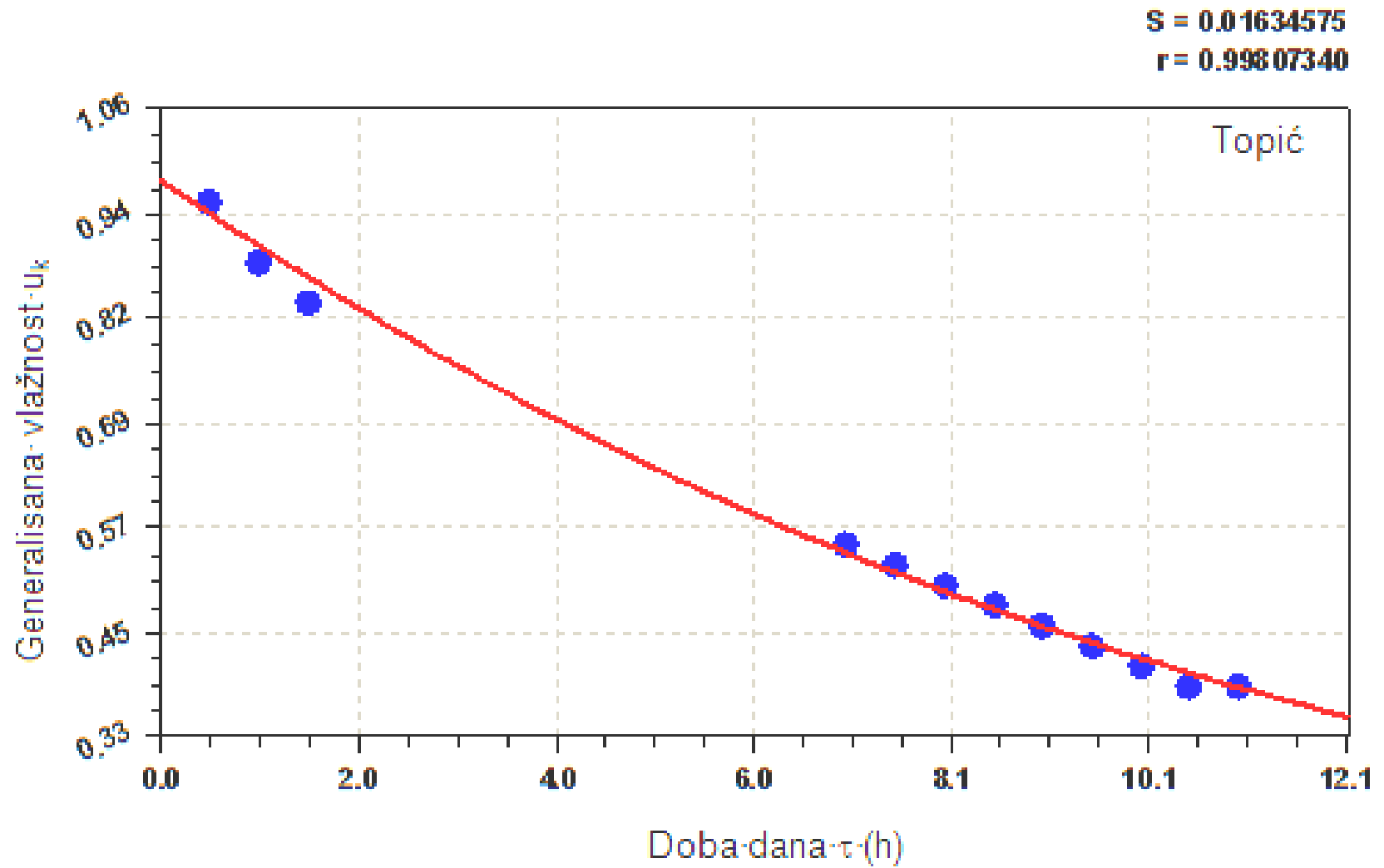
I тава



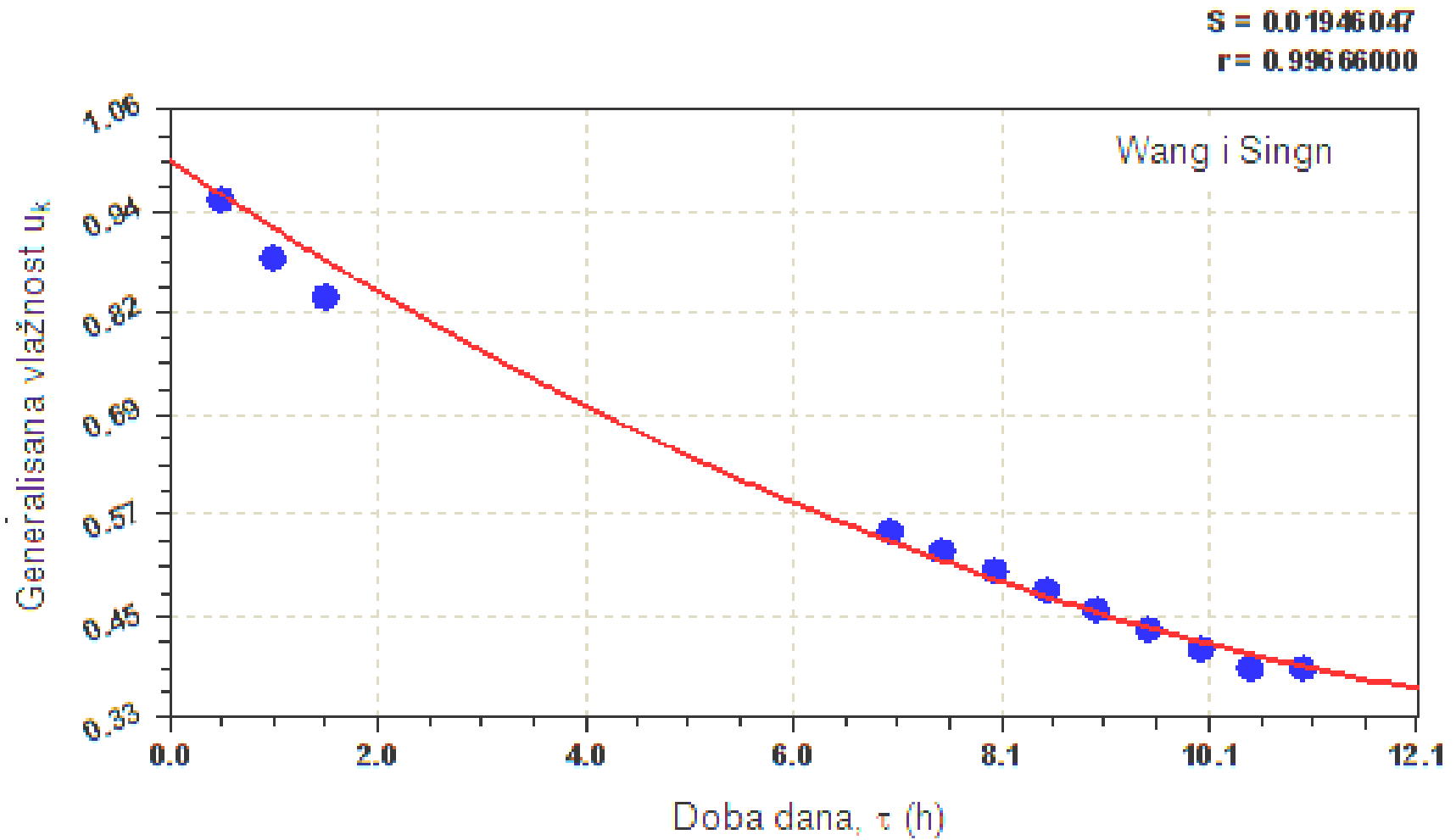
I тава



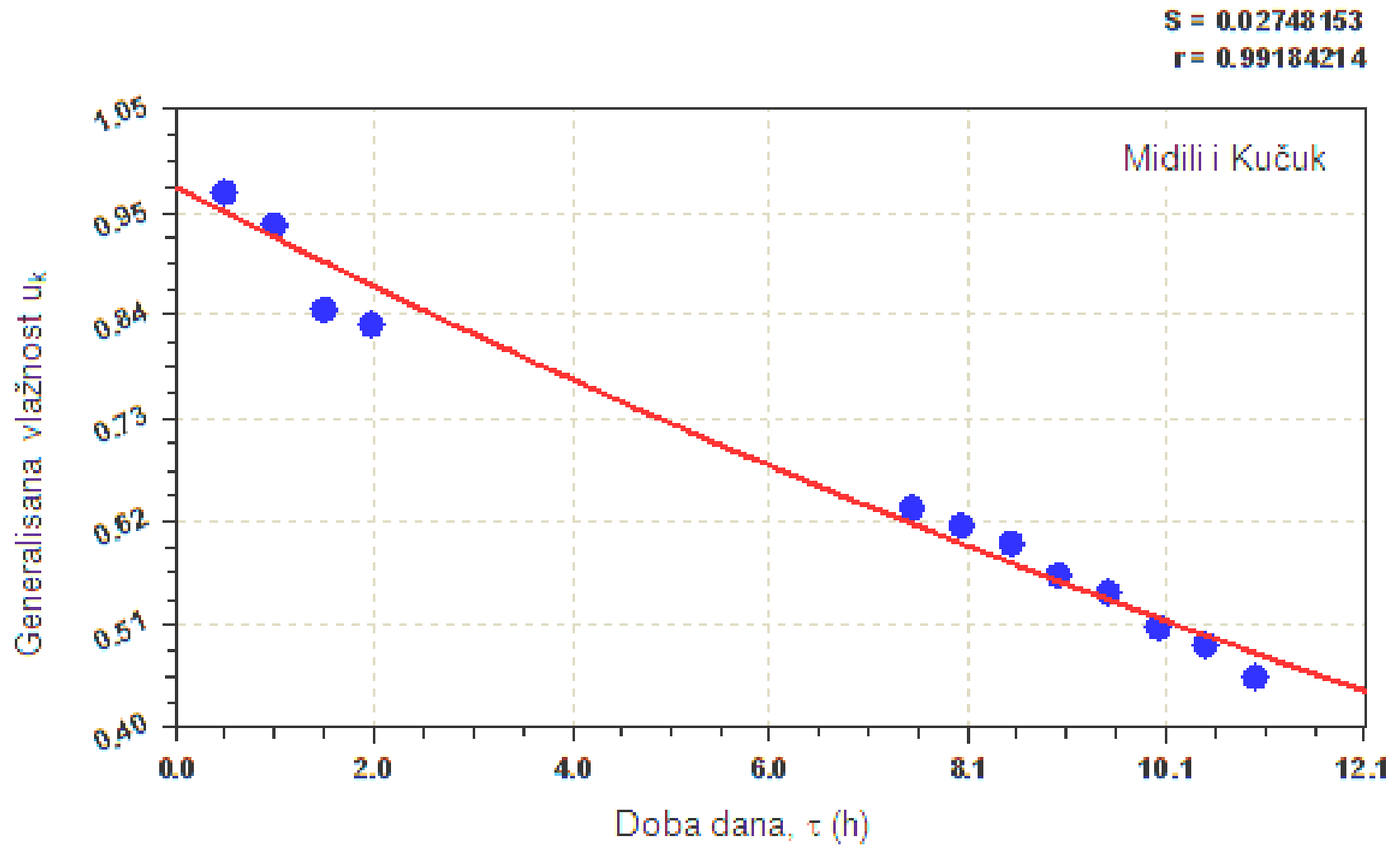
I тава



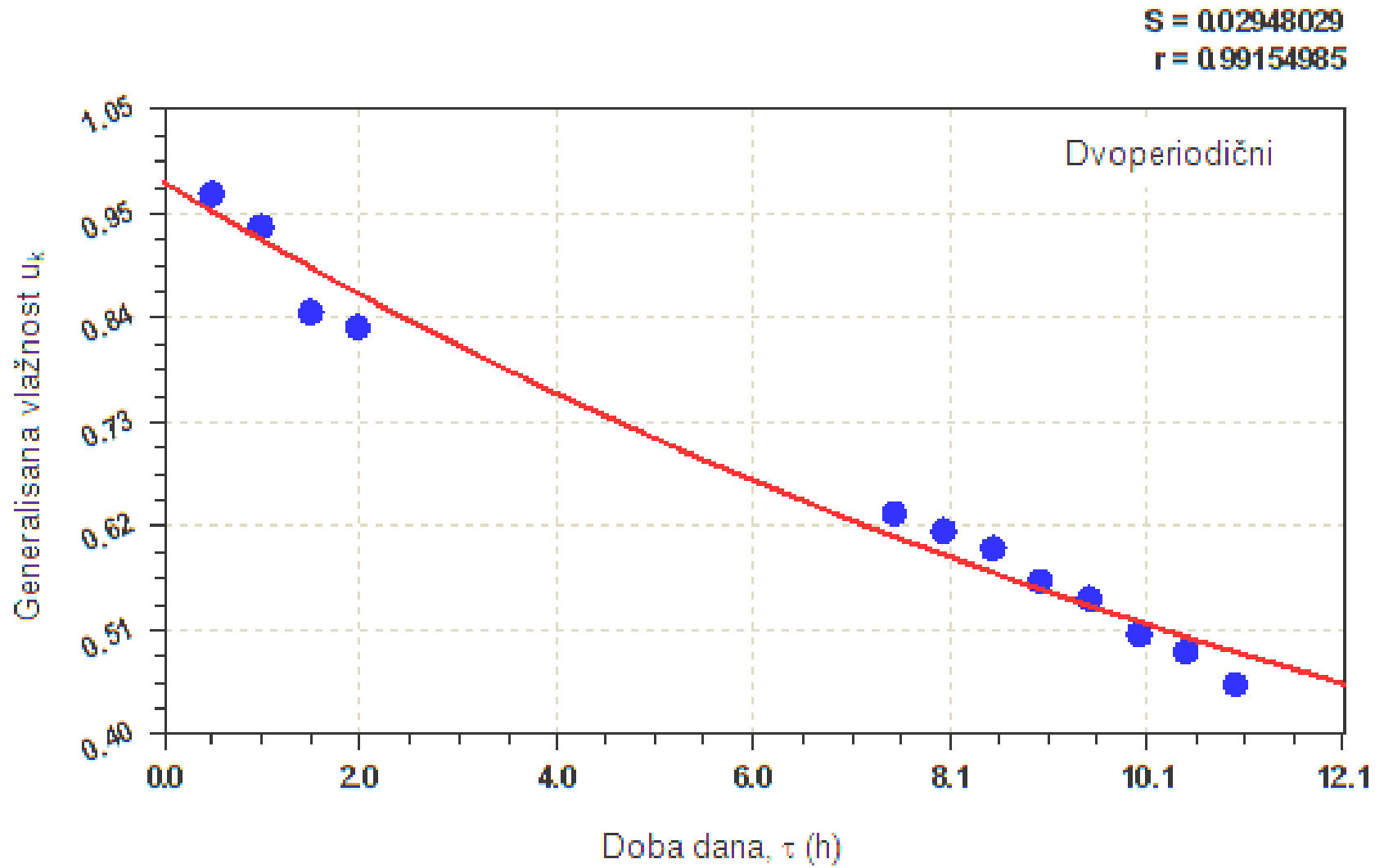
IV тава



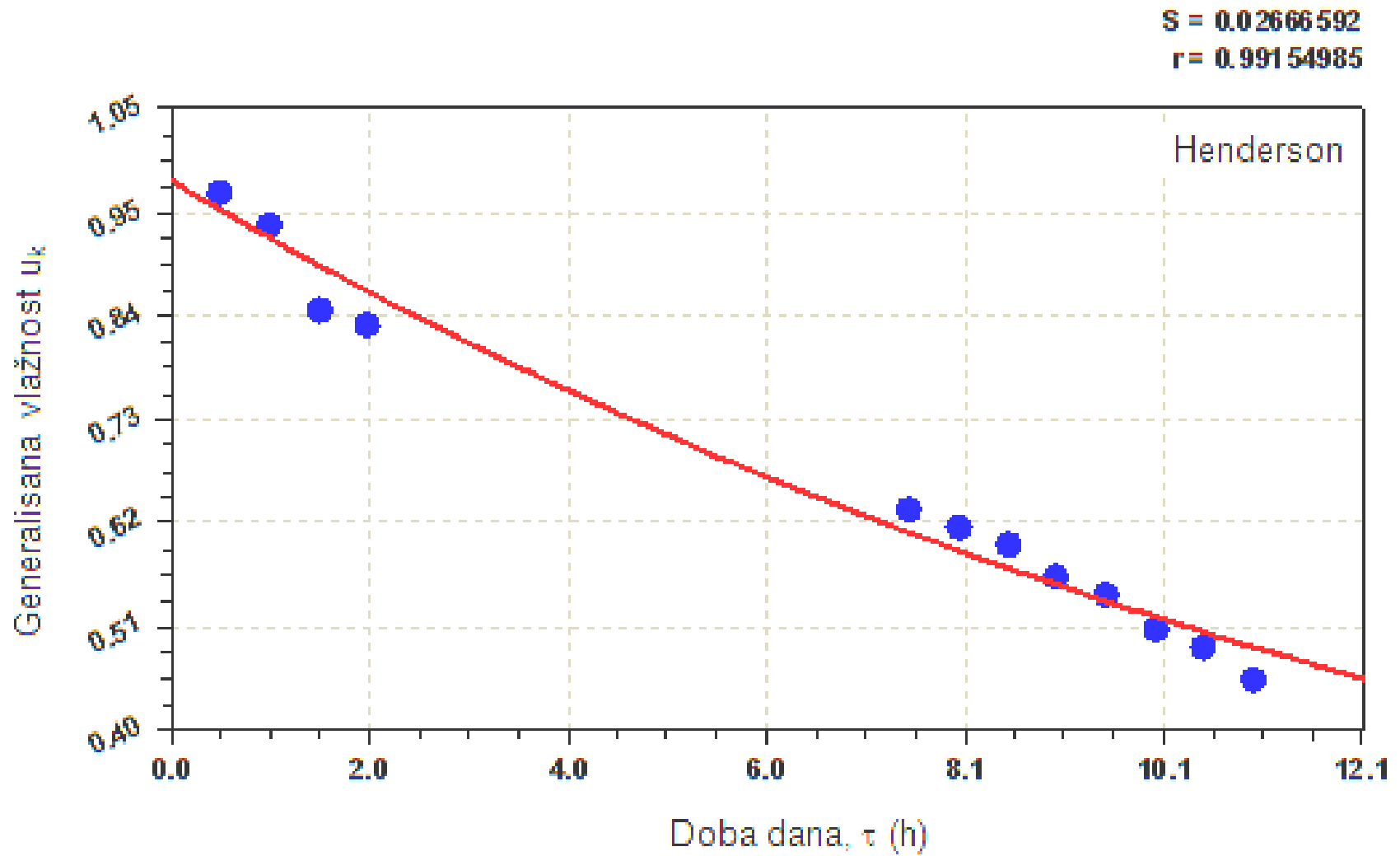
IV тава



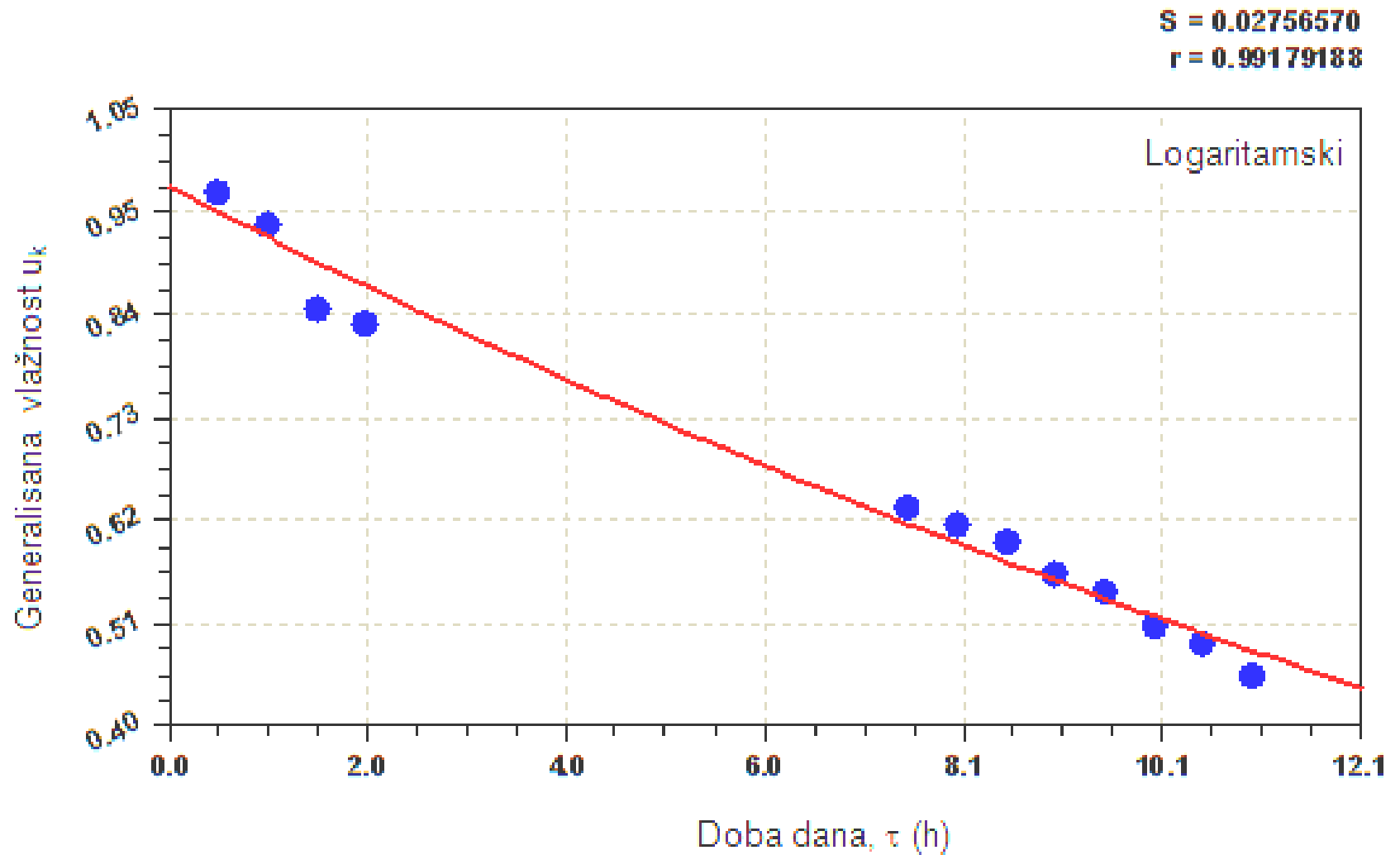
IV тава



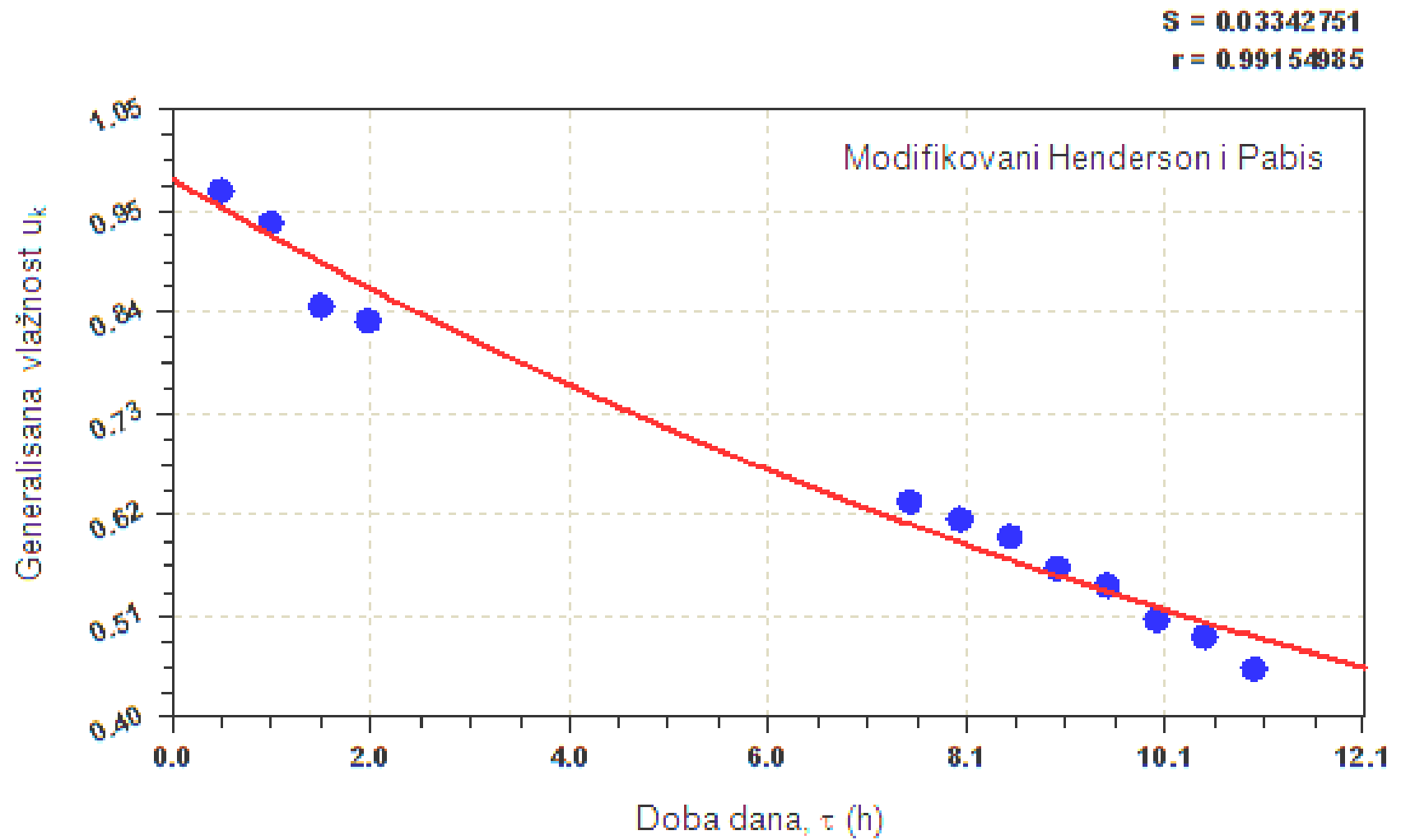
IV тава



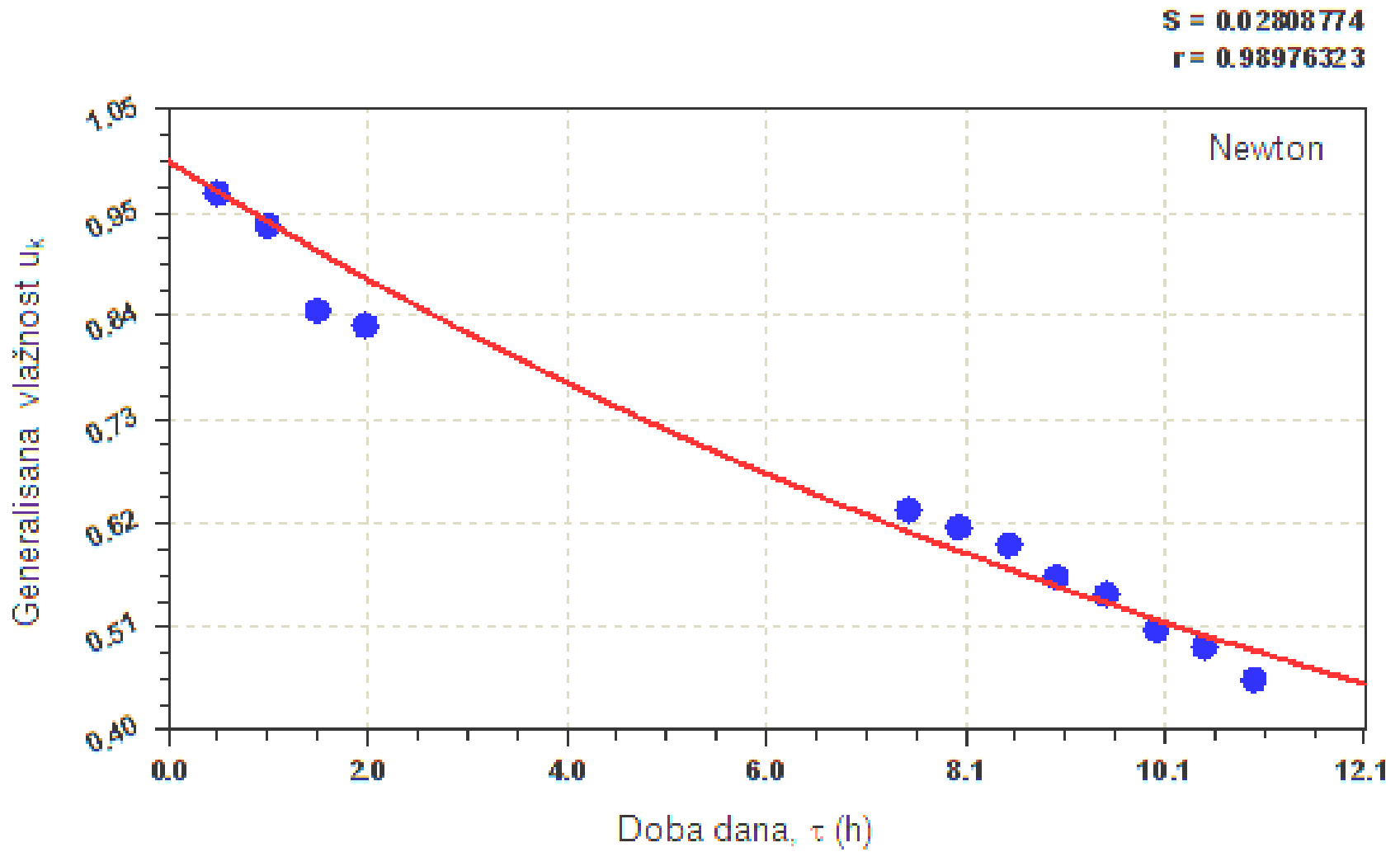
IV тава



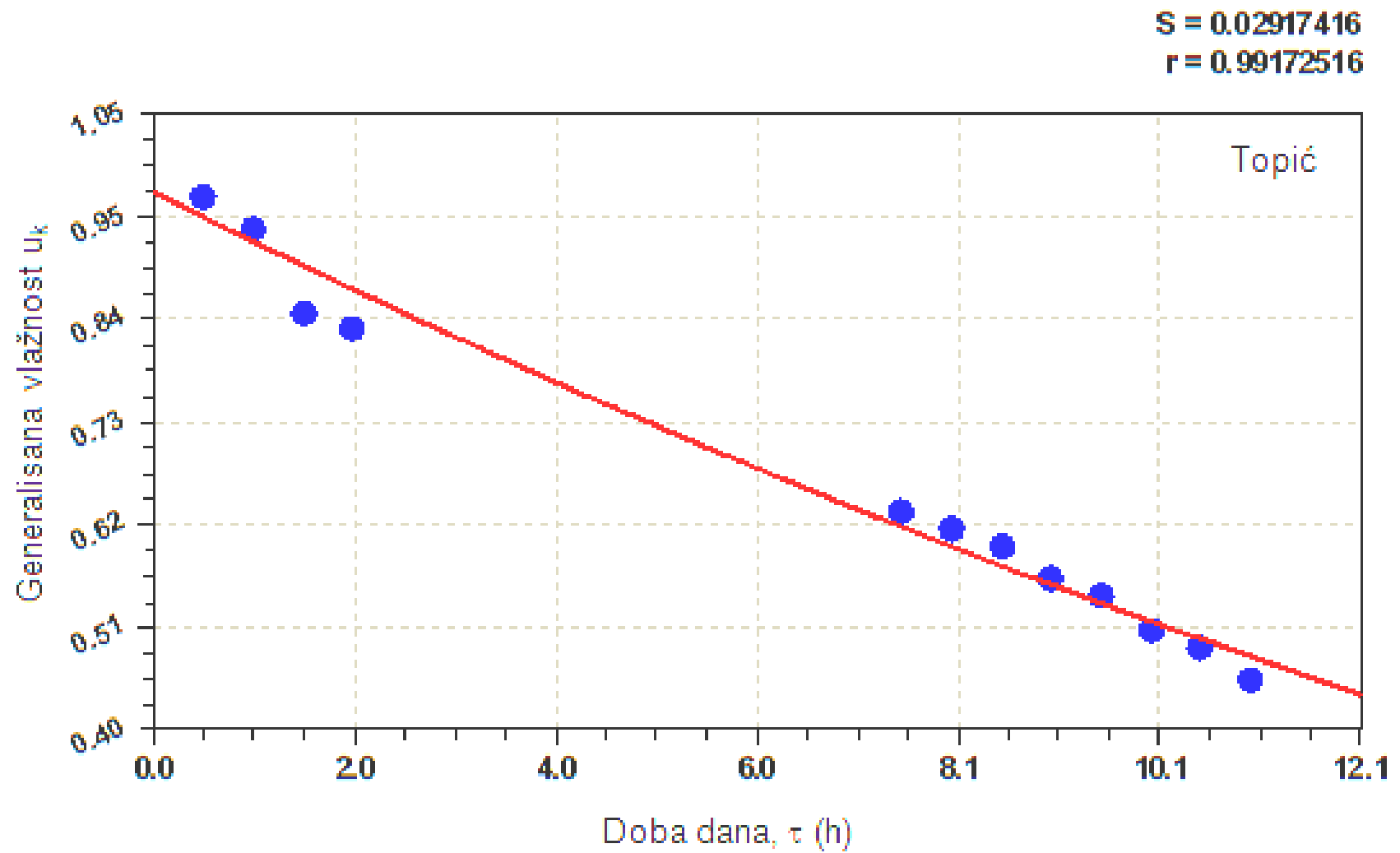
IV тава



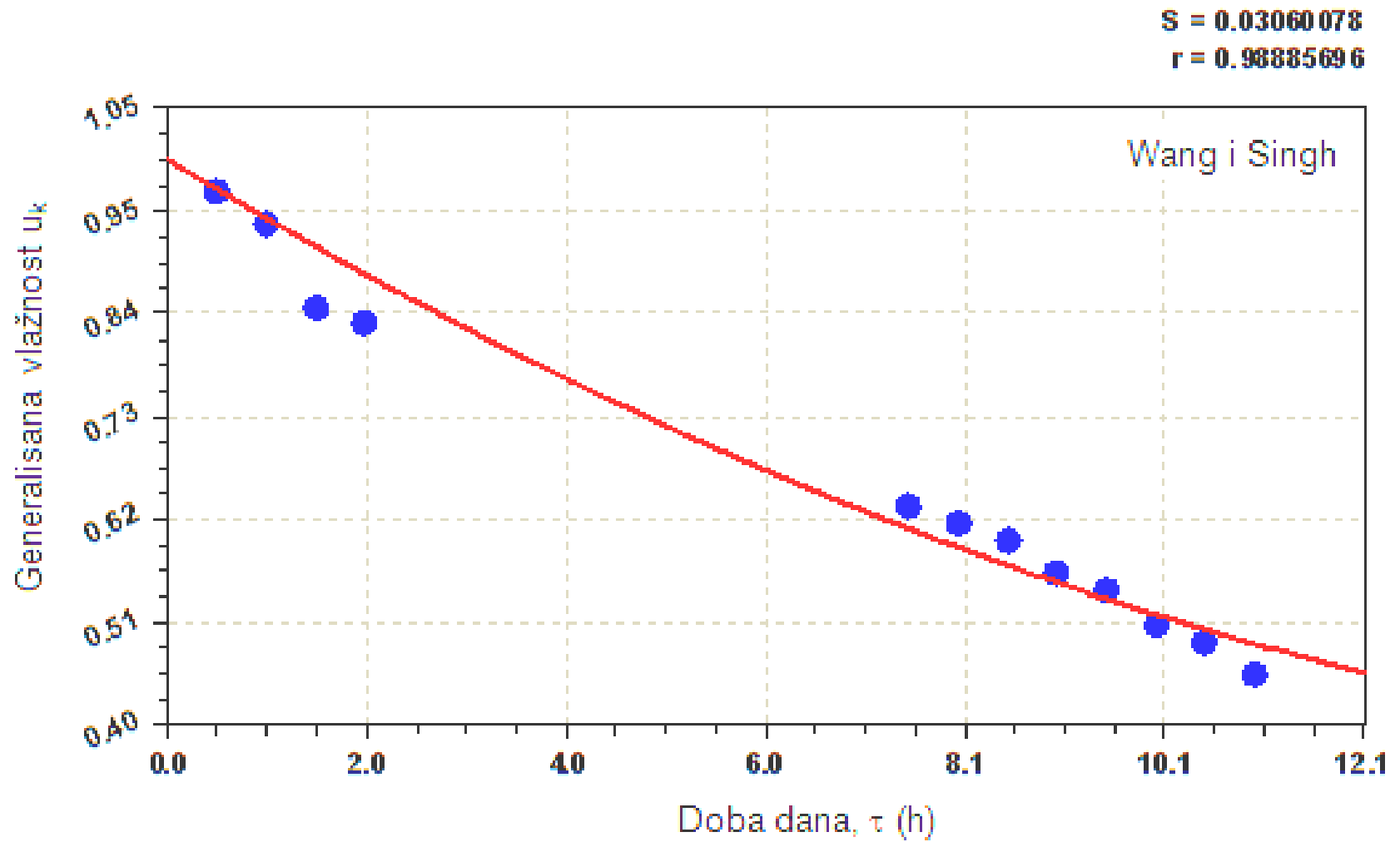
IV тава



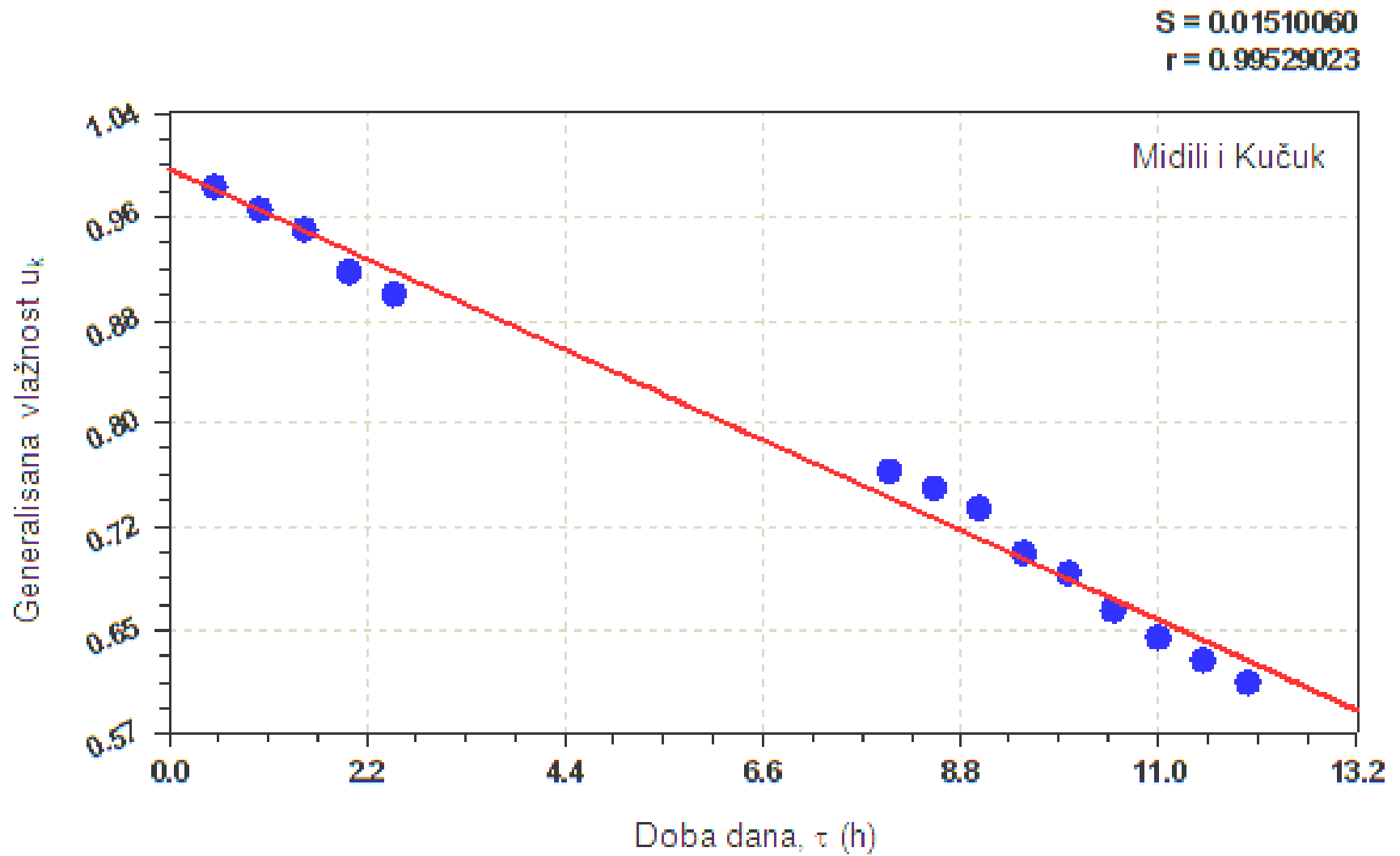
IV тава



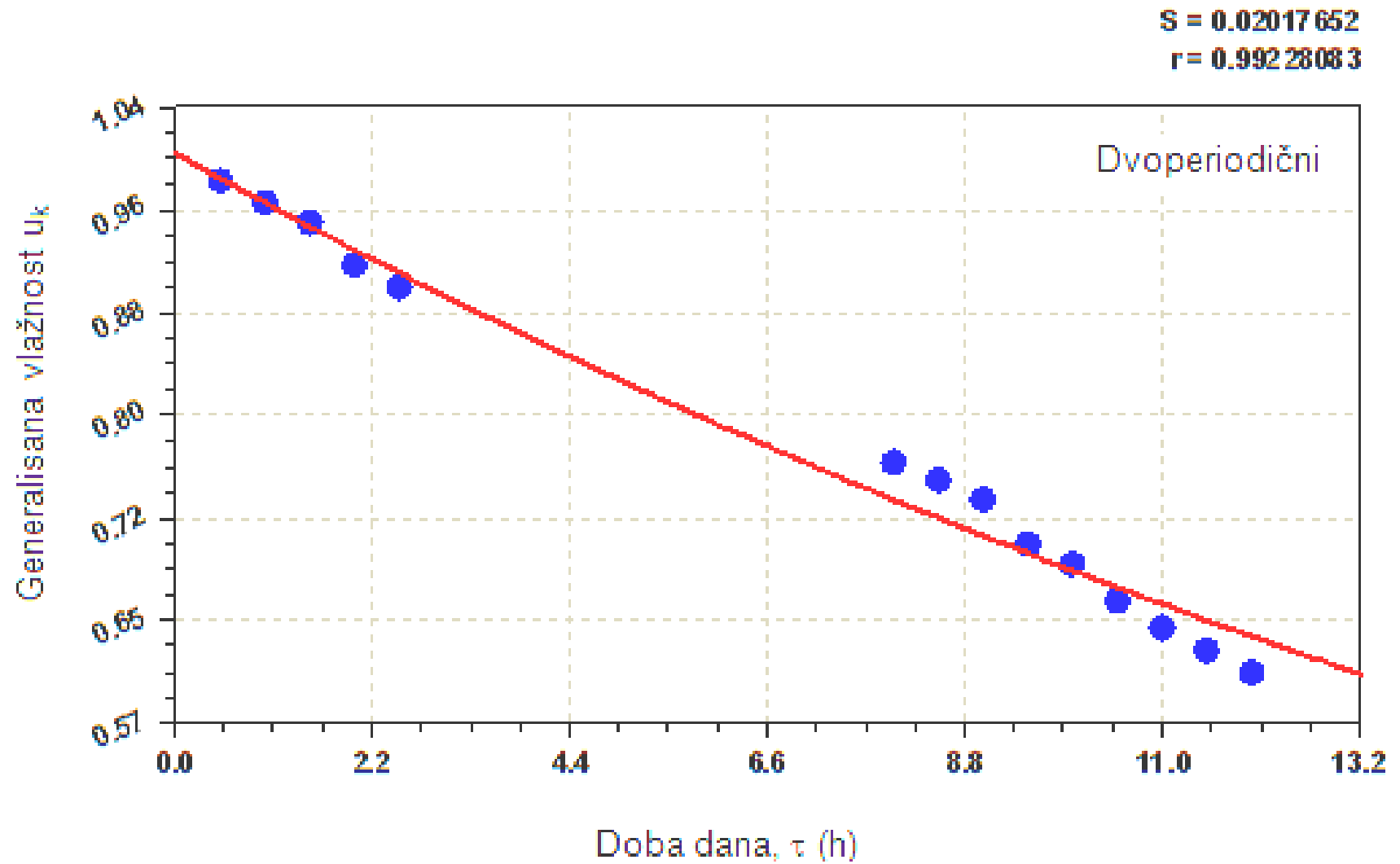
IV тава



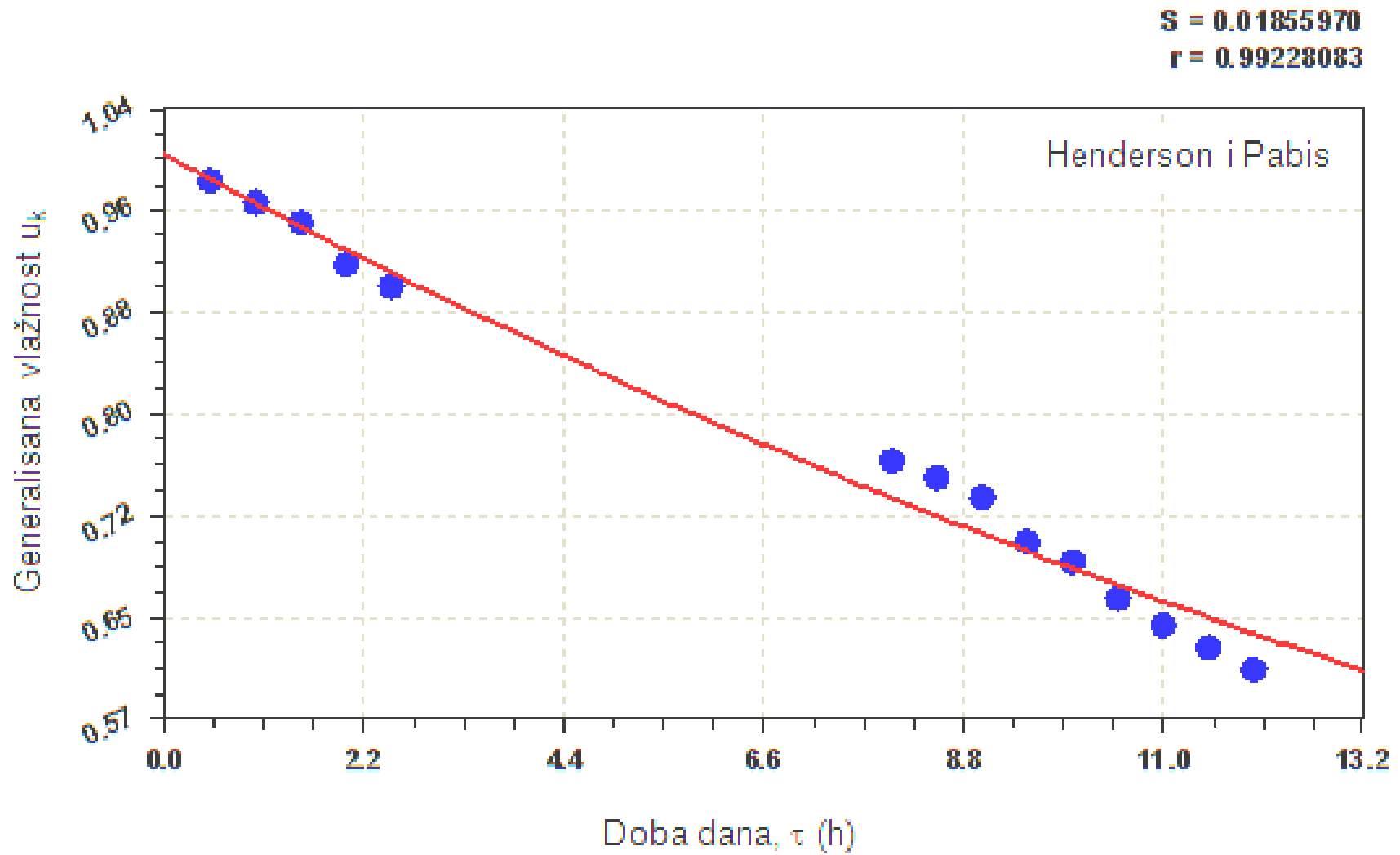
VII тава



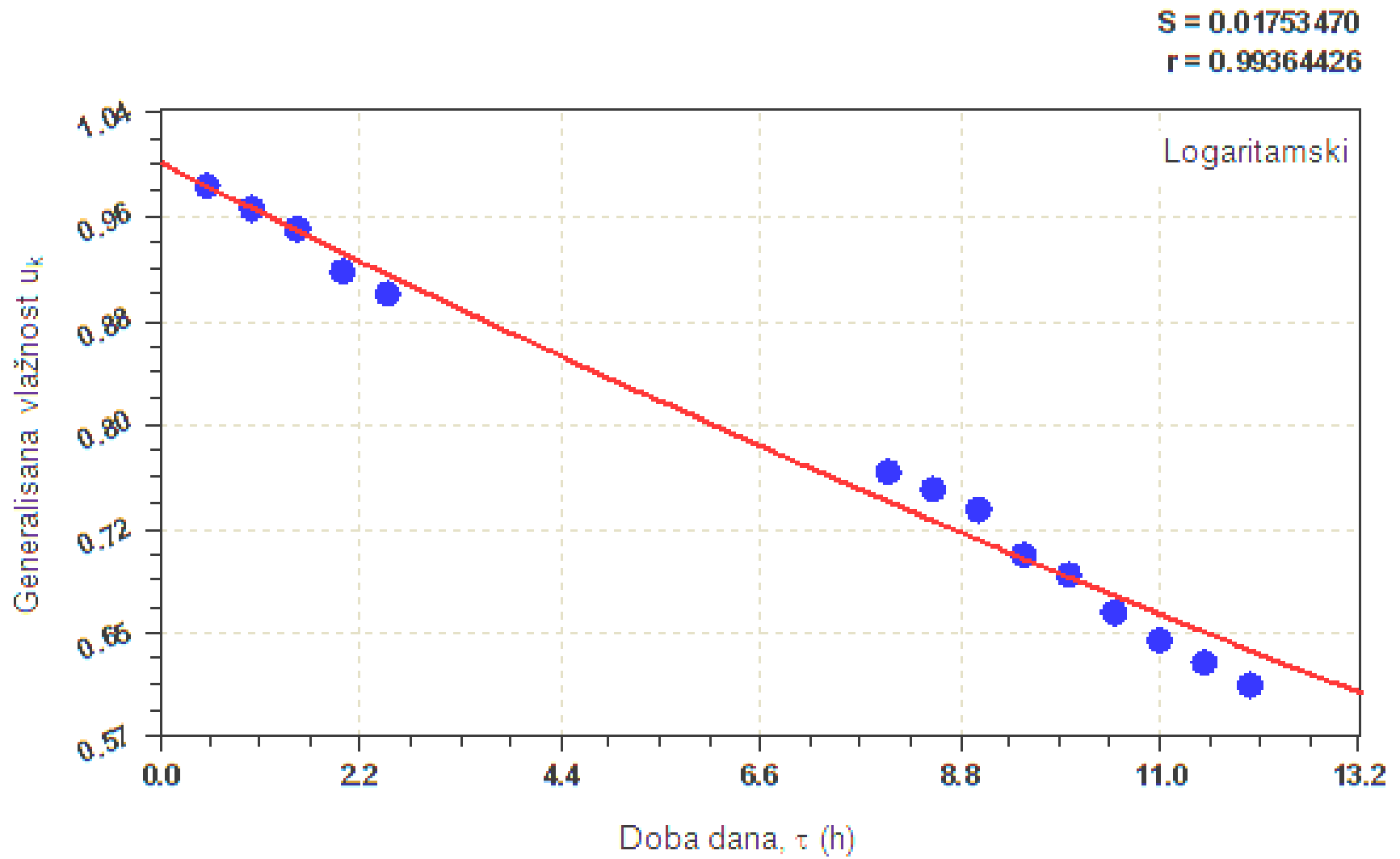
VII глава



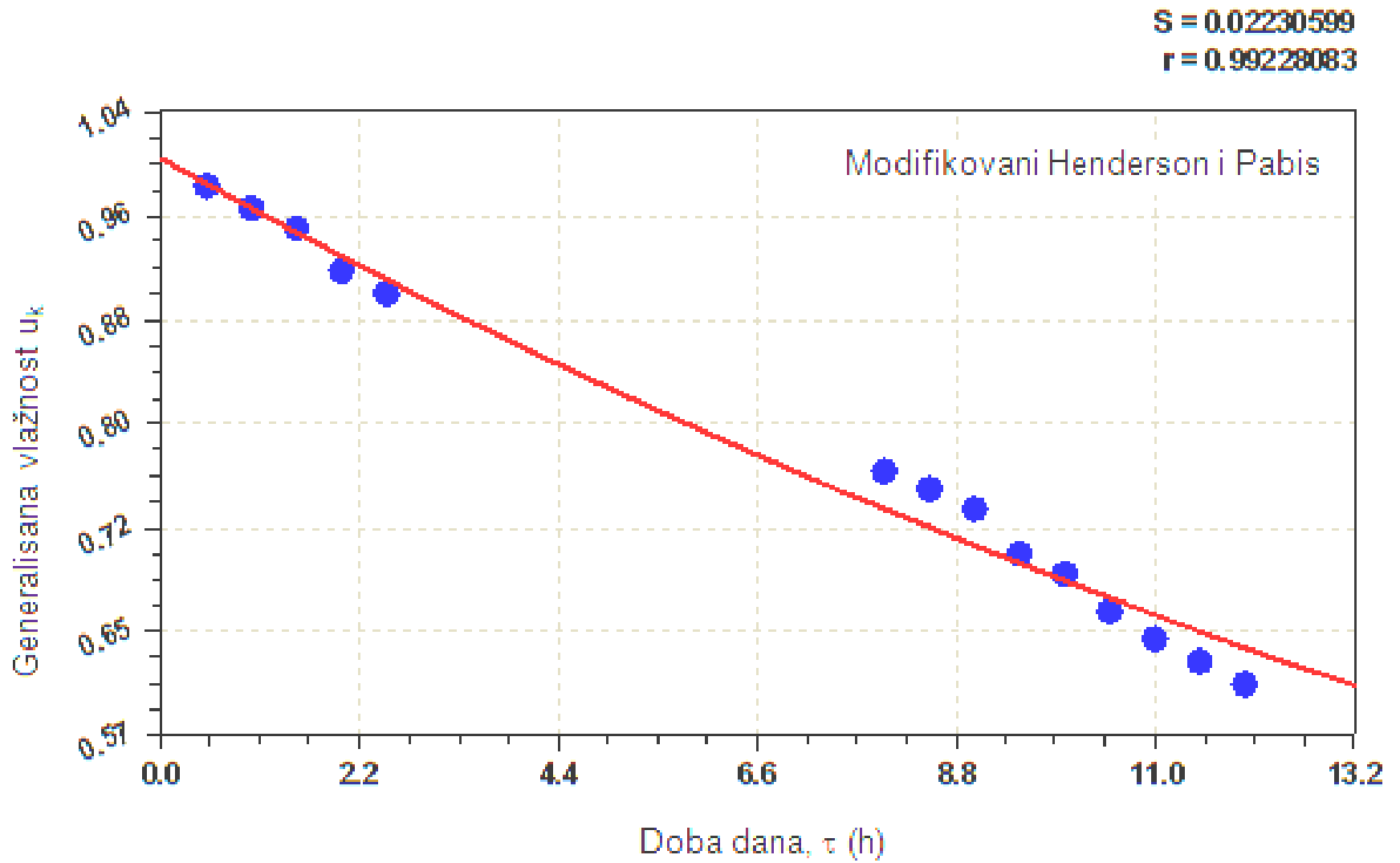
VII глава



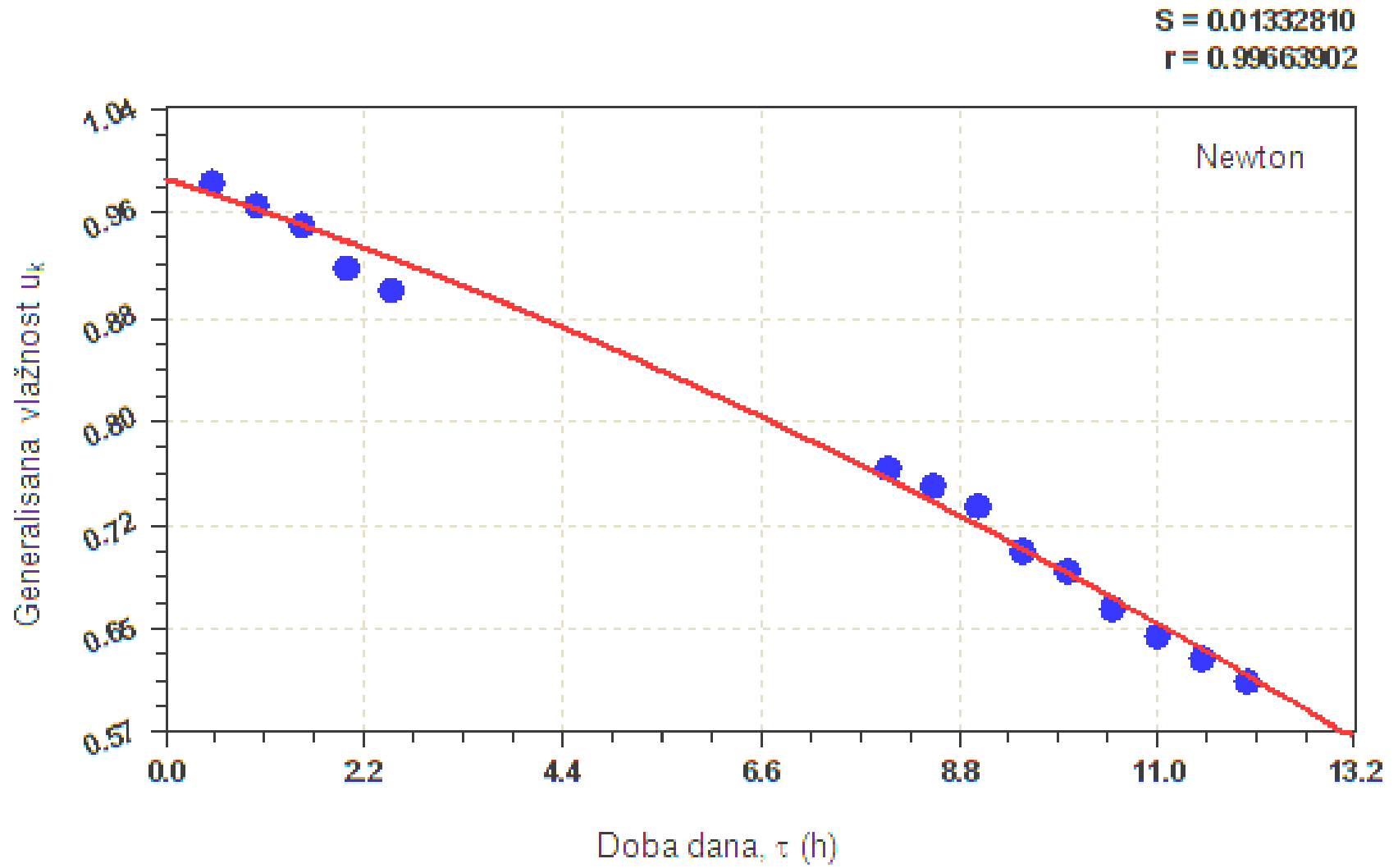
VII глава



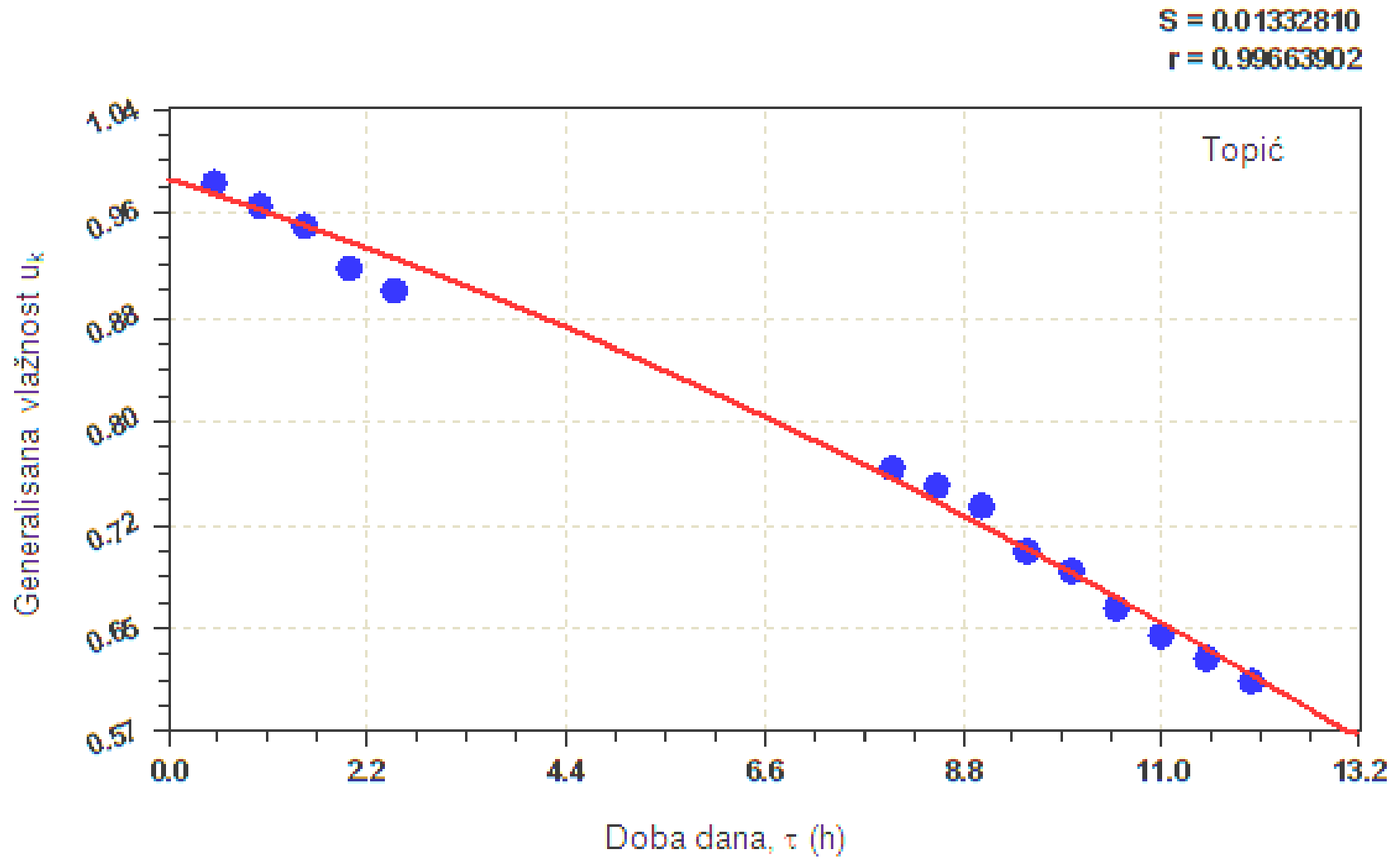
VI глава



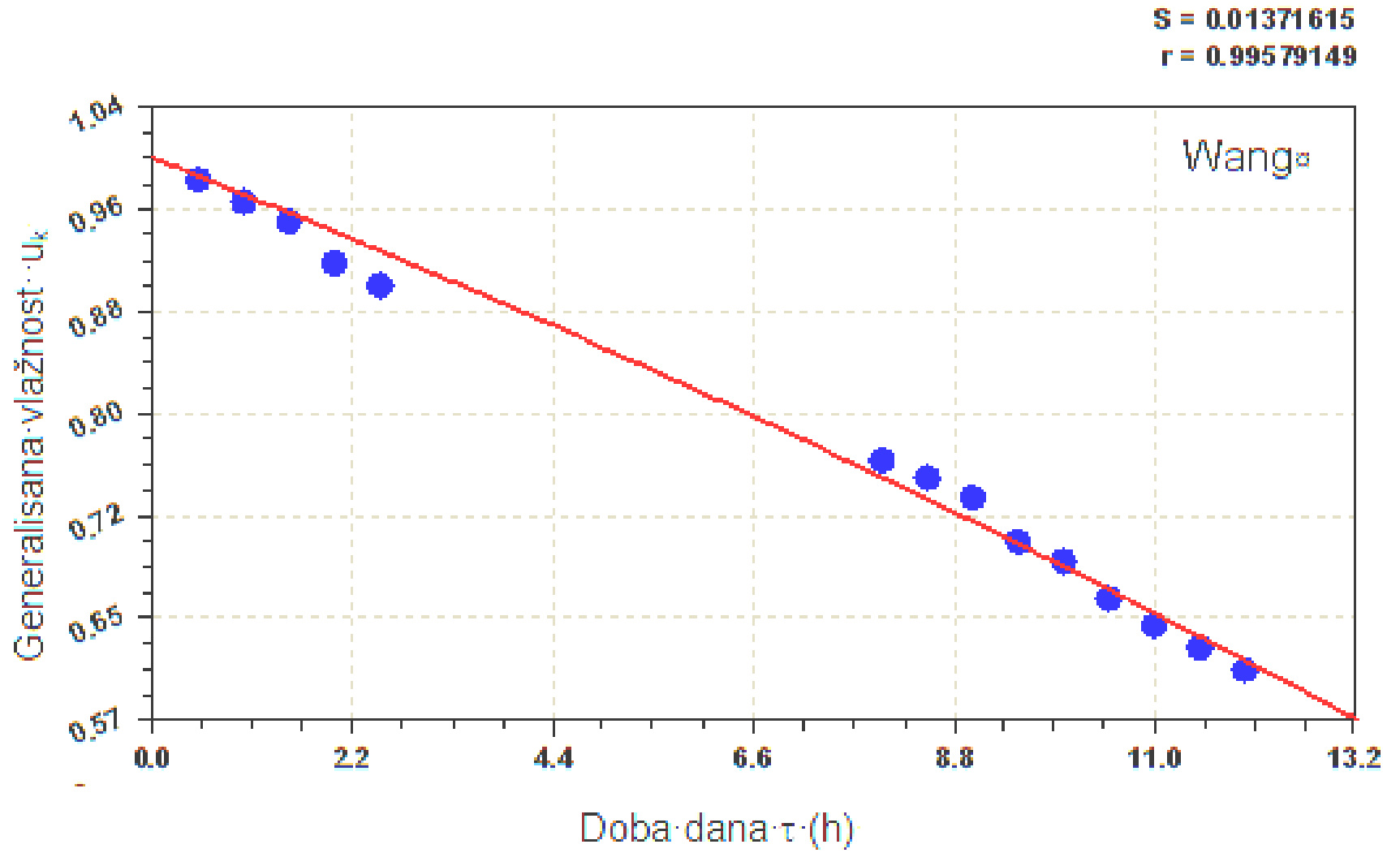
VII глава



VI глава



VII глава



Биографија

Едиб Дедеић је рођен 18.04.1975. године у Новом Пазару. Основну школу је завршио у Новом Пазару. Средњу техничку школу је такође завршио у Новом Пазару 1994. године.

Исте године се уписује на Машински факултет у Приштини, који завршава 2000. године.

Школске 2001./2002. године је уписао последипломске студије на Машинском факултету у Нишу.

Магистарски рад са темом “Истраживање процеса сушења глинених производа у тунелским и коморним сушарама са аспекта енергетске ефикасности постројења“ одбранио је 2006. године такође на Машинском факултету у Нишу.

По завршетку студија запослио се и радио као технички директор у предузећу ХК „Санџактранс“.

У ЈП „Завод за урбанизам, изградњу и уређење“, Општине Нови Пазар, радио је као генерални директор од 2004. године.

Од септембра 2005. године ради као државни секретар (заменик министра) у Министарству за капиталне инвестиције Владе Републике Србије.

У периоду од 2007 – 2008 године ради на месту државног секретара у Министарству за инфраструктуру а након тога у периоду од 2008 – 2011 године прелази у Министарство за национални инвестициони план.

Године 2011 прелази на место помоћника директора предузећа надлежног за изградњу аутопутева у републици Србији „Коридори Србије“ где се и данас налази.

У Београду 10.09.2012.

Едиб Дедеић

Изјава о ауторству

Потписани : Мр Едиб М. Дедеић, дипл- инж. маш.

број индекса _____

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

**Теоријско и експериментално истраживање процеса сушења биолошких
материјала коришћењем соларне енергије**

- 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, 10.09.2012



Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Мр Едиб М. Дедеић, дипл- инж. маш

Број индекса _____

Студијски програм _____

Наслов рада

**Теоријско и експериментално истраживање процеса сушења биолошких
материјала коришћењем соларне енергије**

Ментор Професор др Радивој М. Топић

Потписани/а Мр Едиб М. Дедеић, дипл- инж. маш

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, 10.09.2012



Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Теоријско и експериментално истраживање процеса сушења биолошких

материјала коришћењем соларне енергије

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).

У Београду, 10.09.2012.

Потпис докторанда

