

АНАЛИЗА АСФАЛТНИХ МЕШАВИНА НА ОСНОВУ ДВОДИМЕНЗИОНАЛНИХ СКЕНИРАНИХ СЛИКА

Даринка Матић, мастер.инж.грађ.
E-mail: darinka_m@yahoo.com

Проф. др Горан Младеновић, дипл.инж.грађ.
Грађевински факултет, Универзитет у Београду, emladen@imk.grf.bg.ac.rs

Прегледни рад

Резиме: Структура агрегатног скелета има великог утицаја на понашање асфалтних мешавина, пре свега у погледу њихове отпорности на трајну деформацију. Међутим, анализа гранулометријског састава минералне мешавине и запреминске структуре асфалтне мешавине не дају довољно података како би се описало понашање мешавине у фази експлоатације. У раду је коришћен програм iPas², развијен на Универзитету Wisconsin, у оквиру кога су дефинисани индекси који описују структуру минералног скелета, као што су: број контактних зона између зрна агрегата, укупна дужина и оријентација контактних зона. Ови индекси показују добру корелацију са отпорношћу асфалтне мешавине на трајну деформацију. Програм iPas² је примењен за анализу пет асфалтних мешавина које су се у последње време користиле у пројектима изградње или рехабилитације путева у Србији за носеће и хабајуће слојеве, са обичним и полимер модификованим битуменом. Добијени индикатори мироструктуре за све мешавине задовољавају. У раду су идентификовани и одређени проблеми у раду са најновијом верзијом програма iPas².

Кључне речи: асфалтна мешавина, трајна деформација, минерална мешавина, анализа скенираних слика, индекси унутрашње структуре

THE ANALYSIS OF ASPHALT MIXTURES BASED ON TWO-DIMENSIONAL SCANNED IMAGES

Darinka Matić, M.Sc.CE
E-mail: darinka_m@yahoo.com

Goran Mladenović, Ph.D, B.Sc.CE
Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, emladen@imk.grf.bg.ac.rs

Review paper

Abstract: The internal structure of the aggregate skeleton is very important for performance of asphalt mixtures, in particular regarding their resistance to permanent deformation. However, the analysis of gradation and volumetric properties of asphalt mixtures do not provide sufficient information to describe performance of asphalt mixtures in exploitation. In this paper the computer program iPas², developed at the University of Wisconsin has been used.

The program uses indexes that describe the structure of aggregate skeleton, like: number of contact zones between aggregate particles, total length and orientation of contact zones. These indices show very good correlation with resistance of asphalt mixture to permanent deformation. Program iPas² has been used for the analysis of five asphalt mixtures that have been used in recent road construction and rehabilitation projects in Serbia, for base and wearing course, with regular and modified bitumen. The internal structure indicators for all mixtures have satisfactory values. The paper also identifies some problems encountered during the use of the latest software version.

Key words: asphalt mixture, permanent deformation, mineral mixture, scanned image processing, Internal structure index

1. УВОД

Структура минералних и асфалтних мешавина значајно утиче на њихово понашање у фази експлоатације, посебно на њихову отпорност на трајну деформацију.

Постојећи поступци за пројектовање и анализу асфалтних мешавина се заснивају на избору каменог агрегата са одговарајућим карактеристикама (процент дробљених зрна, отпорност на дробљење), анализи гранулометријског састава минералне мешавине, и анализи запреминске структуре асфалтне мешавине како би се одредио оптимални садржај везива за усвојену енергију збијања.

Међутим, досадашња истраживања су показала да чак и асфалтне мешавине које имају исту запреминску масу и структуру показују другачије понашање у експлоатацији, што указује на потребу за развојем и применом додатних параметара – индекса који се односе на унутрашњу структуру асфалтне мешавине и који би били у стању да дефинишу утицај збијања, температуре, гранулометријског састава и примене модификованог битумена на понашање асфалтне мешавине у погледу осетљивости на трајну деформацију.

Асфалтне мешавине су по природи хетерогени материјали који се састоје из агрегата, битумена, и шупљина испуњених ваздухом. Zhu [1] је закључио да пренос оптерећења у асфалтној мешавини у највећој мери зависи од интеракције агрегата и битумена у тзв. контактним зонама између зрна агрегата. Промена геометријских или механичких карактеристика агрегата утиче на прерасподелу напона и дилатација у асфалтној мешавини. Zhu је такође показао да геометријске карактеристике контакта, као што су његова површина и оријентација утичу на расподелу напрезања у асфалтној мешавини.

Masad [2] је закључио да гранулометријски састав минералне мешавине утиче на унутрашњу структуру и расподелу напона у асфалтној мешавини.

У последњих двадесет година са успехом се примењује анализа дигиталних слика за одређивање интерне структуре асфалтних мешавина. Технике анализе дигиталних слика су унапређиване током овог периода од стране више истраживача [2, 3, 4, 5]. Могућности ових техника су такође унапређене и услед технолошког развоја и побољшања расположиве опреме.

Примена дводимензионалних слика представља рационалан приступ анализи асфалтних мешавина у односу на просторну, тродимензионалну анализу, и поред тога што укључује одређена поједностављења. Соепен и други [6] су развили софтвер iPas за дводимензионалну анализу, који се заснива на анализи интерне структуре асфалтних мешавина, али није у стању да у потпуности дефинише интеракцију зрна агрегата.

Roohi Sefidmzagi је унапредио овај софтвер [7] и у новој верзији програма под именом iPas² заокружио анализу интерне структуре асфалтних мешавина.

Циљ овог рада је био да се анализира могућност примене програма iPas² на типичне асфалтне мешавине које се користе у Србији и установи да ли се ова метода може користити као алтернативна метода за анализу запреминске структуре асфалтних мешавина и предвиђање њихове отпорности на трајну деформацију.

2. ОСНОВНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ПРОГРАМА iPas²

Основна намена програма iPas² је да врши дводимензионалну (2D) анализу слике и карактеризацију запреминске структуре асфалтне мешавине [7]. У оквиру развоја овог програма су:

- развијени и имплементирани протоколи за анализу агрегатне структуре асфалтне мешавине на основу 2D слика,
- дефинисани репрезентативни индекси унутрашње структуре асфалтне мешавине,
- успостављене корелације између ових индекса и механичких особина асфалтних мешавина под поновљеним оптерећењем и
- анализирани ефекти различитих метода за збијање лабораторијских узорака и узорака са терена.

Функције софтвера су подељене у две главне групе:

- функције за обраду слике, и
- функције за анализу микроструктуре асфалтне мешавине.

2.1. Обрада слике

Да би резултати анализе скениране слике асфалтног узорка што веродостојније представили асфалтну мешавину, програм захтева унос познатих карактеристика асфалтне мешавине добијених на основу лабораторијских испитивања, као што су:

- Гранулометријски састав минералне мешавине, и
- Запреминске карактеристике асфалтне мешавине:
- Процент шупљина испуњених ваздухом V_s (%);
- Садржај битумена P_b (% m/m);
- Запреминска маса агрегата G_{agr} (kg/m³);
- Запреминска маса битумена G_{bit} (kg/m³).

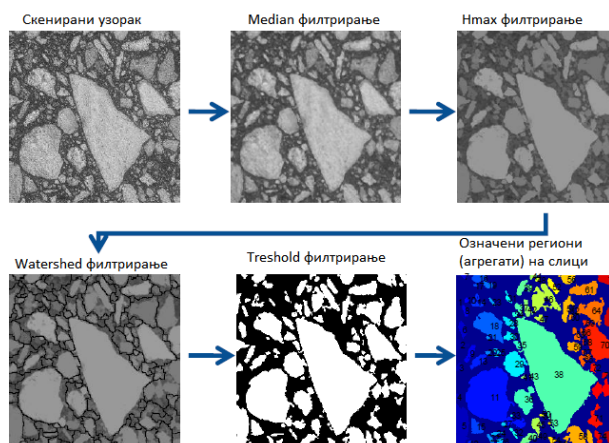
На основу ових података програм обавља прорачун запреминске структуре асфалтне мешавине, а затим врши обраду слике на основу параметара филтрације задатих од стране корисника.

Скенирана слика асфалтне мешавине се обрађује тако што се користи алгоритам дигиталног процесора за обраду слике, који конвертује слику у боји у бинарну слику.

Како би се побољшао квалитет скениране слике асфалтног узорка, а с циљем одвајања различитих фаза мешавине, програм користи технику филтрирања слике, која се састоји из неколико елемената:

- *Median* филтрирање
- *Regia Maxima (Hmax)* филтрирање.
- *Watershed* филтрирање
- *Threshold* филтрирање

Након извршеног филтрирања слика је подељена на регионе чије су границе јасно утврђене. Сваки регион представља једно зрно агрегата и добија свој идентификациони број. Пример обраде слике филтрирањем је приказан на слици 1.



Слика 1. Кораци филтрирања слике у програму iPas² [7]

Да би корисник могао да утврди да ли су изабране вредности филтрирања одговарајуће, неопходно је да се упореде:

- запреминско учешће агрегата у асфалтној мешавини са површином агрегата на 2D слици, и
- гранулометријски састав минералне мешавине у односу на гранулометријски састав добијен обрадом 2D слике.

Процес избора вредности параметара филтрације је потребно поновити док се не добију мала одступања између поменутих параметара у односу на њихове вредности одређене лабораторисјким испитивањем. Тек када се добије задовољавајући однос, прелази се на анализу микроструктуре асфалтног узорка.

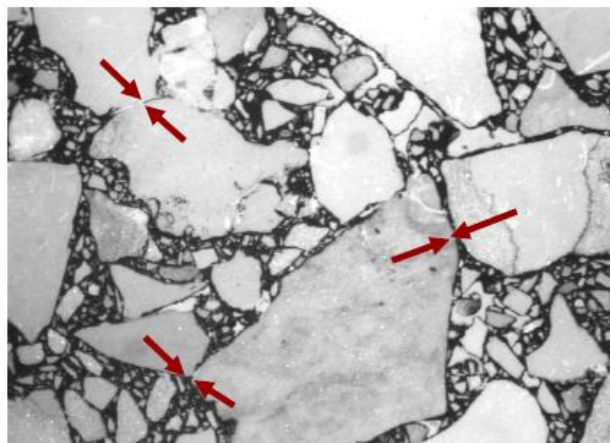
2.2. Анализе микроструктуре на основу 2D слике

Основни циљ функција које се баве анализом микроструктуре асфалтне мешавине је да се утврде:

- карактеристике контактних зона између зрна агрегата;
- оријентација зрна агрегата, и
- сегрегација минералне мешавине.

При томе треба имати у виду да се анализа просторне структуре врши на основу дводимензионалних слика, тако да ће непосредни контакт два зрна агрегата на 2D слици бити ретко приказан, изузев када је узорак исечен непосредно у зони контакта (слика 2).

Због тога је приликом анализе неопходно увести одређена поједностављења која би омогућила анализу запреминске структуре мешавине на основу 2D слике.



Слика 2. Контактне зоне између зрна агрегата [8]

Конкретно, приликом развоја програма iPas² анализирана је запреминска структура мешавине на основу вишеструких пресека узорка и развијен је алгоритам који користи два основна параметра за анализу контактних зона између зрна агрегата:

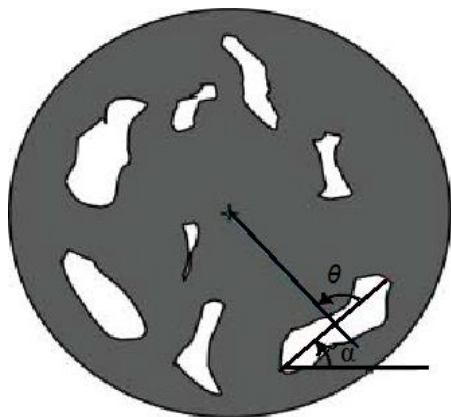
- минималну величину зрна агрегата која се узима у обзир приликом прорачуна контактних тачака, и
- вредност дистанце SDT (*Surface Distance Threshold* - SDT).

Уколико је растојање између два зрна агрегата на 2D слици мање од SDT, сматра се да се два зрна налазе у контакту. При томе програм узима у обзир све пикселе два зрна агрегата у оквиру ове дистанце. Сваком пикселу првог зрна агрегата одговара само један пиксел другог зрна. Ако постоји неколико пиксела који испуњавају услов да је њихово растојање мање од SDT, бира се најближи пиксел. Средишњи пиксел сваког пара пиксела се сматра контактним пикселем који формира контактну линију између два зрна агрегата (слика 3). На основу ове анализе добија се број и дужина контактних зона између зрна агрегата већих од минималне величине зрна која се користи у анализи.



Слика 3. Линија контакта између два зрна агрегата [7]

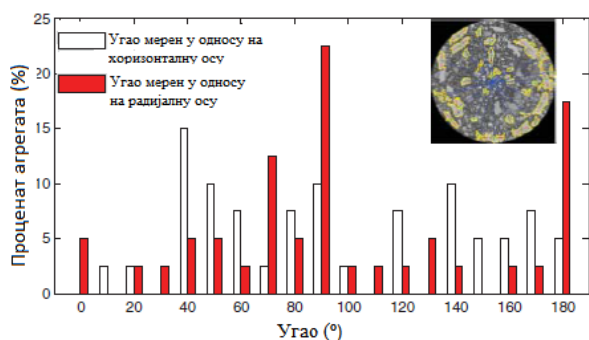
Оријентација зрна агрегата (слика 4) дефинише се у односу на хоризонталну осу (хоризонтална оријентација) и у односу на осу која спаја тежиште зрна агрегата и центар кружне површине (радијална оријентација).



Слика 4. Оријентација зрна агрегата [6]

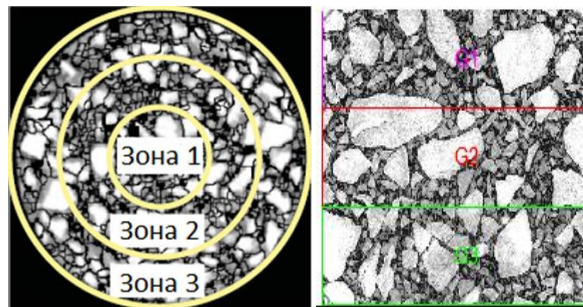
Хоризонтална оријентација се дефинише преко угла α између главне осе зрна агрегата и хоризонталне осе, а радијална оријентација се дефинише преко угла θ који захвата главна оса зрна агрегата са правцем између тежишта зрна агрегата и центра кружне површине.

На слици 5 је приказан пример хистограма расподеле хоризонталне и радијалне оријентације зрна агрегата за једну испитивану асфалтну мешавину.



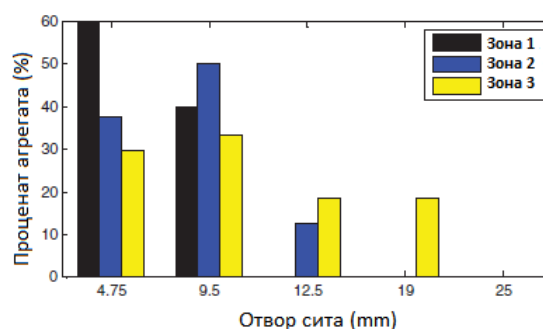
Слика 5. Пример хистограма радијалних и хоризонталних углова [6]

Помоћу анализе дводимензионалних слика могуће је доћи до закључака у погледу сегрегације у хоризонталној или вертикалној равни. Како би се добили подаци о сегрегацији минералне мешавине, слика се дели на три једнаке зоне, радијално, или у вертикалној равни и програм срачунава укупан број зрна агрегата за сваку величину сита у оквиру одређеног региона (слика 6).



Слика 6. Сегрегација минералне мешавине – подела на зоне за анализу радијалне сегрегације (лево) и вертикалне сегрегације (десно)

На слици 7 приказан је пример хистограма са подацима о радијалној сегрегацији.



Слика 7 Радијална сегрегација – хистограм [6]

2.3. Параметри унутрашње структуре асфалтне мешавине

Агрегатни скелет у оквиру асфалтне мешавине примарно служи за пријем и преношење оптерећења. У раду [7] је развијено неколико индекса, који се могу одредити на основу анализе 2D слика, а помоћу којих се може представити структура асфалтне мешавине и који могу послужити као индикатори њене осетљивости на трајну деформацију:

- укупан број контаката;
- укупна дужина контаката (mm);
- просечни апсолутни угао осе контаката у односу на хоризонталну осу AA_C (°) – хоризонтална оријентација, и
- вектор магнитуде Δc који квантификује просечну анизотропију расподеле оријентације равни контаката на 2D слици.

Број контаката зрна агрегата у асфалтној мешавини представља индикатор повезаности унутрашње структуре минералне мешавине. Повећањем броја контактних тачака долази до боље расподеле напона. Ефикасност контаката између суседних зрна агрегата зависи од контактне површине (дужине контакта у 2D слици) и оријентације равни контаката мерене у односу на хоризонталну осу.

Повећањем дужине контакта повећава се трење и укљештење између зрна агрегата. Што је оријентација равни контакта управнија на раван оптерећења, то је отпорност мешавине да се одупре деформацији под дејством оптерећења већа.

Особине мешавина могу се боље представити и комбинацијом појединих параметара унутрашње структуре. Укљештеност зрна агрегата се може прецизније дефинисати коришћењем комбинације дужине контакта и оријентације контакта, што је дефинисано као индекс унутрашње структуре асфалтне мешавине (ISI - *Internal Structure Index*) који се дефинише на следећи начин:

$$ISI = \sum_{i=1}^N \text{Дужина контакта}_i * \text{Sin}(AAci)$$

где је:

N – број контаката у минералној мешавини,

AAci – оријентација контакта i.

3. ПРИМЕНА ПРОГРАМА iPas² НА АСФАЛТНЕ МЕШАВИНЕ КОЈЕ СЕ КОРИСТЕ У СРБИЈИ

Применом програма iPas² анализирани су асфалтне мешавине које су у последње време коришћене на неколико градилишта у Србији са циљем да се утврди могућност програма да се одреди њихова запреминска структура и предвиди њихова отпорност на трајну деформацију.

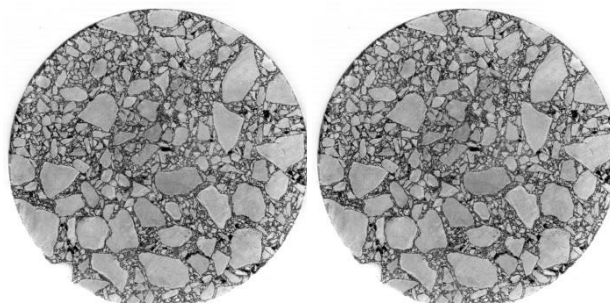
Испитивањем су биле обухваћене две мешавине са путним битуменом ВИТ 50/70 које су коришћене у пројекту појачаног одржавања пута Р-267:

- АБ 11с, са кречњачким песком из каменолома «Ковиловача» и каменом ситнежи из каменолома «Думача-Дивчибаре», и
- БНС 22сА са песком и каменом ситнежи из каменолома «Равње» - Ваљево.

Три анализирани мешавине са полимер-битуменом РмВ 45-80/65 су укључивале:

- АБ 11с и АБ 16с, које су коришћене на аутопуту Е-75 и мосту Бешка, и
- БНС 22сА која је коришћена на пројекту рехабилитације аутопута кроз Београд.

Примери скенираних слика за мешавину АБ 11с са обичним битуменом и БНС 22сА са полимер битуменом дати су на слици 8.



Слика 8. Примери скенираних слика за мешавину АБ 1с (лево) и БНС 22сА (десно)

Гранулометријски састав минералних мешавина је приказан у табели 1, а карактеристике асфалтних мешавина су приказане у табели 2.

Табела 1. Гранулометријски састав испитиваних асфалтних мешавина (пролаз на сити у % m/m).

	Асфалтна мешавина				
	1	2	3	4	5
Тип битумена	БИТ 50/70		РмВ 45-80/65		
Отвор сита (mm)	АБ 11с	БНС 22сА	АБ 11с	АБ 16с	БНС 22сА
0.063	7.9	7.7	8.9	7.9	
0.09	8.6	8.5	10.1	9.0	6.9
0.25	12.6	11.6	16.1	14.9	9.8
0.71	21.4	17.3	25.8	24.6	16.0
2.0	43.8	29.7	41.2	39.3	28.5
4.0	62.0	44.3	58.6	50.9	41.4
8.0	86.4	61.1	83.0	66.9	58.2
11.2	98.6	72.9	98.3	80.8	70.5
16.0	100.0	86.2	100.0	97.2	83.1
22.4		98.6		100.0	98.2
31.5		100.0			100.0

За све узорке асфалтних мешавина анализирана су по два керна који су пресечени и скенирани (по две скениране слике по сваком пресеку узорака).

Резултати анализе су приказани у табели 3 (за минималну величину зрна агрегата од 0.71 mm).

Табела 2. Карактеристике асфалтних мешавина

	Асфалтна мешавина				
	1	2	3	4	5
Тип битумена	БИТ 50/70		PmB 45-80/65		
Карактеристике мешавине и узорак из изведеног слоја	АБ 11с	БНС 22сА	АБ 11с	АБ 16с	БНС 22сА
Дебљина изведеног слоја (cm)	4.6	6.8	/	6.2	8.2
Садржај битумена у асфалтној мешавини (% m/m)	5.0	3.4	5.6	5.6	3.7
Привидна запреминска маса асф меш (kg/m ³)	2535	2523	2470	2445	2547
Запреминска маса лабораторијског узорка (kg/m ³)	2404	2419	2342	2332	2412
Запреминска маса узорка из изведеног слоја (kg/m ³)	2391	2352	/	2360	2434
Садржај укупних шупљина у лабораторијском узорку (% v/v)	5.1	4.1	5.2	4.6	5.3
Садржај укупних шупљина у узорку из изведеног слоја (% v/v)	5.7	6.8	/	3.5	4.4
Збијеност изведеног слоја (% m/m)	99.4	97.2	/	101.2	100.9
Садржај шупљина у каменом материјалу у лабораторијском узорку (% v/v)	17.0	12.2	18.4	17.6	14.0
Шупљине у каменом материјалу испуње-не битуменом, лаб. узорак % (v/v)	69.7	66.2	71.8	73.6	62.3
Стабилност на 60 °C (kN)	11.5	12.1	12.5	14.0	12.6
Однос стабилности и течења на 60 °C (kN/mm)	3.3	3.4	3.7	4.0	3.6

За све мешавине добијени су добри резултати у погледу параметара унутрашње структуре:

- Велики број контактних тачака, што указује на добру укљештеност зрна агрегата у асфалтној мешавини.
- Велике вредности укупне дужине контаката и угла оријентације равни контакта (АААс), што обезбеђује ефикаснију укупну структуру асфалтне мешавине.
- Висока вредност параметра Δc која указује на то да је већина контактних оријентација у истом смеру (управно на оптерећење), што побољшава могућности преношења напрезања.

Такође, као што је приказано у табели 3, сличне вредности се добијају за различите пресеке узорка једне асфалтне мешавине, што указује да су мешавине стабилне.

4. ПРОБЛЕМИ ПРИЛИКОМ ПРИМЕНЕ ПРОГРАМА iPas²

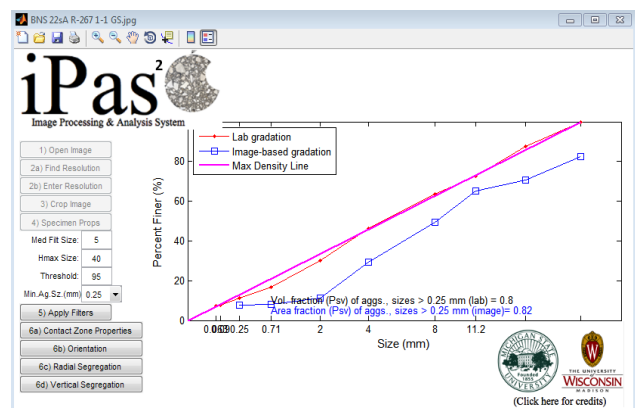
Приликом примене програма iPas² за анализу асфалтних мешавина уочени су одређени проблеми који ће бити прокоментарисани у даљем тексту.

За све асфалтне мешавине програм је срачунао сличну вредност резолуције, што је било и очекивано, јер су сви узорци истих димензија (Ф100mm) и сви узорци су скенирани на скенеру исте резолуције.

Срачуната резолуција је износила $\Delta x = \Delta y \approx 0.026 \text{ mm/pix}$. Међутим, примена ове резолуције није довела до очекиваних резултата приликом анализе неких асфалтних мешавина, а ни подешавање параметара филтрације није у тим случајевима помогло.

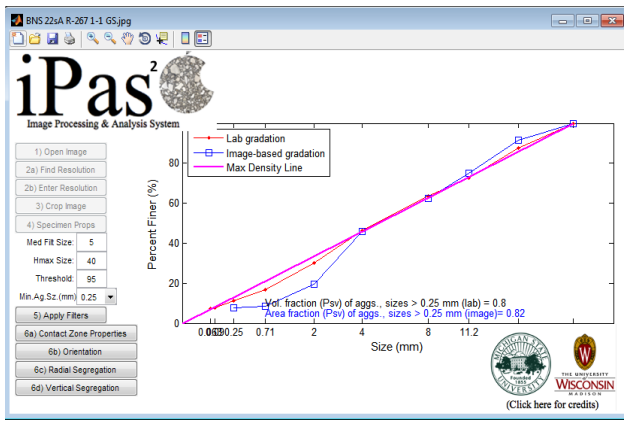
Стога је вредност резолуције мануално подешена помоћу опције *enter resolution* како би се постигли бољи резултати.

На сликама 9 и 10 дат је пример крајњег излаза програма на коме се види утицај резолуције на гранулометријски састав минералне мешавине добијен са истим параметрима филтрације. Поред линије гранулометријског састава потребно је упоредити и запреминско учешће агрегата у асфалтној мешавини са површином агрегата на слици.



Слика 9. Мешавина БНС 22 сА са ПМБ 45-80/65, вредност резолуције 0.026 mm/pix

Тек када се добије задовољавајући однос наведених параметра прелази се на анализу микроструктуре асфалтне мешавине.

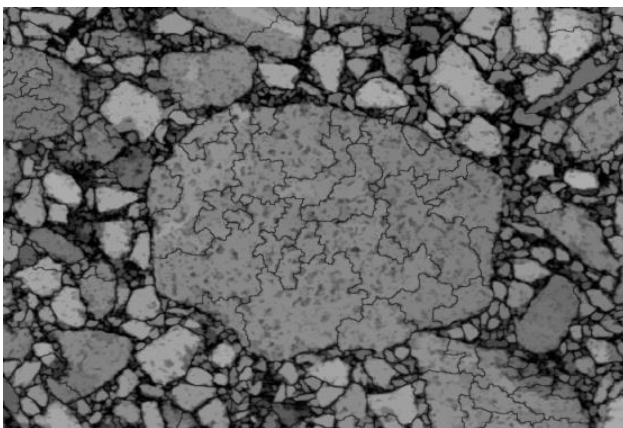


Слика 10. Мешавина БНС 22 сА са РmВ 45-80/65, вредност резолуције 0.0155 mm/pix

Табела 3. Резултати анализе структуре асфалтних мешавина применом програма iPas²

Асфалтна мешавина										
Тип битумена	БИТ 50/70				РmВ 45-80/65					
Карактеристике мешавине	АБ 11с		БНС 22сА		АБ 11с		АБ 16с		БНС 22сА	
Број пресека узорака асфалтне мешавине	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Број зрна агрегата	566	623	1610	1584	2541	2328	2084	2076	632	724
Укупан број контаката	715	922	3358	2995	4222	4115	4122	4322	1220	1300
Укупна дужина контаката (мм)	459	553.18	3691.5	3211.4	4628.4	4587.2	4563.2	4658.2	1333.4	1400.2
Вектор магнитуде Δс	80.68	80.99	80.53	79.16	84.89	84.70	84.13	84.17	83.08	83.38
Просечни апсолутни угао оријентације равни контаката ААс (°)	64.95	65.22	65.62	65.01	68.01	67.89	67.69	67.84	66.29	66.66
ISI – Индекс унутрашње структуре	408.68		3247.69		3645.12		4105.67		1166.98	

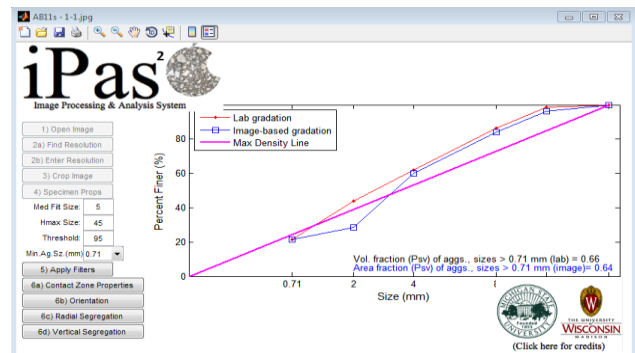
Међутим, примећено је у појединим случајевима да чак и када се добије задовољавајући однос поменутих параметара, понекад се дешава да обрађена 2D слика не приказује на задовољавајући начин узорак асфалтне мешавине (слика 11).



Слика 11. Мешавина АБ 11с, резолуција 0.0254 mm/pix

На слици 12 је приказан крајњи резултат обраде слике узорка асфалтне мешавине АБ 11с за резолуцију коју је програм сам срачунао (0.0254 mm/pix). Може се видети да запремина агрегата у мешавини и површина агрегата на слици имају сличне вредности, као и то да гранулометријски састав на бази слике доста добро приказује гранулометријски састав добијен лабораторијским испитивањем (осим када је у питању сито отвора 2 mm).

Међутим, као што је приказано на слици 11, када се погледа обрађени скен може се приметити да је слика издељена на велики број региона од којих сваки представља једно зрно агрегата.



Слика 12. Мешавина АБ 11с, крајњи резултат обраде слике у програму iPas

Због горе наведених проблема, добијени резултати параметра унутрашње структуре за различите асфалтне мешавине се нису могли упоредити из разлога што је узорак био релативно мали, а за поједине мешавине обрада 2D слика асфалтног узорка била је одрађена са различитим вредностима резолуције. Вредност резолуције је битан параметар који утиче на минималну величину зрна агрегата која се узима у обзир приликом прорачуна контактних тачака и на минимално растојање за које ће програм, ако је испуњено, сматрати да се два зрна агрегата налазе у контакту.

5. ЗАКЉУЧАК

Карактеризација микроструктуре асфалтне мешавине путем дводимензионалне (2D) технике је савремен, релативно једноставан и економски исплатив поступак за анализу запреминске структуре асфалтних мешавина који се може користити и за процену њихове осетљивости на трајне деформације, и као алтернативни поступак при контроли квалитета изведених радова.

Програм iPas² који је приказан у овом раду полази од познатих карактеристика асфалтних мешавина, као што је запреминска структура асфалтне мешавине и њен гранулометријски састав и на основу тих података и задатих параметара филтрирања врши анализу 2D слике узорка асфалтне мешавине.

У оквиру овог рада извршена је анализа неколико асфалтних мешавина које су у скорије време коришћене на пројектима изградње и одржавања путева у Србији. За све мешавине добијени су добри резултати када су у питању параметри унутрашње структуре, што је потврдило да су у питању добро пројектоване и стабилне мешавине. Са друге стране поређење добијених резултата за различите мешавине није било могуће спровести због релативно малог узорка и због различитих параметара обраде слике (различита резолуција) асфалтног узорка.

Литература

- [1] Zhu Han, Julie E. Nides. (2002). Contact based analysis of asphalt pavement with the effect of aggregate angularity, *Mechanics of Materials*, Vol. 32, pp. 193 - 202.
- [2] Masad E, Muhunthan B, Shashidhar N, Harman T (1999) Internal structure characterization of asphalt concrete using image analysis. *ASCE Journal of Computing in Civil Engineering (Special Issue on Image Processing)* 13(2):88–95.
- [3] Yue ZQ, Bekking W, Morin I. (1995) Application of digital image processing to quantitatively study of asphalt concrete microstructure. In: *Transportation Research Record 1492*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 53–60.
- [4] Masad E, Somadevan N, Bahia H, Kose S (2000) Modeling and experimental measurements of strain distribution in asphalt mixes. *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, 127(6):471–477.
- [5] Tashman L, Wang LB, Thyagarajan S (2007) Microstructure characterization for modeling HMA behavior using imaging technology. *Road Materials and Pavement Design* 8(2):207–238
- [6] Coenen AR, Kutay ME, Sefidmazgi NR, Bahia HU (2011) Aggregate structure characterization of asphalt mixtures using 2-dimensional image analysis. *Road Materials and Pavement Design* 13(3):433–454
- [7] Roohi Sefidmazgi N. (2011) Defining effective aggregate skeleton in asphalt mixture using digital imaging. Master of Science thesis, University of Wisconsin-Madison.
- [8] Sefidmazgi NR, Tashman L, Bahia H (2012) Internal structure characterization of asphalt mixtures for rutting performance using imaging analysis. *Road Materials and Pavement Design* 13 (sup1):21–37.
- [9] Čurović, T., Ćirilović, J., & Mladenović, G. (2010). Merna nesigurnost - pojam i proceduralni koraci pri kvantifikaciji. *Put i saobraćaj*, 56(4), 90-96.
- [10] Čurović, T., Mladenović, G., & Milićević, R. (2009). Metodologija analize rezultata međulaboratorijskih ispitivanja. *Put i saobraćaj*, 56(2), 5-10.
- [11] Miljković, M., & Mladenović, G. (2009). Tehnologije asfaltnih mešavina po toplom postupku u Evropi i SAD. *Put i saobraćaj*, 56(3), 11-22.