



СОФИЙСКИ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. КЛ. ОХРИДСКИ“  
ФИЗИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ  
КАТЕДРА „МЕТЕОРОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА“

---

**Диагноза и прогноза на мъгла по  
метода ГНСС метеорология и  
числени експерименти**

**АВТОРЕФЕРАТ**

на

**ДИСЕРТАЦИЯ**

на

**НИКОЛАЙ КИРИЛОВ ПЕНОВ**

София, 2023



СОФИЙСКИ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. КЛ. ОХРИДСКИ“  
ФИЗИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ  
КАТЕДРА „МЕТЕОРОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА“

---

# Диагноза и прогноза на мъгла по метода ГНСС метеорология и числени експерименти

## АВТОРЕФЕРАТ

на

НИКОЛАЙ КИРИЛОВ ПЕНОВ

За присъждане на образователна и научна степен „доктор“ по специалност  
4.1 Физически науки – Метеорология.

Научен ръководител:

/доц. д-р Г. Герова/

Дисертантът е редовен докторант към на Катедра "Метеорология и геофизика", Физически факултет, Софийски университет "Свети Климент Охридски" в периода 10.01.2017 - 30.09.2017 г., а след това трансформиран в задочна форма в периода 01.10.2017 - 01.10.2021 г. Отчислен е с право на защита със заповед #РД20-1972 от 05.10.2021 г.

Дисертационният труд се състои от:

- Брой страници - 118
- Брой фигури - 34
- Брой таблици - 11
- Брой цитирани литературни източници - 111

Защитата на дисертационния труд ще се проведе на .....2024 г. от .... часа в аудитория А415 на Физическия факултет към Софийски университет „Свети Климент Охридски“, бул. „Джеймс Баучер“ 5. Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в библиотеката на Физическия факултет към Софийски университет „Свети Климент Охридски“, бул. „Джеймс Баучер“ 5.

Благодаря на научния ми ръководител доц. д-р Гергана Герова за невероятното преживяване по време на обучението ми. За търпението и възможността да участвам в развитието на науката в България. За съвместната работа, за насоките, помощта и вдъхновението за реализиране на дисертацията. Благодаря от все сърце и на, съпругата ми Ива за търпението и разбирането по време на докторантурата ми, колегите от РВД за подкрепата и разбирането по време на докторантурата ми, гл. ас. д-р Анастасия Стойчева (НИМХ) за съдействието при описването на синоптичните обстановки, въведението в темата и вдъхновението, Орлин Иванов за помощта с английски език при подготовката на статиите, ас. д-р Мартин Славчев за помощта при численото моделиране, цялото ми семейството за търпението, подкрепата и насоките в трудните моменти.

# Съдържание

<b>1</b>	<b>Актуалност и цел на дисертационния труд</b>	<b>4</b>
1.1	Актуалност на проблема . . . . .	4
1.2	Цел и задачи на дисертацията . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Съвременно състояние на проблема</b>	<b>6</b>
2.1	Изследвания на мъглата в световен мащаб . . . . .	6
2.1.1	Числени модели за прогноза на мъгла . . . . .	7
2.1.2	Диагностика на мъгла: индекси и интегрирана водна пара . . . . .	8
2.1.3	Диагноза на мъгла: Машинно обучение и невронна мрежа . . . . .	8
2.2	Изследвания на мъгла в България . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Метод на работа</b>	<b>11</b>
3.1	SYNOP наблюдения . . . . .	11
3.2	Наблюдения от въздухоплавателни средства (AMDAR) . . . . .	11
3.3	Сведения за метеорологични условия на летища . . . . .	12
3.4	Индекси на устойчивост . . . . .	12
3.5	ГНСС метеорология . . . . .	13
3.6	Числени експерименти . . . . .	13
3.7	Дискриминантен анализ . . . . .	14
3.8	Обективна класификация на атмосферната циркулация . . . . .	14
3.9	Машинно обучение . . . . .	15

<b>4</b>	<b>Синоптични обстановки с мъгла в Пловдив</b>	<b>16</b>
4.1	Климатология на мъглата в Пловдив 1991 - 2018 . . . . .	16
4.2	Индекс на устойчивост за Пловдив . . . . .	17
4.2.1	Индекс на устойчивост за Пловдив 1991 - 2018 . . . . .	17
4.2.2	Дискриминантен анализ . . . . .	18
4.2.3	Обстановка 1-3 януари 2013 година . . . . .	18
4.3	Заклучение . . . . .	20
<b>5</b>	<b>Мъгла в София 2010 - 2019</b>	<b>21</b>
5.1	Циркулационна класификация 2010 - 2019 . . . . .	21
5.2	Мъгла в София: FSI, SSI и IWV . . . . .	22
5.3	Оценка на успеваемост и класификационна функция . . . . .	24
5.4	Заклучение . . . . .	25
<b>6</b>	<b>Оценка на видимост с машинно обучение и невронна мрежа</b>	<b>26</b>
6.1	Климатология и характеристики на мъглата на летище София	26
6.2	Оценка на видимост с машинно обучение и невронна мрежа	28
6.2.1	Корекция на оценката на видимостта и успеваемостта	28
6.2.2	Оценка по значимост на параметрите в RF . . . . .	29
6.3	Заклучение . . . . .	30
<b>7</b>	<b>Приложение в оперативната дейност</b>	<b>31</b>
7.1	Продължителна мъгла в София 2014 г. . . . .	31
7.2	ГНСС демонстратор за мъгла . . . . .	32
7.3	Мъгла на летище София 2021/2022 г. . . . .	33
7.4	Заклучение . . . . .	35
<b>8</b>	<b>Научни приноси, публикации и представяне на резултати по дисертацията</b>	<b>36</b>
8.1	Научни приноси . . . . .	36
8.2	Публикации по дисертацията . . . . .	37
8.2.1	Публикации в списания . . . . .	37
8.2.2	Публикации в разширен текст на научни форуми . . . . .	37
8.3	Представяне на резултатите . . . . .	38

# Глава 1

## Актуалност и цел на дисертационния труд

### 1.1 Актуалност на проблема

Мъглата представлява опасно метеорологично явление, чието прогнозиране остава предизвикателство не само в България, но и в целия свят. Локални особености на терена като наличие на водоеми, планини и големи градове оказват критично влияние в процеса на формиране и разсейване на мъгла. Според световната метеорологична организация, към настоящият момент няма нито един метод с достатъчна надежност при изготвяне на свръхкраткосрочна прогноза на мъгла. В следствие на това, учените по цял свят продължават да изследват характеристиките на мъглата, да разработват нови и да подобряват вече съществуващи методи за прогноза на мъгла. В авиацията мъглата налага въвеждането на процедура за ниска видимост, която води до реорганизация на работата по самото летище, както и до закъснения в излитания и кацания трафик. Органите за обслужване на въздушното движение се нуждаят от точни и навременни прогнози за формиране и разсейване на мъгла с цел осигуряване на безопасността на пътници, екипаж и наземен персонал, както и за минимизиране на финансовите загуби. В последните две-три години с нарастваща скорост започнаха да се използват алгоритми на машинното обучение за оценка и прогнозиране на различни метеорологични елемен-

ти и явления. Тези алгоритми съществуват отдавна, но употребата им в метеорологията става възможна поради натрупването на дълги времеви редици от наблюдения с висока времева разрешаваща способност, което дава възможност на алгоритмите ефективно да откриват зависимостите между различни метеорологични параметри и характеристики на явленията. Машинното обучение се използва и в комбинация с числени модели, за да подобри и коригира техните резултати. С натрупването на все повече диагностични и прогностични продукти, бързата и правилна оценка при изготвянето на прогнози става все по-трудна задача. Алгоритмите на машинното обучение са на път да станат важна част от изготвянето на краткосрочни и свръхкраткосрочни прогнози за времето.

## 1.2 Цел и задачи на дисертацията

Целта на дисертационния труд е разработване на методи за диагноза и прогноза на опасното метеорологично явление мъгла, които да подобрят гражданските и авиационни прогнози. Задачите, свързани с тази цел са:

- Дефиниране и използване на индекс на устойчивост за диагноза на мъгла в Пловдив.
- Изследване на мъглата в София с Fog Stability Index и модифициране на Sofia Stability Index с включването на допълнителни елементи като скорост на вятъра, относителна влажност и интегрирана водна пара.
- Количествена оценка на типа атмосферна циркулация при мъгла в София чрез използване на обективна типизация.
- Изследване на способността на алгоритъм за машинно обучение Random Forest и невронна мрежа Long Short-Term Memory да оценяват видимостта на летище София по данни от сведения METAR.
- Разработване на свободностъпен продукт, който използва интегрирана водна пара, получена от ГНСС тропосферни продукти и от числен модел, за подпомагане изготвянето на свръхкраткосрочна прогноза на мъгла.

## Глава 2

# Съвременно състояние на проблема

### 2.1 Изследвания на мъглата в световен мащаб

Прогнозата на мъглата е предизвикателство поради фактори като атмосферна стратификация, турбуленция, радиация, влияние на орографията и аерозоли, като всички те спомагат за образуването на мъгла (*Steenefeld and de Bode, 2018; Boutle et al., 2022*). В градските райони мъглата обикновено е свързана с лошо качество на въздуха. Тази комбинация предизвиква проблеми с наземния и въздушния транспорт, проблеми със здравето, финансови загуби, а в най-лошия случай може да доведе и до смъртни случаи. *Gultepe et al. (2019)* са изследвали въздействието на метеорологичните условия върху въздушния транспорт и са установили, че мъглата е второто най-често срещано метеорологично явление след вятъра, което предизвиква най-много авиационни инциденти в нискополетната авиация. *Egli et al. (2019)* изследват случаите на мъгла в Централна Европа за периода 2006-2015 г. и установяват, че мъглата най-често се образува под влияние на антициклон, както и при слаб югозападен поток, свързан с високо налягане. Въпреки че тези заключения са добре известни на оперативните метеоролози, класификацията на синоптичните условия, свързани със специфични метеорологични явления, се изучава отскоро. *Vautard et al. (2009)* установяват, че в Европа се наблюдава спад от 50% в честотата



на мъглите през последните 30 години поради намалено замърсяване на въздуха. Това влияе на радиационния баланс през зимата и допринася за повишаване на средната температура. Влиянието на повишаването на температурата в последните десетилетия върху образуването на мъгла е изследвано от *Klemm et al.* (2016). Те оценяват, че промяна от 10% в концентрацията на аерозолите има приблизително същото въздействие върху образуването на мъгла, както промяната от 0.1° C в температурата на въздуха.

### 2.1.1 Числени модели за прогноза на мъгла

През последното десетилетие има значителни подобрения в пространствената разделителна способност, микрофизиката и началните условия на моделите за числени прогнози на времето (Numerical Weather Prediction - NWP). Въпреки това, прогнозата на мъглата продължава да бъде предизвикателство поради мащаба и локалните фактори, от които зависи образуването ѝ, които могат да останат не добре описани от моделите. (*Steenefeld et al.*, 2015; *Belo-Pereira and Santos*, 2016) сравняват успеваемостта на моделите WRF и HARMONIE за два случая на мъгла - един през есента и един през пролетта в Нидерландия. Те обобщават, че моделът WRF се справя по-добре в прогнозирането на типа и времето за мъглата. Параметризацията на планерния граничен слой се оказва най-важна за настъпването на мъглата, докато ключова роля за разсейването на мъглата има микрофизиката. *Román-Cascón et al.* (2012) изследва три случая на мъгла в Испания, използвайки модела WRF с различни параметризационни схеми, и установява, че въпреки подобренията в прогнозираните скорост на вятъра и температура, положителните отклонения в прогнозните стойности остават проблем. Тъй като образуването на мъгла е силно свързано с температурата и скоростта на вятъра и дори грешка от 1° C може да доведе до неточна прогноза.

### 2.1.2 Диагностика на мъгла: индекси и интегрирана водна пара

Друг метод за прогноза на мъгла са индексите на устойчивост. Тези индекси обикновено се изчисляват чрез измервания на температурата, точката на оросяване и скорост на вятъра на повърхността и на по-високи нива в атмосферата, за да се оцени стратификацията на въздушния слой между две височини. Един такъв индекс е широко използваният Fog Stability Index (FSI), разработен от Военновъздушните сили на САЩ. Индексът се използва в редица изследвания (*Arun et al. (2018)*, *Holtslag et al. (2010)*, *Song and Yum (2013)*), които показват, че FSI има по-добри прогностични способности от някои от моделите за числена прогноза на времето. Въпреки обещаващите резултати, FSI изисква измервания на ниво 850 hPa, което е възможно само с аерологичен сондаж, който се извършва само няколко пъти на ден. *Lee et al. (2010)* първи анализират връзката между получената от Глобалните навигационни спътникова системи (ГНСС) интегрирана водна пара (Integrated Water Vapour - IWV) и видимостта по време на гъста радиационна мъгла по южното крайбрежие на Южна Корея. Те обобщават, че IWV може да се счита за допълнителен метод за откриване на процесите, свързани с мъгла, и за подобряване на прогнозирането ѝ.

### 2.1.3 Диагноза на мъгла: Машинно обучение и невронна мрежа

Машинното обучение (МО) се използва за различни класификационни и регресионни задачи в продължение на много години. В последните години методите, базирани на МО, се прилагат и за прогноза на намалена видимост и други метеорологични явления. Опасни за авиацията явления като гръмотевични бури, силен ветър с пориви и мъгла могат да предизвикат забавяния при пристигането или дори пренасочване (невъзможност да кацнат на планираното летище) на пристигащите полети. Закъснения на въздушния трафик на летище Лондон-Гетуик по метеорологични при-

чини са обект на изследване от *Schultz et al.* (2021), като използват невронни мрежи. Те използват метеорологични данни от наблюденията METAR и информация от полетни планове, за да прогнозира забавянията. Изследването им потвърждава способността на машинното обучение да реализира сложни задачи с нелинейни връзки между параметри от различен вид. *Bari et al.* (2023) обсъждат приложенията на подхода на МО за прогнозиране на мъгла и показват, че МО алгоритмите могат да подобрят производителността на моделите за числена прогноза на времето. В допълнение МО в комбинации с дълги редици от наблюдения могат да подпомагат свръхкраткосрочната прогноза на мъгла за районите на летищата. *Castillo-Botón et al.* (2022) правят детайлен анализ на различни модели на МО, приложени за оценка на видимостта за регресионни и класификационни задачи. Те сравняват ансамбли, изкуствени невронни мрежи (ANN), линейни и статистически модели и показват, че най-добрите резултати при регресия по отношение на  $R^2$ , RMSE и MAE са от модела ANN - Multi-Layer Perceptron и от ансамбловия модел Random Forest (RF). При класификационна задача ансамбловите модели Gradient Boosting и RF имат най-добро представяне. Линейните модели се оказват с ниска способност за прогноза, което потвърждава комплексният и нелинеен характер на явлениято мъгла. Когато се използват за класификация, всички модели се сблъскват с трудности при прогнозата на категориите съответстващи на димка видимост между 1 и 5 km и мъгла с видимост над 500 m. Това може да се обясни с факта, че преходът от мъгла към видимост от няколко километра, става много бързо, което води до недостатъчно количество данни за този диапазон на видимостта.

## 2.2 Изследвания на мъгла в България

В България мъглата е обект на изследване от много години, тъй като нейното точно и навременно прогнозиране остава нерешена задача не само у нас, но и по света. Анастасия Стойчева прави задълбочено изследване на мъглата в София за периода 1992 - 2014 г. Нейната дисертация (*Stoycheva*, 2015) представя климатология на мъглата в София, както и анализ на избрани обстановки с продължителна мъгла. Изследванията представят

климатология на мъглата по месеци и установяват тенденция за намаляване на броя регистрации на мъгла след 2008 г., като посочените причини са циркулационни. Определени са и типичните условия, при които се наблюдава мъгла, а именно: температура между  $-5$  и  $5^{\circ}\text{C}$ , атмосферно налягане в интервала  $945-965\text{ hPa}$  и относителна влажност между  $95$  и  $100\%$ . Илиян Манафов пръв изследва мъглата на летище София с числен модел за прогноза на времето Weather Research and Forecasting (WRF) (Manafov, 2017). Направени са числени експерименти с различни параметризационни схеми за планетарния граничен слой и микрофизиката с цел да се намери оптималната конфигурация, която да прогнозира максимално точно температура и относителна влажност на земната повърхност. За да се подобри точността на модела, се прилага и асимилация на наземни наблюдения и аерологични сондажи. Чрез асимилацията е постигнато подобрене на прогнозираната температура средно с  $1.6^{\circ}\text{C}$ , на относителната влажност средно с  $3.1\%$ , в скоростта на вятъра с  $0.3\text{ m/s}$  и на приведеното към морско ниво налягане с  $3\text{ hPa}$ . Елена Топузова изследва мъглите на летище Бургас за периода  $2008 - 2014$  г. (Topuzova, 2017). За разлика от София, където мъгли се наблюдават предимно през есенно-зимния сезон, в района на летище Бургас има значителен брой случаи на мъгли през пролетните месеци март и април. Установено е, че най-честите мъгли са от адвективно-радиационен тип ( $47 - 61\%$ ), следвани от адвективен тип ( $27 - 35\%$ ), следфронтални ( $7 - 13\%$ ), а най-малко са радиационните ( $4 - 5\%$ ).

## Глава 3

# Метод на работа

### 3.1 SYNOP наблюдения

Националният институт по метеорология и хидрология (НИМХ) извършва регулярни синоптични наблюдения (SYNOP) в 00, 06, 12, 18 UTC (основни синоптични срокове) и в 03, 09, 15 и 21 UTC (междинни синоптични срокове). За целите на тази работа са използвани наблюдения от Станция София, Пловдив и високотланските станции Черни връх и Рожен както следва: 1) приземната температура ( $t$ ), 2) относителната влажност (RH), 3) метеорологични явления в сегашен и изминал момент, и 4) хоризонталната видимост.

### 3.2 Наблюдения от въздухоплавателни средства (AMDAR)

Глобалната програма за предаване на метеорологични данни от въздухоплавателни средства Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR) е иницирана от Световната метеорологична организация (СМО) и нейните членове, в сътрудничество с партньори от авиацията. Чрез системата AMDAR се събират, обработват и предават метеорологични данни до наземни станции. След достигане на земята, данните се предават на националните метеорологични служби, където се обработват, извършва се качествен контрол и се предават в информационната система на СМО.

### 3.3 Сведения за метеорологични условия на летища

Meteorological Aerodrome Report (METAR) е стандартна система за кодиране на сведения за метеорологичните условия на летища, които имат важна роля в авиационната безопасност и планирането на полети. За изучаване на характеристиките на мъглата в летище София се използват сведения METAR за периода 2005 - 2022 г. Тези сведения представляват метеорологичните условия в зоната на летището и нейната околност. Район на летището е зоната, затворена в окръжност с радиус 8 km и център контролната точка на летището, а околността се простира от 8 до 16 km от контролната точка. METAR се издава на всеки 30 минути.

### 3.4 Индекси на устойчивост

В настоящата работа е използван индексът на устойчивост Sofia Stability Index (SSI), дефиниран от *Stoycheva and Evtimov (2014)*. SSI се изчислява, като се използват приземните температури от синоптични станции София и Черни връх в следното уравнение:

$$SSI = \sqrt{\frac{1 + \Delta t / 17}{1 + t_{ch.vrah}/273.15}} \quad (3.1)$$

Аналогично се пресмята индексът PSI, използвайки данни от SYNOP наблюдения в станция Пловдив и станция Рожен:

$$PSI = \sqrt{\frac{1 + \Delta t / 16}{1 + t_{Rozhen}/273.15}} \quad (3.2)$$

Пресмята се индексът Fog Stability Index (FSI) разработен от Военновъздушните сили на САЩ (*Holtslag et al., 2010*). Той се пресмята със следното уравнение:

$$FSI = 2(T - T_d) + 2(T - T_{850}) + W_{850} \quad (3.3)$$

Общото за използваните в дисертационният труд индекси е че те използват наблюдения на земната повърхност и във височина като по този начин отчитат устойчивостта на атмосферата.

### 3.5 ГНСС метеорология

В това изследване е използване ГНСС станция София (SOFA, 667 m asl). Времеви редици на SOFA са публично достъпни от Nevada Geodetic Laboratory (NGL) (*Blewitt et al.* (2018)). Втората GNSS станция е София-Плана (SOFI, 1164 m asl). SOFI е част от International GNSS Service (IGS) и в това изследване са използвани тропосферни продукти от първата IGS кампания за репроцесиране *Byun and Bar-Sever* (2009); *Reibischung et al.* (2012). Тропосферният продукт от GNSS станциите SOFA и SOFI е Зенитно пълно закъснение (Zenith Total Delay - ZTD). Интегрираната водна пара (Integrated Water Vapour - IWV) е пресметната, като се използва приземното налягане ( $p_s$ ) и температура ( $t_s$ ) *Davis et al.* (1985); *Bevis et al.* (1992):

$$IWV = \frac{10^6}{(k_3/T_m + k'_2)R_v} \left( ZTD - 0.0022768 \frac{p_s}{1 - 0.00266\cos(2\theta) - 0.00028 h} \right) \quad (3.4)$$

### 3.6 Числени експерименти

В тази дисертация са направени числени експерименти с версия 3.7.1 на числен модел за прогноза на времето Weather Research and Forecast (WRF, *Skamarock et al.* (2008)). Моделът WRF се изчислява за България с хоризонтална резолюция от 2 km. Проведени са експерименти с вертикална резолюция 45, 55 и 60 вертикални нива. Допълнителните вертикални нива са избрани, за да се увеличи вертикалната резолюция близо до повърхността. Няма включено асимилиране на данни. От вертикалните профили на WRF над Пловдив се взимат температурите на височина 164 m и 1671 m и се използват за пресмятане на PSI.

### 3.7 Дискриминантен анализ

Дискриминантният анализ (*Huberty, 1975*) е направен с софтуер Statistica (Sta). За статистическия анализ са избрани всички дни от ноември до февруари в периода 2010–2019 г. Трчасовите регистрации са разделени на две групи: (1) с регистрации за мъгла (F), включващи 10 различни видове мъгла според кодовете на СМО, и (2) без регистрации за мъгла (noF), включващи димка, омара, дим, прах, ръмеж, сняг и ясно небе. За статистическия анализ са използвани следните параметри: (1) степен на устойчивост на атмосферата, определена чрез индексите SSI и FSI и (2) данните за IWV за групите F и noF. Следните основни статистики са оценени отделно за групите F и noF и за IWV от GNSS станции SOFA и SOFI: медиана, 10-ти, 25-ти, 75-ти и 90-ти проценти на FSI и SSI. Използван е F-тест с доверително ниво от 0.05, за да се определи статистически значимата разлика между групите. За получаване на кварталните диаграми на FSI и SSI и тяхното разделяне на две групи F и noF е приложен стандартен дискриминантен анализ.

### 3.8 Обективна класификация на атмосферната циркулация

В това изследване е използван софтуер за обективна класификация на циркулацията, Cost733class (Cost733class v1.2, *Philipp et al. (2016)*). Въз основа на предишно изследване от *Stoev et al. (2022)* бе избран методът Jenkinson–Collison (JCT). JCT класифицира типовете циркулация, определяйки ги чрез използване на прагова стойност за циркулационни индекси *Post et al. (2002)*. Процесът на класификация е автоматизиран чрез използването на прагови стойности за три индекса (зонален и меридионален поток, и завихреност), които разграничават три състояния (ниско, средно и високо) и 26 типа циркулация.



### 3.9 Машинно обучение

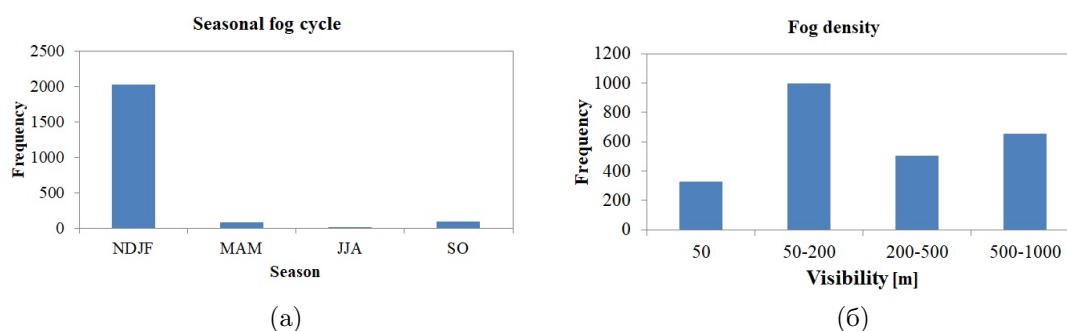
За извършване на експерименти за оценка на видимост на летище София са избрани алгоритъм за машинно обучение Random Forest и невронна мрежа Long Short-Term Memory. Като входни параметри на алгоритмите се използват скорост и посока на вятъра, температура, точка на оросяване, долна граница и закритие на небето от най-ниския облачен слой, налягане, дефицит на точката на оросяване, ден от годината, време от денонощието и FSI. Random Forest (RF) е ансамблов алгоритъм за машинно обучение (*Breiman (2001)*). Алгоритъмът разделя данните на две подмножества за обучение и тест, като използва първото, за да построи множество от дървета на решения, използвайки метода bootstrap (*Efron (1979)*). След получаване на резултатите от всички дървета, крайният резултат от алгоритъма е средно аритметично от всички дървета (при регресия) или модата (при класификация). Long Short-Term Memory (LSTM) (*Hochreiter and Schmidhuber (1997)*) е модел от групата на рекурентни невронни мрежи. Моделът е подходящ за прогнозиране на времеви редици, защото разполага с допълнителна характеристика като клетка за памет и контролен механизъм с три направления (портали). Порталите се наричат актуализация, забравяне и изход. Актуализационният портал контролира новата информация, която се съхранява в клетката за памет, а порталът за забравяне е отговорен за съхранението само на важната информация и изтриването на маловажната. Изходният портал комбинира текущите входни данни и тези от предходното състояние на скрития слой (на една стъпка назад) и ги обединява с текущото състояние на клетката за памет, за да произведе продукта на невронната мрежа. Този механизъм е способен ефективно да открива дългосрочни зависимости и нелинейни връзки във времеви редици.

## Глава 4

# Синоптични обстановки с мъгла в Пловдив

### 4.1 Климатология на мъглата в Пловдив 1991 - 2018

За да се изследват характеристиките на мъглата и времето им разпределение, е избран период от 28 години. Фигура 4.1а показва, че мъглата в Пловдив в 91.4 % от регистрациите е през зимата, 3.66 % са през пролетта а съответни 0.59 % и 4.34 % за лятото и есента. През лятото мъглата се появява след преминаване на студен фронт, когато влажността се увеличава и температурата се понижава, докато през зимния сезон мъгла се формира по време на силни и продължителни температурни инверсии под влияние на антициклони. Фигура 4.1б представя разпределението на регистрациите на мъгла по хоризонтална видимост: (а) 0-50 m, (б) 50-200 m, (в) 200-500 m и (г) 500-1000 m. Максимумът на регистрациите на мъгла е 999 регистрации с видимост между 50 и 200 m и, а в комбинация с регистрациите с видимост под 50 m (329), правят общо 53.5 % от всички случаи.

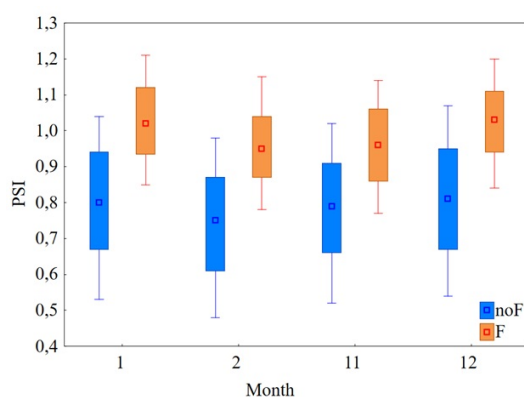


Фигура 4.1: Сезонни регистрации на мъгла (а) и (б) разпределението им по видимост за периода 1991 - 2018.

## 4.2 Индекс на устойчивост за Пловдив

### 4.2.1 Индекс на устойчивост за Пловдив 1991 - 2018

За да се използва PSI като индикатор за начало и край на мъгла, е необходимо да се проучат и количествено да се определят промените му за различни обхвати на видимост. Фигура 4.2 е кварталната диаграма на PSI за случаи с мъгла и без мъгла за всеки месец през зимния сезон. Разликата на месечна база е добре видима, като 25-тият процентил за мъгла има приблизително същата стойност като 75-тият процентил за без мъгла. През януари и декември стойностите са по-високи в сравнение с тези през февруари и ноември както за случаите с мъгла, така и за тези без мъгла.



Фигура 4.2: Квартилна диаграма на PSI за зимните месеци.

POD	FAR	RH	PSI+RH
noF	79.7 %	67.4 %	78.7 %
F	85.2 %	98.1 %	93 %

Таблица 4.1: POD за групите noF/F за периода 1991 - 2018, изчислени за: (1) само за PSI, (2) само за RH и (3) за комбинацията от двете.

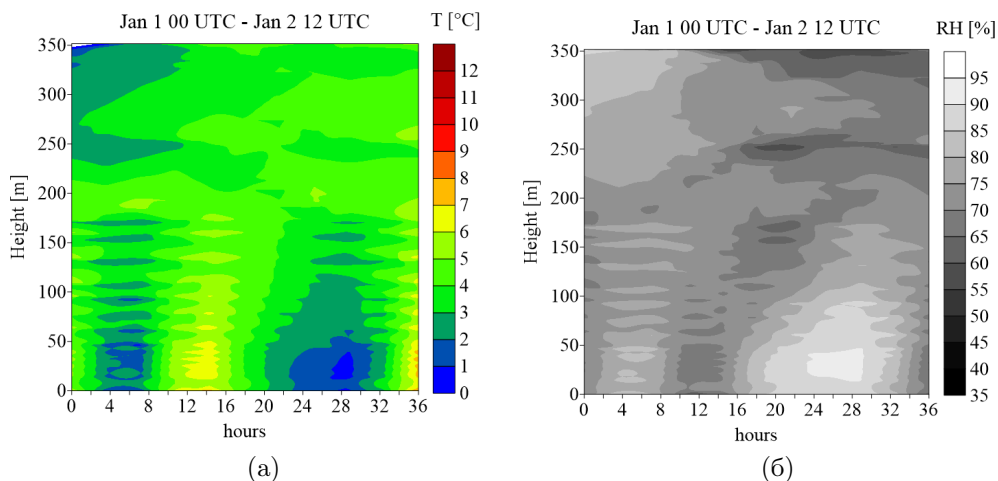
#### 4.2.2 Дискриминантен анализ

Оценка на PSI се извършва чрез дискриминантен анализ, като PSI се групира (независима променлива) с индикатора F/noF (групираща променлива). Таблица 4.1 представя процента на всички случаи, които са правилно класифицирани във всяка група - F и noF, базиран на дискриминантния анализ. Дискриминантният анализ показва, че комбинацията от PSI и RH има успеваемост от 78.7 % в прогнозата на мъгла.

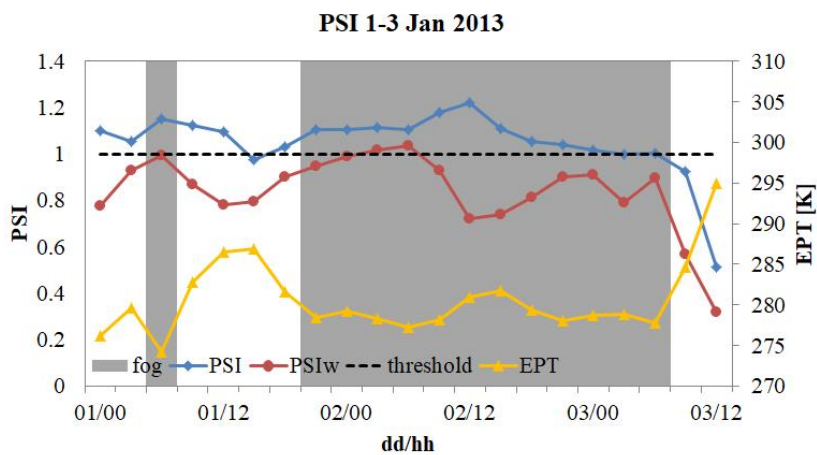
#### 4.2.3 Обстановка 1-3 януари 2013 година

Обстановката 1-3 януари 2013 г., представлява комбинация от радиационно охлаждане и адвекция на топъл въздух на 1500 m височина, и се използва като тест за PSI, изчислен от модела WRF и от наблюденията. На Фигура 4.3а и 4.3б са представени 36-часови температурни профили от WRF. Слаби инверсии се отбелязват само през нощта, докато през деня температурните профили от WRF показват ясно небе. Това довежда до много голяма разлика в температурата от 9.2° C между прогнозата и наблюдението на 2 януари, 12 UTC. Прогнозираната относителна влажност достига до 94 % сутринта на 2 януари. Фигура 4.4 показва PSI за Пловдив от 1 до 3 януари 2013 г., изчислен от наблюдения (PSI) и температурните профили на WRF (PSI<sub>w</sub>). Черната пунктирна линия е праговата стойност на PSI за мъгла. Стойността на PSI нараства с настъпването на мъглата на 2 януари, достигайки максимална стойност от 1.22, надвишавайки прага за мъгла от 1.00. Вижда се, че PSI описва много добре началото и разсейването на мъглата, докато PSI<sub>w</sub> има ниски стойности и достига праговата стойност само в 06 UTC на 2 януари. Еквивалентната потенциална температура се използва за характеризирание на въздушната маса над станцията и показва промяната на въздушната маса след 06 UTC

на 3 януари, когато мъглата се разсейва.



Фигура 4.3: (а) Температура (цветно) и (б) относителна влажност (черно-бяло) от WRF за периода 00 UTC на 1 януари до 12 UTC на 2 януари 2013.



Фигура 4.4: PSI изчислен от наблюдения (синя линия), от вертикални температурни профили за Пловдив от модел WRF, изчислена екипотенциална температура (оранжева линия) и отбелязани периоди с мъгла (в сиво). Праговата стойност на PSI е отбелязана с черен пунктир.

### 4.3 Заключение

В тази глава е направена климатология на мъглата в Пловдив за периода 1991 - 2018 г., представяйки: (1) сезонно и денонощно поведение, (2) продължителност и (3) разпределение по хоризонтална видимост. От климатологията може да се заключи, че за Пловдив мъглата е предимно зимно явление с 91.4 % от общите регистрации на мъгла и, че то има добре изразен денонощен ход с максимална честота в 06 UTC. През периода 1991-2018 г. най-много случаи на мъгла са с продължителност от 3 до 6 часа и 53.5 % от наблюденията са за видимост под 200 m. Освен това, от наблюденията за периода 1991-2018 г. се извлича прагова стойност на индекса на устойчивост PSI за условия за образуване на мъгла. Способността на PSI се демонстрира чрез изследване на радиационно-адвективна мъгла в периода 1-3 януари 2013 г. Стойностите на индексът се изчисляват с данни от наблюдения (PSI) и с използването на модела WRF (PSI<sub>w</sub>). PSI<sub>w</sub> има около 10 % по-ниски стойности през нощта и до 40 % по-ниски стойности през деня в сравнение с PSI.

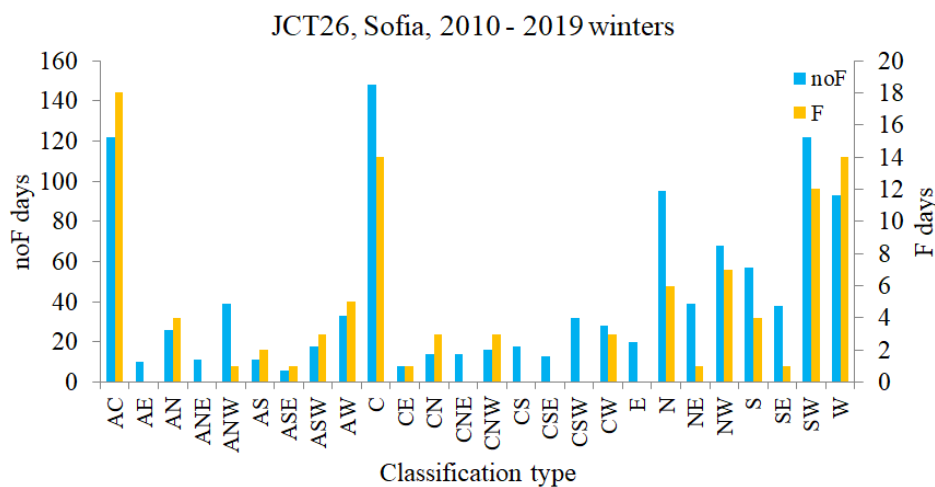
## Глава 5

# Мъгла в София 2010 - 2019

В тази глава е надграден дисертационния труд на д-р А. Стойчева, в която е направена климатологията на мъглата в София, предложен е индекс на устойчивост SSI и е изследвана добавената стойност на използвайки IWV от ГНСС.

### 5.1 Циркулационна класификация 2010 - 2019

Обективната класификация JCT с 26 типа циркулации е изчислена за период от 10 години за дни без мъгла (поF, сини стълбчета на Фигура 5.1) и за дни с мъгла (F, оранжеви стълбчета на Фигура 5.1). Представени във Фигура 5.1 са типовете циркулация F и поF извадките. Шест типа циркулация се отличават с най-много дни с мъгла за периода ноември-февруари: (1) антициклонален (AC) с 18 дни, (2) циклонален (C) с 14, (3) западен (W) с 14, (4) югозападен (SW) с 12, (5) северозападен (NW) с 7 и (6) северен (N) с 6. Както се очаква, типът AC има най-голям принос към образуването на мъгла, тъй като е свързан с безоблачно небе, слаб вятър или безветрие, и нощно радиационно изстиване. Западен и югозападен тип циркулации се свързват с пренос на топъл въздух, което създава условия за голяма температурна инверсия.



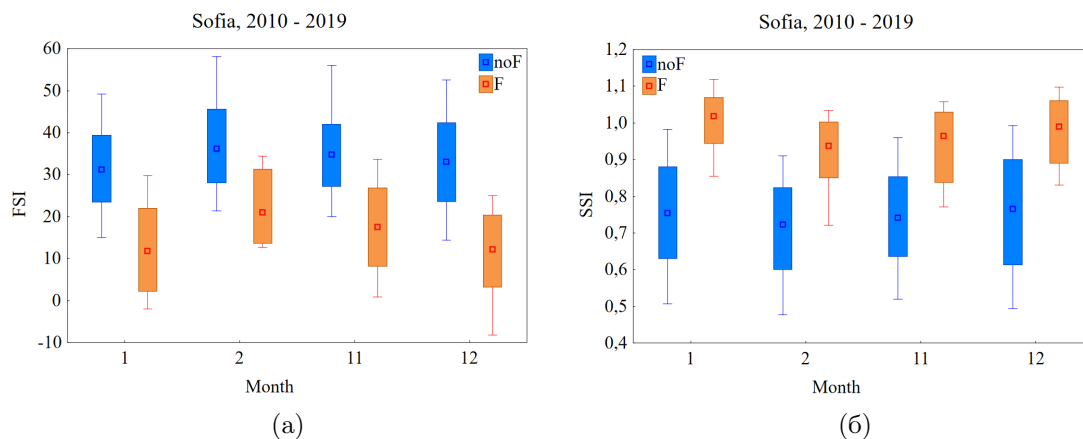
Фигура 5.1: Брой дни с тип JCT26 за зимния период от ноември до февруари, 2010 - 2019 г.

## 5.2 Мъгла в София: FSI, SSI и IWV

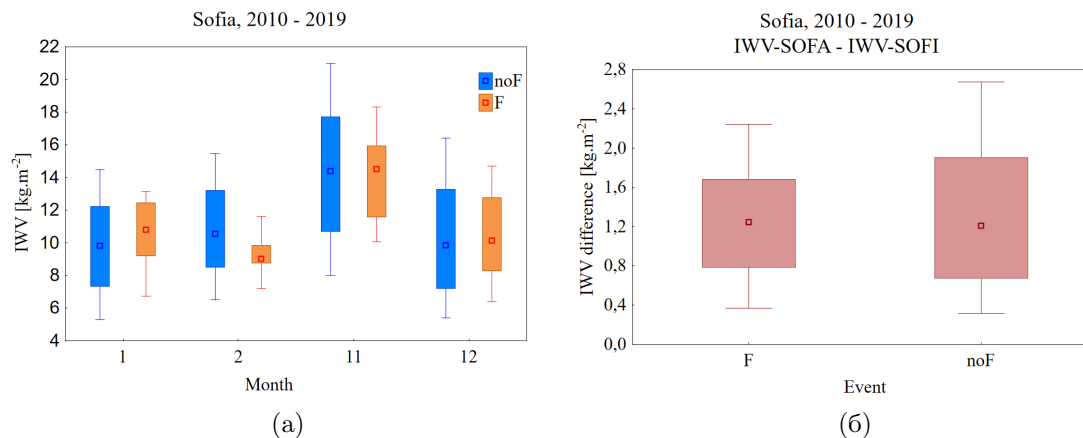
За периода ноември-февруари 2010–2019 г., са изчислени и представени на Фигура 5.2а кватилни диаграми за FSI F и noF извадките. Сравнено с праговите стойности на FSI, индексът има по-ниски стойности спрямо очакваното. Около 50 % от случаите noF имат стойности на FSI под прага от 31. Това може да се дължи на разлика в условията, при които е бил разработен индекса - например при по-слаби инверсии. На месечните кватилни диаграми за SSI представени във Фигура 5.2б е отбелязана праговата стойност за мъгла на използвана от *Stoycheva et al.* (2017) 0.98. Както се вижда във Фигура 5.2б, по-точен подход би бил използването на месечни прагови стойности - например медианите. Причина за това са различните циркулационни условия в синоптичните обстановки през декември и януари, в сравнение с ноември и февруари.

Представени на Фигура 5.3а са месечната кватилна диаграма на IWV за регистрации на мъгла в периода 2010–2019 г. за станция SOFA. На месечна база няма разграничение между стойностите на IWV за F и noF. Началото на мъглата е свързано с трансформацията на IWV в облачни капки, затова се предполага, че стойностите на IWV ще се понижат по времето на образуване на мъгла и ще се повишат при нейното разсейване.





Фигура 5.2: Квартилна диаграма за ноември - февруари за регистрациите с мъгла (F, оранжево) и без мъгла (noF, синьо) за (а) FSI и (б) SSI за периода 2010 - 2019 г.



Фигура 5.3: (а) Квартилна диаграма на IWV за случаи с мъгла (F) и без мъгла (noF) по месеци за периода ноември - февруари 2010 - 2019 година и (б) квартална диаграма на IWV по регистрации с мъгла (F) и без мъгла (noF).

По-малко разсейване на стойностите на IWV за случаите F в сравнение с поF се вижда ясно. Това поведение е очаквано, тъй като по време на мъгла няма промяна във въздушната маса и фазовото състояние на водата. Разликата в IWV между SOFA и SOFI (Фигура 5.3б) също показва незначителна разлика между случаите F и поF.

### 5.3 Оценка на успеваемост и класификационна функция

Крайната цел на тази работа е да се подобри процеса за прогнозиране на мъгла в оперативните центрове в България, като тези за обществените прогнози за времето и авиацията. За тази цел в тази секция са представени резултатите за вероятността за откриване на мъгла с използване на JCT26, FSI, SSI, скорост на вятъра (Wind), относителна влажност (RH) и IWV (IWV). Таблица 5.1 представя POD (вероятност за откриване на мъгла) и FAR (честота на фалшивите аларми) базирани на JCT26 (колона 2), FSI (колона 3) и SSI (колона 4). Скоростта на вятъра (колона 5), относителната влажност (колона 6) и IWV от станцията SOFA (колона 7) се добавят към SSI. Таблица 5.1 показва, че POD при използване на дневните типове циркулация от JCT26 е 60.1%. POD на FSI, изчислен само от наблюдения от 12 UTC е 77.4%, а за SSI POD е 73.7%. С добавянето на скорост на вятъра и относителната влажност към SSI, POD достига 77%. Най-добрият резултат за POD е 77.9%, постигнат с използването на SSI, скорост на вятъра, RH и IWV от станцията в град София. Въпреки това, FAR остава висок - 22.1% (колона 7, ред 2).

	JSCT26	FSI	SSI	SSI+Wind	SSI+Wind+RH	SSI+Wind+RH+IWV
POD	60.1 %	77.4 %	73.7 %	74 %	77 %	77.9 %
FAR	39.9 %	22.6 %	26.3 %	26 %	23 %	22.1 %
CSI	9 %	23 %	9 %	10 %	12 %	14 %
TSS	8 %	57 %	56 %	59 %	74 %	74 %

Таблица 5.1: POD, FAR, CSI и TSS, изчислени за JCT26 (колона 2), FSI (колона 3), SSI (колона 4), SSI и скорост на вятъра (колона 5), SSI, скорост на вятъра и относителна влажност (колона 6), SSI, скорост на вятъра, относителна влажност и IWV (колона 7). Изчисленията са за месеците ноември–февруари за периода 2010–2019 г.

## 5.4 Заключение

В тази глава е използвана обективна типизация на атмосферната циркулация, за да се оценят типовете метеорологично време, които благоприятстват образуването на мъгла в град София. Въпреки че антициклоналната циркулация допринася за най-голямото количество дни с мъгла в София, има още три типа време, които спомагат за формирането на мъглата. Такава количествена класификация не е правена досега и тя може да бъде полезна за оперативните прогнози на мъгла. За да се вземат предвид локалните фактори за образуване на мъгла, бяха оценени два индекса за мъгла. Установено е, че те демонстрират добри умения в откриването на мъгла със съотношение на фалшиви аларми в интервала от 22–26%. Не е установена връзка между IWV и условията за мъгла. Може да се заключи, че прогнозирането на мъгла в София може да се подобри чрез комбиниране на обективна класификация на циркулацията и локално разработени индекси за мъгла. Въпреки това, се изискват допълнителни подобрения на вероятността за откриване на мъгла и на съотношението на фалшивите аларми. Ролята на опита на оперативния прогнозист е безценна за краткосрочната и свръх краткосрочната прогноза на мъгла предвид сложния релеф около град София.

## Глава 6

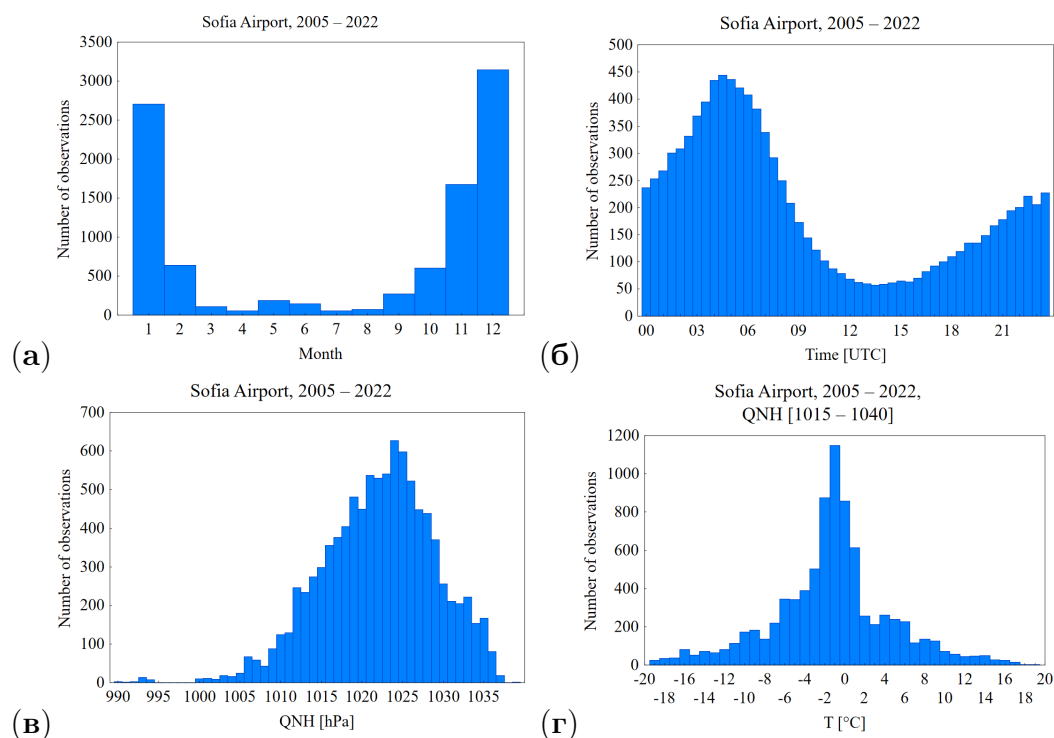
# Оценка на видимост с машинно обучение и невронна мрежа

В тази глава е представена климатологията на мъглата на летище София за 18 годишен период от сведения METAR. Използвани са алгоритъм за машинно обучение Random Forest и невронна мрежа Long Short-Term Memory за оценка на видимостта по 11 входни параметъра. Извършена е последваща обработка на резултатите с цел подобряване на точността на алгоритмите. Получена е оценка за важността на всеки от входните параметри при оценката на видимостта.

### 6.1 Климатология и характеристики на мъглата на летище София

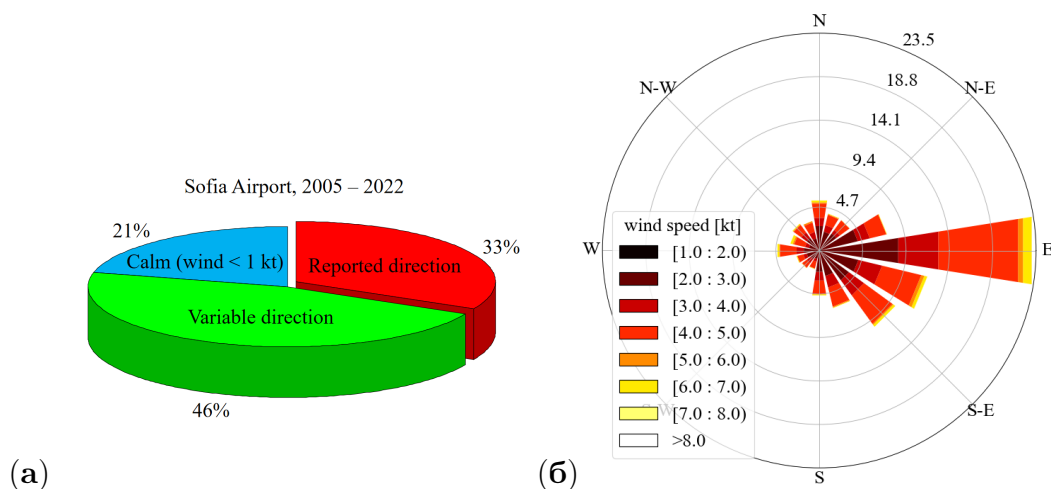
Представено е сезонно разпределение на броят регистрации на мъгла на Фигура 6.1а, което потвърждава, че мъглата се наблюдава най-често през зимата, но се откроява и малък вторичен максимум през месеците май и юни. Този вторичен максимум е свързан с годишния максимум на месечната норма на валежите, които в този период обикновено са конвективни валежи. Денонощното разпределение на наблюденията на мъгла е показано на Фигура 6.1б, където е видно, че максимумът е около 04-05 UTC, т.е. преди изгрева, когато и температурата е най-ниска. Приведеното към морско ниво атмосферно налягане по време на мъгла е високо, с максима-

лен брой регистрации при 1024 hPa (Фигура 6.1в). Въпреки че повечето случаи са при налягане над 1013 hPa, тези при налягане под тази стойност не са незначителни. Фигура 6.1г представя температурите, при които се наблюдава мъгла за налягане в диапазона 1015 - 1040 hPa. Максимумът е при  $-1^{\circ}\text{C}$ , и повечето случаи се групират около него в интервала от  $-6^{\circ}\text{C}$  до  $2^{\circ}\text{C}$ . При температури под  $-6^{\circ}\text{C}$  започва отлагането на лед и честотата на мъгла е по-малка.



Фигура 6.1: Характеристики на мъглата на летище София. (а) Месечно разпределение на броя регистрации на мъгла, (б) денонощно разпределение, (в) разпределение по налягане, и (г) регистрации на мъгла в зависимост от температурата при налягането в интервала 1015-1039 hPa.

Скоростта на вятъра и посоката му са много важни за образуването на мъгла. Фигура 6.2а представя наличието и отсъствието на докладвана посока на вятъра при наблюдавана мъгла. За случаите при определена посока на вятъра роза на вятъра е представена на Фигура 6.2б. Преобладаващата посока е от изток-югоизток, а скоростта на вятъра е предимно под 5 kt (2.5 m/s).



Фигура 6.2: (а) Разпределение на наблюденията при наблюдавана мъгла с докладвана посока на вятъра (червен цвят), с променлива посока (зелен цвят) и при тихо време (син цвят). (б) Роза на вятъра при мъгла.

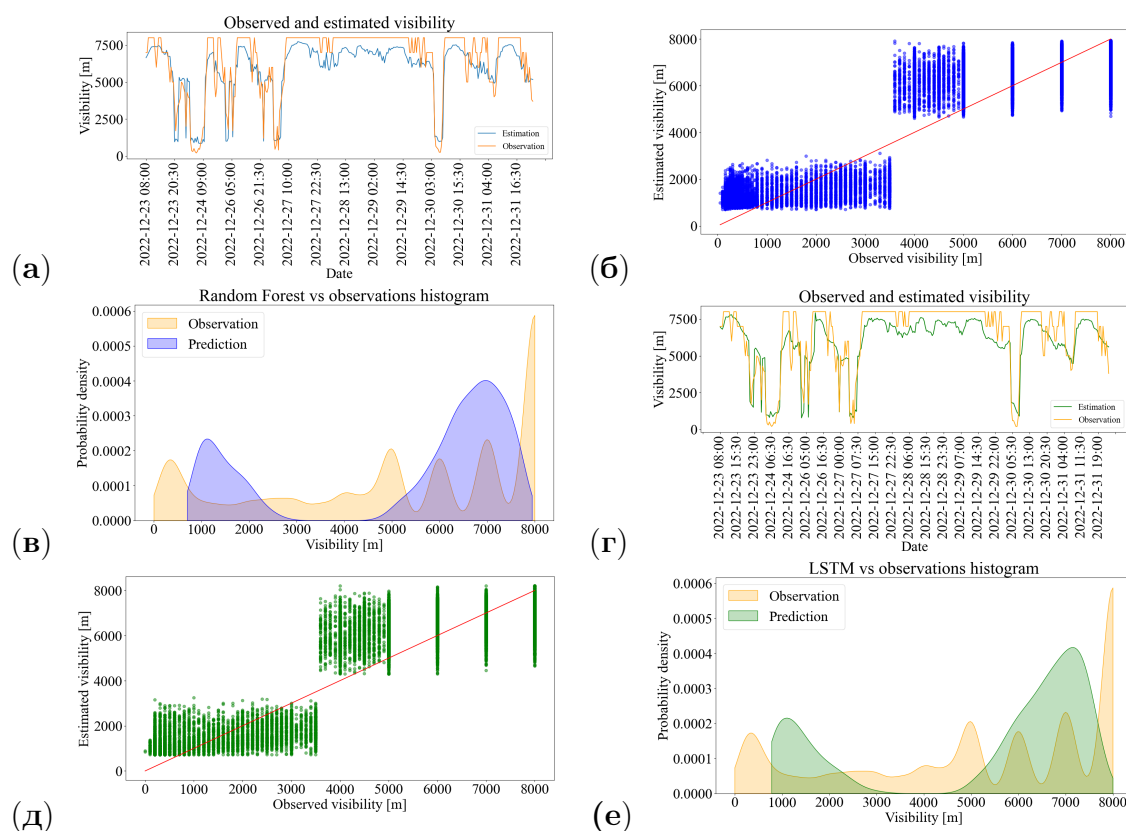
## 6.2 Оценка на видимост с машинно обучение и невронна мрежа

За прогнозиране на видимост се използват алгоритъм за машинно обучение RF и невронна мрежа LSTM. Входните параметри за единадесет, като данните са разделени на 70% за обучение и 30% за тест.

### 6.2.1 Корекция на оценката на видимостта и успеваемостта

Както положителните, така и отрицателните отклонения са добре известни проблеми при оценката на видимост (*Kim et al. (2022)*). За да се намалят тези отклонения, се извършва двойна корекция на резултатите от RF и LSTM с линейна функция (*Kim et al. (2021)*). Данните са разделени на две части - видимост под и над 3500 m. Чрез прилагане на различни корекции за случаите с наблюдавана видимост под и над 3500 m, отклонението се намалява значително и както се вижда от сравнението на стойностите на Фигура 6.3а и Фигура 6.3г. След обработката, графиката на отношени-

ето между оценка и наблюдение (Фигура 6.3б,д) показва, че ще има бърза промяна в стойностите, когато се премине през 3500 m. Тази стъпаловидна промяна съответства на наблюдаваната бърза промяна на видимостта при формирането и разсейването на мъгла. Диаграмите на плътността на вероятността (Фигура 6.3в,е) показват, че оценките са изместени и групирани в две отделни области с ниска и висока видимост, което съвпада по-точно с наблюдаваните стойности.



Фигура 6.3: Оценки на видимост от (а) RF и (г) LSTM след корекция. Връзка между оценки и наблюдения след корекция за RF (б) и LSTM (д). Червената линия показва точно съвпадение. (в) и (е) Диаграми на плътността на вероятността след корекция на видимостта.

## 6.2.2 Оценка по значимост на параметрите в RF

RF дава възможност за оценка на значимостта на използваните в обучението параметри. Най-важният параметър с 34% е FSI, последван от

дефицита на точката на оросяване с 23%. *Choi et al. (2022)* установяват че относителната влажност е най-важен входен параметър за оценката на видимост според RF. Този резултат е очакван, тъй като без насищане на водната пара, образуването на мъгла е невъзможно, независимо от другите параметри. Височина на долната граница на облачността е третият по важност параметър (11%) а температурата на въздуха е четвърти следван от скоростта и посоката на вятъра. Въпреки че според алгоритъма посоката на вятъра, налягането, часа и количеството облаци не са важни параметри, те оказват влияние в образуването на мъгла, но тяхната роля остава малка, вероятно поради ансамбловия механизъм на алгоритъма. Например, наличието или липсата на облачност определя до каква степен ще се понижи температурата на въздуха и дали ще се стигне до насищане на водната пара. В същото време повечето случаи на мъгла се случват при ясно небе.

### 6.3 Заключение

В тази глава е представено изследване на 1) характеристиките на мъглата на летище София за периода 2005 - 2022 чрез данни от сведения METAR и 2) способността на два алгоритъма за машинно обучение за оценка на видимост. Основните характеристики на мъглата се изучават за първи път за най-натовареното летище в България. Мъглата се образува главно през есента и зимата, но има и вторичен пик през май и юни. Мнозинството от регистрации на мъгла са при температура между  $-6$  и  $2^{\circ}$  C и високо налягане, с максимален брой регистрации при 1024 hPa. В изследвания период се наблюдава ясна тенденция за намаляване честотата на мъгла, като максимумът в честотата се измества към по-високи стойности на видимостта. Двата алгоритъма за машинно обучение (RF и LSTM) са използвани с цел оценка на видимостта на база 11 метеорологични параметра. И двата алгоритъма постигат сравнима точност в откриването на тенденциите на промяна на видимостта, но се наблюдава положително отклонение при видимост под 2500-3000 m и отрицателно при видимост над 5000 m.



## Глава 7

# Приложение в оперативната дейност

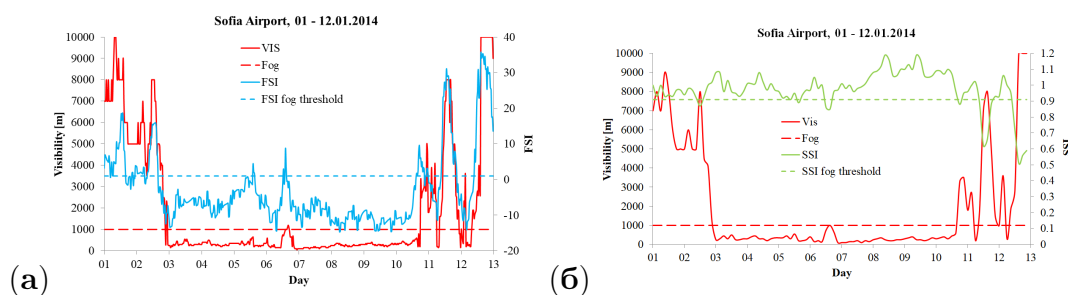
В тази глава са представени приложения на подходите за прогноза и диагноза на мъгла, използвани в Глава 4, Глава 5 и Глава 6. Описан е механизмът на работа на разработеното уеб приложение за данни за интегрираната водна пара (IWV) получена от Глобалните навигационни спътникови системи (ГНСС) и демонстриран в случаи на мъгла. Разгледани са два периода с мъгли на летище София - първият с продължителна мъгла през януари 2014 г., а вторият е със серия от кратки мъгли в края на 2021 и началото на 2022 г. Сравнени са резултатите от числени експерименти с измервания AMDAR и аерологичен сондаж. Приложен е анализ чрез двата индекса на устойчивост FSI и SSI и е представена оценка на видимостта чрез машинно обучение.

### 7.1 Продължителна мъгла в София 2014 г.

Полезността на използваните методи е проверена чрез анализ на обстановки с мъгла. Първият случай е на продължителна мъгла в периода 3 - 10 януари 2014 г. В този период Балканският полуостров и в частност България са в зона на слабо градиентно антициклонално барично поле, което благоприятства образуването на температурни инверсии.

Индексите на устойчивост FSI и SSI за периода 1 - 13 януари 2014 г. са

представени на Фигура 7.1. Двата индекса са в противофаза, т.е. при мъгла FSI има ниски стойности, а SSI високи. На Фигура 7.1а FSI много добре описва промяната във видимостта като практически за всяка докладвана видимост под 1000 m, индексът е със стойност под праговата за мъгла. На Фигура 7.1б SSI също добре описва периода с мъгла въпреки по-малката си разрешаваща способност по времето.



Фигура 7.1: FSI (а) и SSI (б) за летище София. С червен пунктир е отбелязано нивото на видимост 1000 m, а със син и зелен пунктир са отбелязани праговите стойности при мъгла за FSI и SSI съответно.

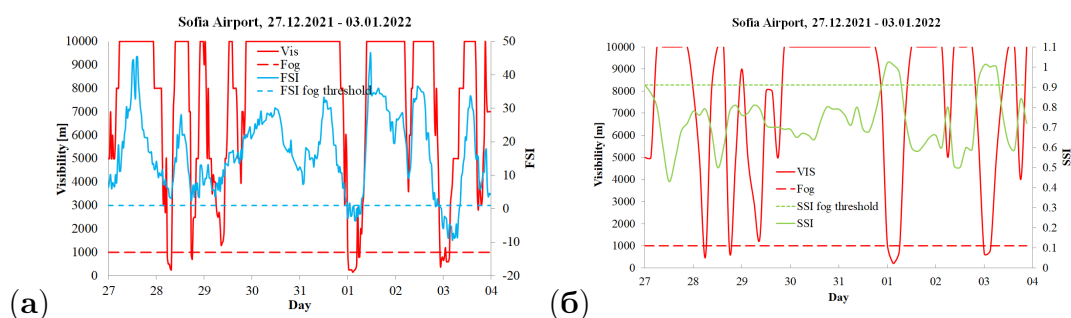
## 7.2 ГНСС демонстратор за мъгла

За да бъдат използвани оперативно данните за IWV, те трябва да бъдат лесно достъпни. За целта беше разработен ГНСС демонстратор за мъгла. Реализацията на демонстратора е осъществена в 7 основни стъпки. Първата стъпка е обработка на ГНСС наблюденията, втората е пресмятане на числен модел WRF, третата стъпка е използване на метода ГНСС метеорология за изчисляване на IWV в реално време, четвъртата стъпка е пресмятане на IWV от численият модел (IWV+), петата стъпка е определяне на прагови стойности на IWV за мъгла, шестата стъпка е валидиране на демонстратора за 2021/2022 г. и последната стъпка е интернет страница, на която се визуализират IWV получена от ГНСС и от числен модел WRF (*SUADA*).

### 7.3 Мъгла на летище София 2021/2022 г.

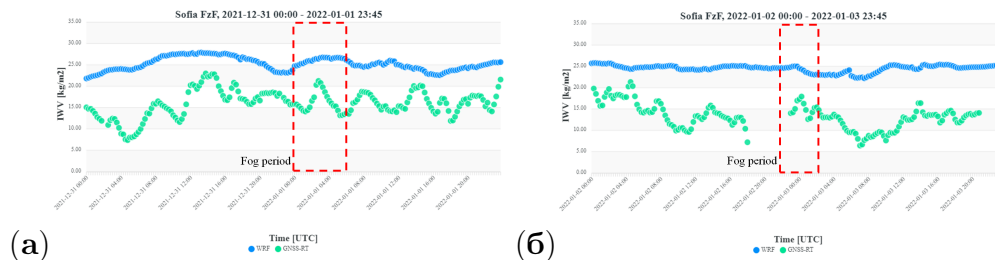
Вторият разглеждан период е с продължителност от 8 дни в интервала 27 декември 2021 - 03 януари 2022 г. В този случай България се намира в зона на слабо градиентно циклонално барично поле с пренос на топъл въздух от запад-югозапад. В нощните часове се образуват температурни инверсии, които към обяд се разрушават. В периода 30 - 31 декември страната попада под влияние на средиземноморски циклон, преминаващ южно от страната, което води до пренос на по-студен въздух на изобарно ниво 850 hPa, което възпрепятства образуването на мощни температурни инверсии и съответно мъгла. В оставащата част от периода Балканите са под влияние на обширен антициклон, който обхваща почти цяла Европа. Промяна настъпва само на 02 януари заради преминаваща фронтална система северно от страната.

Съответствието между двата индекса и видимостта за летище София е представено на Фигура 7.2а за FSI и Фигура 7.2б за SSI. По време на двете краткотрайни мъгли на 28 декември с продължителност 2 часа и половина и 1 час, и двата индекса не преминават праговите си стойности за мъгла, макар FSI да е много близо до своята прагова стойност. При продължилата 5 часа мъгла на 01 януари и при продължилата 4 часа мъгла на 03 януари и двата индекса преминават праговите си стойности, застъпвайки много точно периодите с видимост под 1000 m.



Фигура 7.2: FSI (а) и SSI (б) за периода 27.12.2021 - 03.01.2022 за летище София. Видимостта е с червена линия, с червен пунктир е отбелязано ниво 1000 m. Със син и зелен пунктир са отбелязани праговите стойности за мъгла на FSI и SSI съответно.

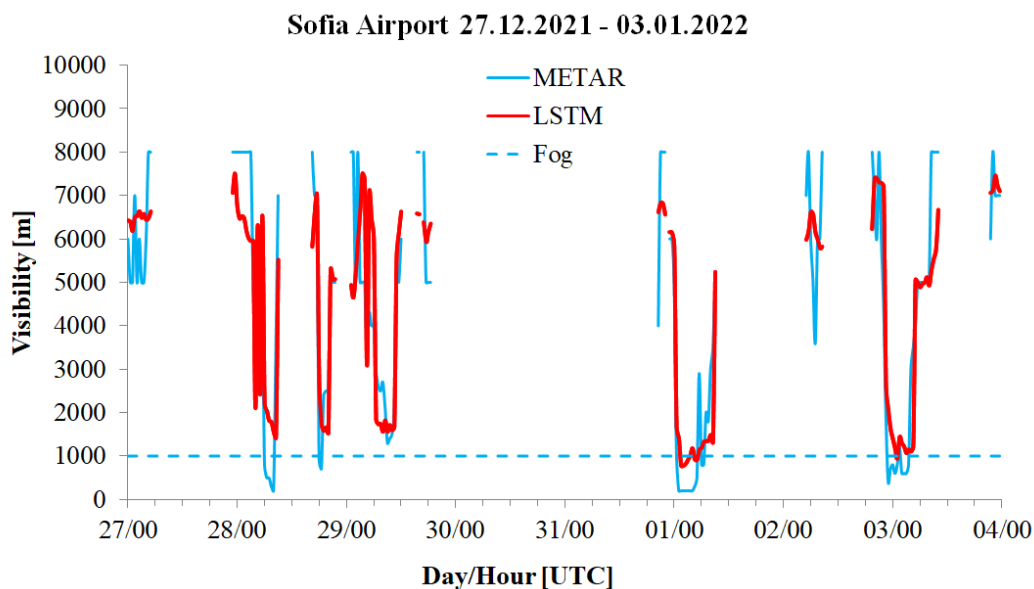
В процеса на образуване и разсейване на мъгла водната пара претърпява фазов преход, което води до промяна в нейното количество. Фигура 7.3а представя IWV от уеб приложението FOGDEMO за периода 31 декември 2021 - 01 януари 2022. Преди и по време на мъглата (от 0100 UTC до 0630 UTC на 01 януари 2022) на летище София не се наблюдава понижение на IWV от числен модел WRF, и от ГНСС измервания. Същото се наблюдава и при втория случай на мъгла на 02 - 03 януари (от 2300 UTC на 02 януари до 0330 UTC на 03 януари) (Фигура 7.3б). Това се дължи на факта, че за изследваните периоди мъгла се формира само локално на летище София но не е наблюдавана в станция София НИМХ, която е на по-голяма надморска височина. Същото важи и за ГНСС станцията на Физически факултет. Това ясно показва, че използването на ГНСС наблюдения за диагноза и прогноза на мъгла на летище София, изисква станцията да бъде в непосредствена близост до летището. В допълнение, следва да се отбележи че от Фигура 7.3 ясно се отличават разликите в денонощният ход на IWV и IWV+.



Фигура 7.3: IWV от ГНСС и WRF за София.

С оглед на перспективата в използването на машинно обучение за изготвяне на свръхкраткосрочна прогноза за мъгла, на Фигура 7.4 са представени резултатите от оценката на видимостта от невронна мрежа LSTM за периода 27 декември 2021 - 03 януари 2022. Прекъсванията на графиката са при видимост над 8000 m. Вижда се, че невронната мрежа проследява много добре промяната на видимостта, но и я завишава по време на мъгла. Този резултат е в съответствие с получените резултати в Глава 6.2.1. Предимството в използването на машинно обучение е в това, че алгоритъма се обучава изцяло от местните условия и по този начин отчита процеси, които остават неотчетени от числения модел. Дори краткотрайни пониже-

ния на видимостта като това в периода 1800 - 1830 UTC на 28 декември са отчетени от невронната мрежа.



Фигура 7.4: Видимост по METAR и оценка от невронна мрежа LSTM за периода 27 декември 2021 - 3 януари 2022 за летище София.

## 7.4 Заключение

В тази глава са демонстрирани способностите за откриване и прогнозиране на мъгла на няколко метода: числен модел WRF, индекси на устойчивост FSI и SSI, IWV и машинно обучение. Демонстрирана е ползата от използване на вертикални температурни профили от измервания в полет на въздухоплавателни средства. Описано е разработеното уеб приложение за визуализация на IWV, получена от числен модел и от наземни ГНСС приемници. Резултатите показват недвусмислено, че е необходимо използване на набор от методи при изготвяне на свръхкраткосрочна прогноза на мъгла. Числените модели, вертикалните температурни профили от измервания, индексите на устойчивост и машинното обучение компенсират взаимно своите несъвършенства и по този начин формират съвременния подход за прогнозиране на намалена видимост и мъгла.

## Глава 8

# Научни приноси, публикации и представяне на резултати по дисертацията

### 8.1 Научни приноси

Получените приноси в дисертационния труд са от научно-приложен характер. Тук са надградени резултатите в дисертационните трудове на Илиян Манафов и Анастасия Стойчева, които поставят началото на изследванията на мъгла с числен модел и с индекс на устойчивост.

- Модификация и статистическа оценка на индекс за мъгла в Пловдив. Установява се, че индексът притежава статистически разграничима оценка за явленията, водещи до намалена или ниска видимост.
- Статистическа оценка на два индекса за мъгла в София (SSI и FSI). Установено е, че вероятността за диагностициране на мъгла с SSI е 73.7%. Добавянето на скорост на вятъра, относителна влажност и интегрирана водна пара към SSI повишава вероятността до 77.9%. Вероятността за диагностициране на мъгла с FSI е 77.4%.
- Обективна типизация на атмосферната циркулация при мъгла в София. Установено е, че мъгла най-често се наблюдава при: (1) антициклонален тип време, (2) циклонален тип време и (3) при слаб

западен/югозападен поток. Получените резултати са от интерес в оперативната диагноза и прогноза на опасни явления.

- Разработване и тестване на модел за оценка на видимостта на летище София чрез алгоритъм за машинно обучение и невронна мрежа. Алгоритмите за машинно обучение показват много добра способност за откриване на нелинейните процеси при образуване и разсейване на мъгла. Установено е положително отклонение в оценките на алгоритмите при стойности на видимостта под 2500-3000 m.
- Разработен е уеб-базиран демонстратор за мъгла с ГНСС тропосферни продукти. Данните в реално време за интегрираната водна пара могат да бъде използвана за следене фазите от развитието на мъгла в района на ГНСС приемниците.

## 8.2 Публикации по дисертацията

### 8.2.1 Публикации в списания

1. **Penov, N.**; Guerova, G.; Stoycheva, A. Fog Climatology and Stability Index for Plovdiv 1991–2018. *C. R. Acad. Bulg. Sci.* 2022, 75, 1156-1164.
2. **Penov, N.**; Stoycheva, A.; Guerova, G. Fog in Sofia 2010–2019: Objective Circulation Classification and Fog Indices. *Atmosphere* 2023, 14, 773. <https://doi.org/10.3390/atmos14050773>.
3. **Penov, N.**; Guerova, G. Sofia Airport Visibility Estimation with Two Machine-Learning Techniques. *Remote Sens.* 2023, 15, 4799. <https://doi.org/10.3390/rs15194799>.

### 8.2.2 Публикации в разширен текст на научни форуми

1. Stoycheva A., **N. Penov** and G. Guerova, "Investigation of fog in Bulgaria using GNSS tropospheric products", in COST Action ES1206: Advanced Global Navigation Satellite Systems tropospheric products for monitoring

severe weather events and climate, Jones et al. [editors], Springer [publisher], 2020, 206-210, doi:10.1007/978-3-030-13901-8\_4

### 8.3 Представяне на резултатите

1. **Penov N.**, A. Stoycheva, I. Manafiov, K. Vassileva, and G. Guerova "NWP simulations of three fog cases at Sofia and Plovdiv airports", EGU 7 - 12/04/2019 Vienna Austria. (poster)
2. **Penov N.**, "Numerical simulations of three fog cases in Sofia and Plovdiv", Physics and chemistry of the Earth System training seminar, 1/06/2019 Varshets Bulgaria. (oral)
3. **Penov N.**, "Fog monitoring with GNSS and NWP", 1st colloquium GNSS applications in the BalkanMed region, 30 - 31/01/2020 Sofia Bulgaria. (oral)
4. **Penov N.**, A. Stoycheva and G. Guerova "Fog climatology and stability index for Plovdiv 1991-2018", EMS Annual Meeting 2021, online, 6 - 10/09/2021. (poster)
5. **Penov N.**, A. Stoycheva, J. Dousa, P. Vaclavovic and G. Guerova "GNSS Fog nowcasting demonstrator for Sofia", 8th International Colloquium Scientific and Fundamental Aspects of GNSS, 14 - 16/09/2022, Sofia, Bulgaria. (oral)



# Библиография

- StatSoft Inc. *STATISTICA (Data Analysis Software System)*, 6th ed., Tulsa, OK, USA, 2001; p. 150., Available online: [www.statsoft.com](http://www.statsoft.com), accessed on 23 April 2023.
- Arun, S., S. Chaurasia, A. Misra, and R. Kumar, Fog stability index: A novel technique for fog/low clouds detection using multi-satellites data over the indo-gangetic plains during winter season, *International Journal of Remote Sensing*, 39(22), 8200–8218, 2018.
- Bari, D., T. Bergot, and R. Tardif, Fog decision support systems: A review of the current perspectives, *Atmosphere*, 14(8), 1314, 2023.
- Belo-Pereira, M., and J. Santos, A persistent wintertime fog episode at lisbon airport (portugal): Performance of ecmwf and arome models, *Meteorological Applications*, 23(3), 353–370, 2016.
- Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, and R. H. Ware, GPS Meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapour using the Global Positioning System, *J. Geophys. Res.*, 97(14), 15,787–15,801, 1992.
- Blewitt, G., W. C. Hammond, and C. Kreemer, Harnessing the gps data explosion for interdisciplinary science, *Eos*, 99(10.1029), 485, 2018.
- Boutle, I., et al., Demistify: a large-eddy simulation (les) and single-column model (scm) intercomparison of radiation fog, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(1), 319–333, 2022.
- Breiman, L., Random forests, *Machine learning*, 45, 5–32, 2001.
- Byun, S. H., and Y. E. Bar-Sever, A new type of troposphere zenith path delay product of the international gnss service, *Journal of Geodesy*, 83(3-4), 1–7, 2009.
- Castillo-Botón, C., D. Casillas-Pérez, C. Casanova-Mateo, S. Ghimire, E. Cerro-Prada, P. Gutierrez, R. Deo, and S. Salcedo-Sanz, Machine learning regression and classification methods for fog events prediction, *Atmospheric Research*, 272, 106,157, 2022.

- Choi, W., J. Park, D. Kim, J. Park, S. Kim, and H. Lee, Development of two-dimensional visibility estimation model using machine learning: Preliminary results for south korea, *Atmosphere*, *13*(8), 1233, 2022.
- Davis, J., T. Herring, I. Shapiro, A. Rogers, and G. Elgered, Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length, *Radio science*, *20*(6), 1593–1607, 1985.
- Efron, B., Bootstrap methods: another look at the jackknife *Annals of statistics* 7: 1–26, *View Article PubMed/NCBI Google Scholar*, *24*, 1979.
- Egli, S., B. Thies, and J. Bendix, A spatially explicit and temporally highly resolved analysis of variations in fog occurrence over europe, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *145*(721), 1721–1740, 2019.
- Gultepe, I., et al., A review of high impact weather for aviation meteorology, *Pure and applied geophysics*, *176*, 1869–1921, 2019.
- Hochreiter, S., and J. Schmidhuber, Long short-term memory, *Neural computation*, *9*(8), 1735–1780, 1997.
- Holtzlag, M. C., G. J. Steeneveld, and A. A. Holtzlag, Fog forecasting: "old fashioned" semi-empirical methods from radio sounding observations versus "modern" numerical models, in *Proc. 5th Int. Conf. Fog and Dew (FOGDEW2010)*, pp. 25–30, 2010.
- Huberty, C. J., Discriminant analysis, *Review of Educational Research*, *45*(4), 543–598, 1975.
- Kim, B.-Y., J. W. Cha, K.-H. Chang, and C. Lee, Visibility prediction over south korea based on random forest, *Atmosphere*, *12*(5), 552, 2021.
- Kim, J., S. H. Kim, H. W. Seo, Y. V. Wang, and Y. G. Lee, Meteorological characteristics of fog events in korean smart cities and machine learning based visibility estimation, *Atmospheric Research*, *275*, 106,239, 2022.
- Klemm, O., N. Lin, et al., What causes observed fog trends: air quality or climate change?, *Aerosol and Air Quality Research*, *16*(5), 1131–1142, 2016.
- Lee, J., J.-U. Park, J. Cho, J. Baek, and H. W. Kim, A characteristic analysis of fog using gps-derived integrated water vapour, *Meteorological Applications*, *17*(4), 463–473, 2010.
- Manafov, I., Прогноза на мъгла за района на летище София, accessed on 01 November 2023, 2017.
- Philipp, A., C. Beck, R. Huth, and J. Jacobeit, Development and comparison of circulation type classifications using the cost 733 dataset and software, *International Journal of Climatology*, *36*(7), 2673–2691, 2016.

- Post, P., V. Truija, and J. Tuulik, Circulation weather types and their influence on temperature and precipitation in estonia, *Boreal environment research*, 7(3), 281–289, 2002.
- Rebischung, P., J. Griffiths, J. Ray, R. Schmid, X. Collilieux, and B. Garayt, Igs08: the igs realization of itrft2008, *GPS solutions*, 16(4), 483–494, 2012.
- Román-Cascón, C., C. Yagüe, M. Sastre, G. Maqueda, F. Salamanca, and S. Viana, Observations and wrf simulations of fog events at the spanish northern plateau, *Advances in Science and Research*, 8(1), 11–18, 2012.
- Schultz, M., S. Reitmann, and S. Alam, Predictive classification and understanding of weather impact on airport performance through machine learning, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 131, 103,119, 2021.
- Skamarock, W. C., J. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X. Y. Huang, W. Wang, and J. Powers, A description of the advanced research wrf version 3, accessed: 2016-12-06, 2008.
- Song, Y., and S. S. Yum, Development and verification of the fog stability index for incheon international airport based on the measured fog characteristics, *Atmosphere*, 23(4), 443–452, 2013.
- Steenefeld, G., R. Ronda, and A. Holtslag, The challenge of forecasting the onset and development of radiation fog using mesoscale atmospheric models, *Boundary-Layer Meteorology*, 154, 265–289, 2015.
- Steenefeld, G.-J., and M. de Bode, Unravelling the relative roles of physical processes in modelling the life cycle of a warm radiation fog, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144(714), 1539–1554, 2018.
- Stoev, K., P. Post, and G. Guerova, Synoptic circulation patterns associated with foehn days in Sofia: 1979-2014, *Idojárás/Quarterly journal of the Hungarian meteorological service*, 126(4), 1–6, 2022.
- Stoycheva, A., Мъглата в София през периода 1992 – 2014 година, accessed on 29 October 2023, 2015.
- Stoycheva, A., and S. Evtimov, Studying the fogs in sofia with cherni vrah-sofia stability index, *Bulgarian Geophysical Journal*, 40, 23–32, 2014.
- Stoycheva, A., I. Manafov, K. Vassileva, and G. Guerova, Study of persistent fog in bulgaria with sofia stability index, gnss tropospheric products and wrf simulations, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 161, 160–169, 2017.

SUADA, Fog nowcast demonstrator, online; accessed on 23-October-2023.

Topuzova, E., Short-term forecast of hazardous weather events in aviation, accessed on 01 November 2023, 2017.

Vautard, R., P. Yiou, and G. J. Van Oldenborgh, Decline of fog, mist and haze in europe over the past 30 years, *Nature Geoscience*, 2(2), 115–119, 2009.