

5. Zastosowanie aplikacji EddyPro[®] (LI-COR, USA)¹ do obliczania turbulentnych strumieni masy i energii z zastosowaniem metody kowariancji wirów (na przykładzie pomiarów w Kopytkowie na terenie Biebrzańskiego Parku Narodowego)

Włodzimierz Pawlak², Krzysztof Fortuniak²

Streszczenie

W rozdziale skoncentrowano się na problemie obliczania strumieni turbulentnych masy i energii oraz procedurach obliczeniowych stosowanych w przypadku danych o fluktuacji gazów cieplarnianych zmierzonych za pomocą czujników wyposażonych w otwartą ścieżkę pomiarową. Omówiono najpopularniejszą obecnie, ogólnie dostępną aplikację EddyPro[®] firmy LI-COR (USA) i na przykładzie jej działania przybliżono szeroką gamę problemów, jakie można napotkać podczas wyznaczania strumieni turbulentnych. Szczegółowo opisano zalety programu, omówiono sposób importowania danych, przybliżono kolejne kroki postępowania, ekspresowy i zaawansowany tryb działania oraz sposób zapisu danych. Na podstawie wybranych fragmentów pomiarów przeprowadzonych w Kopytkowie (Biebrzański Park Narodowy) scharakteryzowano wybrane problemy związane ze stosowaniem procedur i poprawek rozwiązywanych różnymi metodami.

Słowa kluczowe: strumień turbulentny, metoda kowariancji wirów, metodyka obliczeń

5.1. Wstęp

Prawidłowy pomiar turbulentnych strumieni ciepła i gazów cieplarnianych jest jednym z kluczowych problemów obecnej meteorologii i klimatologii. Dane tego typu, jak zostało to wspomniane w rozdziale 3, są niezbędne do dalszych badań nad zmianami bilansu radiacyjnego Ziemi, zmianami klimatu czy jako dane wejściowe modeli pracujących w różnych skalach czasowych i przestrzennych. Uznawana dzisiaj za standardową metoda kowariancji wirów (Baldocchi, 2013, 2014) pozwala na pozyskiwanie szczegółowych danych o turbulentnej wymianie energii i gazów cieplarnianych między podłożem a atmosferą. Jedną z zalet metody jest możliwość prowadzenia długookresowych, wieloletnich pomiarów, w trakcie których wyniki nie odnoszą się do punktu w przestrzeni, a opisują wymianę ciepła jawnego, utajonego czy gazów cieplarnianych między atmosferą a różnego rodzaju ekosystemami (Aubinet i in., 2012). Efektem obserwowanej w ostatnich 20 latach intensyfikacji kampanii pomiarowych jest duża liczba serii pomiarowych zarejestrowanych na obszarach w różnym stopniu przekształconych przez człowieka, od obszarów naturalnych, położonych zarówno w strefie międzyzwrotnikowej, jak i umiarkowanej, a nawet polarnej,

¹ Nazwa i logo EddyPro[®] jest własnością LI-COR, Inc. (USA)

² Katedra Meteorologii i Klimatologii, Wydział Nauk Geograficznych, Uniwersytet Łódzki, ul. Narutowicza 88, 90-139 Łódź, e-mail: wpawlak@uni.lodz.pl, kfortun@uni.lodz.pl

przez obszary rolnicze, takie jak pola uprawne, sady czy pola ryżowe, czy tereny zurbanizowane, które co prawda zajmują niewielki odsetek powierzchni lądów, ale są istotnymi źródłami gazów cieplarnianych dla atmosfery (Aubinet i in., 2012; Ciais i in., 2013). Liczba prowadzonych kampanii pomiarowych, mimo iż ciągle się powiększa, jest jednak wciąż zbyt mała, co dotyczy zwłaszcza obszarów o niewielkim zaludnieniu, obszarów o skrajnych klimatach oraz terenów zurbanizowanych (Baldocchi i in., 2001; Baldocchi 2003). Głównym problemem powodującym ograniczenie w szerokiej stosowalności metody kowariancji wirów są szeroko pojęte problemy logistyczne, od wysokiej ceny stanowiska pomiarowego, konieczności stosowania przyrządów rejestrujących fluktuacje badanych parametrów (temperatury powietrza, pionowej prędkości wiatru, koncentracji gazów cieplarnianych itd.) z częstotliwością co najmniej 10 Hz, przez doprowadzenie prądu do stanowiska pomiarowego, często umieszczonego na odludnym lub, jak w Kopytkowie w Biebrzańskim Parku Narodowym, podmokłym terenie, oraz konieczność pracy na ogromnych bazach danych. W trakcie upowszechniania się metody kowariancji wirów pojawił się jeszcze jeden problem, który na obecnym etapie jej rozwoju należy traktować jako jeden z ważniejszych. Pomimo iż podstawową ideą metody jest wyznaczanie strumieni turbulencyjnych jako kowariancji między fluktuacjami pionowej składowej prędkości wiatru oraz badanego parametru (temperatury, wilgotności powietrza, koncentracji H_2O , CO_2 , CH_4 , itd.), konieczne jest stosowanie różnego rodzaju poprawek i procedur korygujących uzyskany wynik (Stull, 1988; Lee i in., 2004; Foken, 2008; Fortuniak, 2010; Aubinet i in., 2012; Burba 2013). Czynności te powinny być przeprowadzone we właściwej kolejności oraz wymagają znajomości co najmniej podstawowych wiadomości dotyczących metody kowariancji wirów. Dodatkowym problemem jest fakt, że w ostatnich latach zaproponowano wiele, często odmiennych rozwiązań poprawek i procedur stosowanych do korygowania wartości strumieni masy i energii. Różne grupy badawcze stosują je w subiektywny sposób, co stawia pod znakiem zapytania porównywalność wyników. W początkowej fazie szerokiego stosowania metody kowariancji wirów, kiedy wyznaczano przede wszystkim strumienie ciepła jawnego i utajonego, grupy badawcze wyliczały strumienie za pomocą autorskich programów obliczeniowych z zastosowaniem popularnych środowisk programistycznych, takich jak np. Fortran czy Matlab. W pierwszym dziesięcioleciu XXI wieku, kiedy pomiary rozszerzono o wymianę gazów cieplarnianych, pojawiły się pierwsze pakiety obliczeniowe, których zadaniem miało być uproszczenie, a przede wszystkim unifikacja, metodyki obliczeniowej strumieni turbulencyjnych. Pakiety te, takie jak TK2 (Bayreuth University, Mauder i Foken, 2011), Alteddy (ALTERRA Institute, Wageningen), ECPack (Wageningen University), EddySoft (Max-Planck-Institute for Biogeochemistry, Jena), EdiRE (University of Edinburgh), eth-flux (ETH Zurich) czy TUDD (University of Technology, Dresden), realizowały powyższe założenia często jedynie w ograniczonym stopniu (Foken, 2008; Mauder i in., 2007, 2008; Fratini i Muder, 2014). Tylko niektóre z nich umożliwiały import danych z szerokiej gamy anemometrów ultradźwiękowych, w różny sposób traktowały zagadnienie rotacji współrzędnych wiatru, strat spektralnych oraz kontroli jakości danych. Niektóre z nich, jak na przykład pakiety eth-flux czy TUDD, dedykowane były tylko do konkretnego zestawu przyrządów pomiarowych. Obecnie najczęściej stosowanym programem wyliczającym strumienie turbulencyjne w sposób zautomatyzowany jest udostępniany na licencji GPL EddyPro[®] (LICOR, USA), a jego głównymi zaletami są uniwersalność

(obsługuje szeroką gamę przyrządów, działa dla systemów z otwartą i zamkniętą ścieżką pomiarową – Burba i in., 2012), może pracować bezpośrednio na stanowisku w czasie rzeczywistym oraz fakt, że jest to aplikacja regularnie poprawiana i uaktualniana (w drugiej połowie 2015 roku udostępniono wersję 6.0).

EddyPro® jest obecnie zdecydowanie najczęściej wykorzystywanym programem służącym do wyliczania strumieni turbulencyjnych masy i energii co powoduje, że jego stosowanie uznaje się dziś za swego rodzaju standard. Nie znaczy to jednak, że jest to aplikacja zapewniająca pełną automatyzację obliczeń, a szczegóły dotyczące przeprowadzonych pomiarów oraz co najmniej podstawowa wiedza o metodzie kowariancji wirów oraz turbulencyjnym transporcie w atmosferze wciąż jest niezbędna. EddyPro® jest ponadto programem bardzo rozbudowanym, dlatego w rozdziale tym przedstawione zostanie jego działanie, od typów konfiguracji i sposobu importu danych, przez dobór odpowiednich poprawek, po charakterystykę danych w plikach wyjściowych. Powyższe zagadnienia zilustrowane zostały wynikami obliczeń przeprowadzonych z pomocą EddyPro®, w których wykorzystano dane zarejestrowane na stacji pomiarowej wymiany energii i gazów cieplarnianych między terenem podmokłym a atmosferą, funkcjonującej od jesieni 2012 roku w Kopytkowie na terenie Biebrzańskiego Parku Narodowego. Wybrane wyniki porównano z wynikami uzyskanymi podczas obliczeń strumieni turbulencyjnych masy i energii zrealizowanych przy pomocy autorskiego oprogramowania, stworzonego w języku Fortran przez autorów rozdziału.

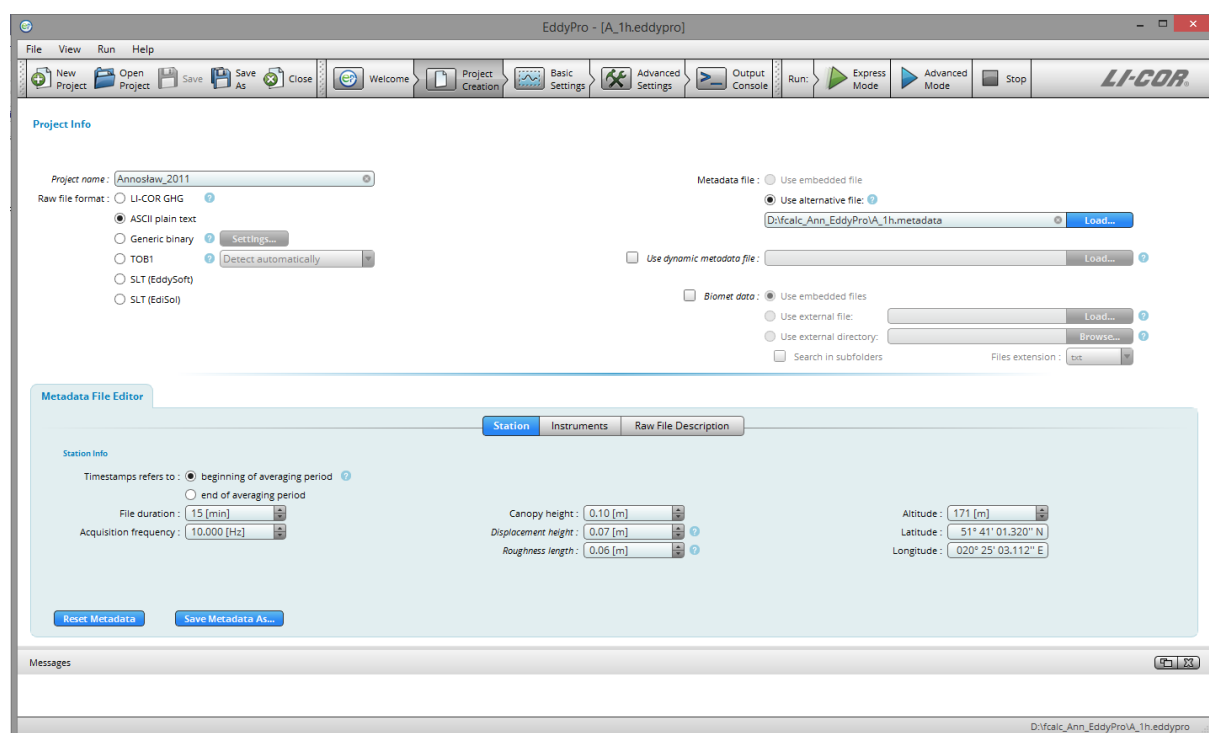
5.2. Przygotowanie pakietu EddyPro® do działania

Metodyka obliczania strumieni turbulencyjnych masy i energii charakteryzuje się dużym stopniem rozbudowania. Wymaga stosowania wielu procedur, które muszą być implementowane w odpowiedniej kolejności. Przede wszystkim, w odróżnieniu od klasycznych pomiarów meteorologicznych, dane charakteryzujące stanowisko pomiarowe potrzebne są już na wstępnym etapie obliczeń, a nie na etapie analizy danych. Takie parametry jak wysokość pomiaru, średni współczynnik tarcia w bezpośrednim otoczeniu stacji, wysokość przesunięcia³ czy odległości między przyrządami muszą być wprowadzone już na początku procedury obliczeniowej. W programie EddyPro® dane te wprowadzane są na etapie tworzenia projektu obliczeniowego, który, po zapisaniu, umożliwia wielokrotnie powtarzanie obliczeń dla kolejnych zarejestrowanych danych.

Tworzenie projektu (rys. 5.1) można podzielić na dwa etapy. Po pierwsze należy wprowadzić wcześniej wspomniane parametry dotyczące stanowiska i zapisać je w postaci dodatkowego pliku z rozszerzeniem *.metadata. Po uzupełnieniu informacji dotyczących właściwości plików z danymi „raw”⁴, plik ten wraz plikiem projektu umożliwia obliczania strumieni z konkretnego stanowiska na dowolnym komputerze wyposażonym w aplikację EddyPro®.

³ Definicje współczynnika tarcia i wysokości przesunięcia znajdują się w rozdziale 3

⁴ Dane „raw” to dane fluktuacji składowych prędkości wiatru, temperatury powietrza i koncentracji gazów cieplarnianych rejestrowane z założoną częstotliwością (w przypadku pomiarów w Kopytkowie 10 Hz). Ze względu na ogromną liczbę rejestrowanych liczb, zapis z reguły odbywa się do plików 15-, 30- lub 60-minutowych



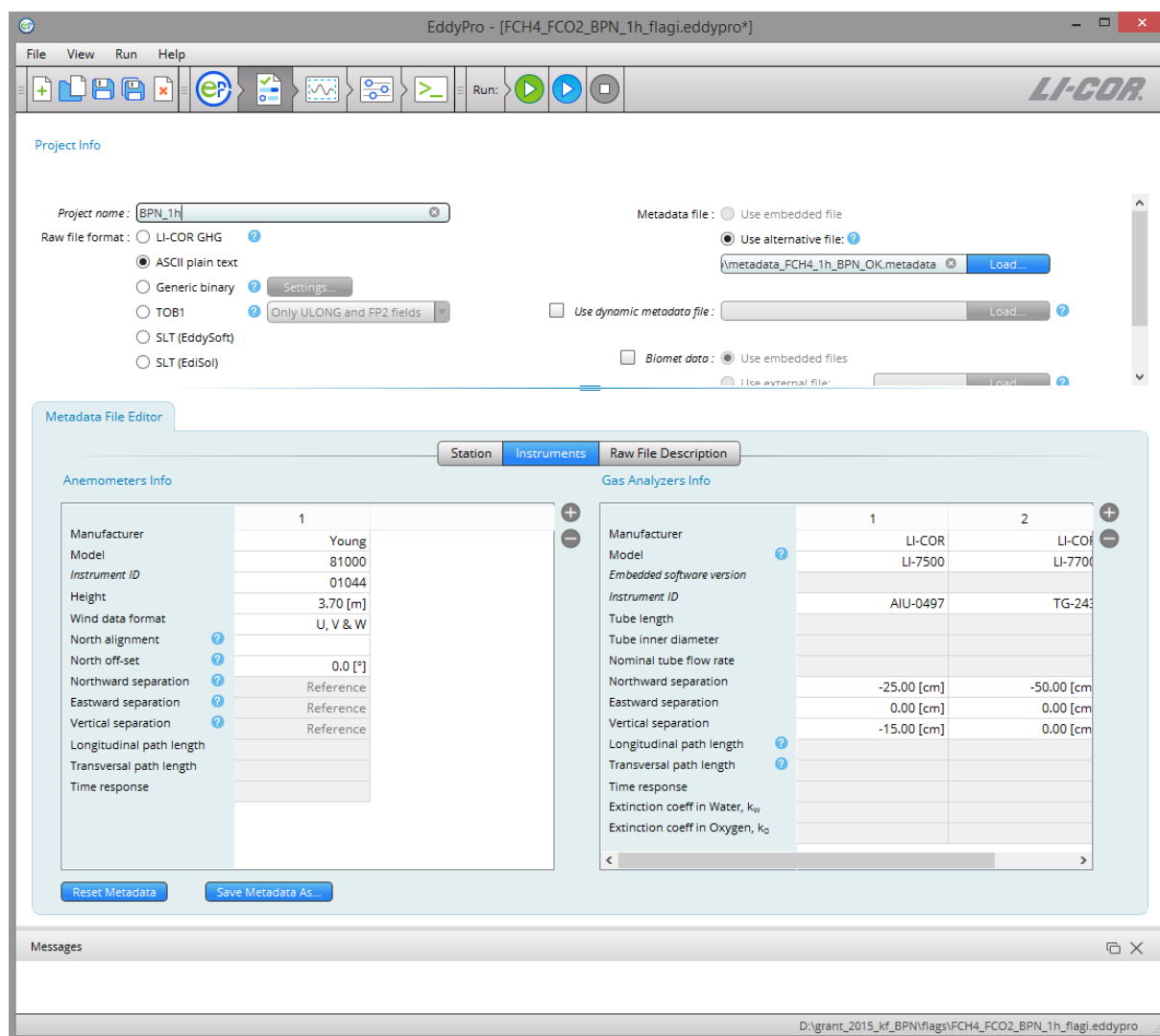
Rys. 5.1. Aplikacja EddyPro® - panel tworzenia projektu obliczania turbulentnych strumieni masy i energii (na przykładzie pomiarów realizowanych w Kopytkowie w Biebrzańskim Parku Narodowym)

Po drugie należy wprowadzić szczegółowe informacje dotyczące używanych przyrządów, ponieważ EddyPro® umożliwia prowadzenie obliczeń w oparciu o dane pochodzące z czujników produkowanych przez różnych producentów, zarówno tych z otwartą jak i zamkniętą ścieżką pomiarową. Należy zatem wprowadzić informacje dotyczące producenta, modelu, wersji oprogramowania go obsługującego, określić wysokość pomiaru oraz format i jednostki mierzonych danych (rys. 5.2). Metoda kowariancji wirów wymaga prowadzenia pomiarów z częstotliwością co najmniej 10 Hz, ale fluktuacje żądanych parametrów mierzone są przez różne przyrządy umieszczone w różnych punktach przestrzeni, co jest jednym z czynników powstawania strat spektralnych⁵. Należy zatem w programie dokładnie zdefiniować wzajemne położenie przyrządów, orientację oraz odległości między nimi. Konieczne są również dane o długości ścieżek pomiarowych przyrządów oraz wzajemnego położenia ich środków względem siebie.

Trzecim, równie ważnym dla poprawnej realizacji obliczeń strumieni jest prawidłowy import danych do programu. Uniwersalne rozwiązanie tego problemu jest prawdopodobnie jedną z przyczyn dużej popularności aplikacji EddyPro® wśród grup badawczych realizujących kampanie pomiarowe turbulentnych strumieni masy i energii, zarówno tych początkujących, jak i bardzo doświadczonych. Pliki „raw” zawierają kolumny liczb, które mogą być sformatowane w różny sposób. Zależy to przede wszystkim od rodzaju używanego sprzętu oraz konfiguracji systemu pomiarowego. Końcowa postać pliku „raw” zależy zatem od urządzenia, które je generuje lub rejestratora (dataloggera), który odpowiada za ich

⁵ Zagadnienie strat spektralnych opisano w rozdziale 3

archiwizację lub transfer do komputera. W przypadku systemów w całości lub w zasadniczej części opartych na czujnikach LI-COR, za zapis danych do plików „raw” odpowiedzialny jest rejestrator (tzw. LI-7550 Analyzer Interface Unit), który konfiguruje je do postaci tzw. plików GHG (Tabela 5.1). W przypadku stanowiska pomiarowego w Kopytkowie, które wyposażone jest w sprzęt pomiarowy różnych producentów, za transfer i zapis danych odpowiedzialny jest datalogger CR5000 (Campbell Scientific, USA). Dane zapisywane są do postaci tzw. plików



Rys. 5.2. Aplikacja EddyPro® - panel informacji o przyrządach pomiarowych używanych podczas pomiarów (producent, model, wysokość pomiaru, generowane zmienne, orientacja, itd.)

TBO1 (Tabela 5.1). Istnieją również systemy, w których dane transferowane są bezpośrednio do komputera, a zapis odbywa się do tekstowych plików ASCII (Tabela 5.1). Dla prawidłowego wczytywania danych „raw” kluczowy jest identyczny format we wszystkich plikach, których ilość w zależności od długości okresu pomiarowego może być bardzo duża (np. liczba 15-minutowych plików z danymi „raw” w ciągu 30-dniowego miesiąca sięga prawie 3 tysięcy). Aplikacja EddyPro® wymaga szczegółowego zdefiniowania każdej z wczytywanych kolumn, od ich typu (liczbowy lub tekstowy), przez zmienne

GHG

Model: LI-7500A Open Path CO₂/H₂O Analyzer
SN: 75H-2103
Instrument: AIU-0497
File Type: 2
Software Version: 5.0.1
Timestamp: 00:00:00
Timezone: Poland

DATA#	Diagnostic Value	Date	Time	CO ₂ (mmol/m ³)	H ₂ O (mmol/m ³)	Temperature (C)	Pressure (kPa)
Aux 1 - U (m/s)	Aux 2 - V (m/s)	Aux 3 - W (m/s)	Aux 4 - Ts (Other)	CO ₂ (umol/mol)	H ₂ O (mmol/mol)		
Dew Point (C)	AGC	CHK					
DATA 246	2015-06-01	00:00:00:000	17.5064	481.221	9.91476	99.4155	0.850849 -0.528569
0.008564	11.9722	414.364	11.3902	8.74516	43.75	202	
DATA 246	2015-06-01	00:00:00:100	17.5018	481.201	9.91476	99.4224	0.79013 -0.460066
0.0147915	11.9504	414.269	11.3901	8.74135	43.75	172	
DATA 246	2015-06-01	00:00:00:200	17.4935	480.983	9.91476	99.4039	0.65468 -0.559707
0.0381451	11.8477	414.108	11.3859	8.73137	43.75	228	
DATA 246	2015-06-01	00:00:00:300	17.4978	480.843	9.91476	99.4224	0.575278 -0.595516
0.0583839	11.7854	414.203	11.3824	8.73838	43.75	30	
DATA 246	2015-06-01	00:00:00:400	17.5231	481.242	9.91476	99.4085	0.567493 -0.637553
0.0319166	11.8788	414.799	11.3918	8.74579	43.75	35	

ASCII

```

121,2015,182,1,29,6,2.6897,,39342,.51226,16.827,16.45,723.81,907.63,16.337,.08753,55.875
121,2015,182,1,29,7,2.5596,,51565,.43756,16.827,16.443,723.51,906.95,16.325,.0876,55.875
121,2015,182,1,29,8,2.4374,,63449,.45114,16.827,16.443,723.51,907.49,16.335,.08773,55.875
121,2015,182,1,29,9,2.4102,,80765,.29496,16.807,16.443,723.51,907.63,16.337,.08753,55.889
121,2015,182,1,30,2,4.261,,91969,.07427,16.807,16.447,723.66,907.36,16.332,.08746,55.889

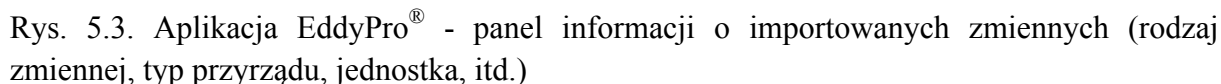
```

TOBI

```

"TOA5","CR5000","CR5000","2696","CR5000.Std.06","CPU:BPN_CH4.CR5","42635","fastdata"
"TIMESTAMP","RECORD","CH4micromolmol","CH4mmolm3","TLi7700","presLi7700","SS","CO2_mmolm3","CO2_mg
m3","CO2_ppm","H2O_mmolm3","H2O_gm3","u","v","w","Ts"
"TS","RN","","","","","","","","","","","","","",""
"", "", "Smp", "Smp", "Smp", "Smp", "Smp", "Smp", "Smp", "Smp", "Smp", "Smp", "Smp", "Smp", "Smp"
"2015-09-30 23:59:49.2",80722687,2.056847,0.09401075,0.4779778,1018.017,38.05099,49.82109,2192.128,1109.453,
1984.865,35.72756,0.07123756,-0.8801231,0.02861214,-0.8661156
"2015-09-30 23:59:49.3",80722688,2.056165,0.09399369,-0.4697914,1018,38.75002,49.77506,2190.103,1108.479,
1984.865,35.72756,0.008153915,-0.9159279,0.02861214,-0.8627052
"2015-09-30 23:59:49.4",80722689,2.059916,0.09414714,-0.4779778,1018.007,37.75092,49.79296,2190.89,1108.837,
1984.899,35.72818,0.03543282,-0.8664837,0.04140091,-0.8149681
"2015-09-30 23:59:49.5",80722690,2.055142,0.09394255,-0.4779778,1017.997,40.06965,49.75204,2189.09,1107.937,
1984.865,35.72756,-0.02850342,-0.8903522,-0.03191185,-0.8149681
"2015-09-30 23:59:49.6",80722691,2.056506,0.09399369,-0.4807053,1017.986,39.29219,49.7384,2188.49,1107.633,
1984.831,35.72695,0.07123756,-0.9517307,-0.03276443,-0.8388367

```



5.3. Obliczanie strumieni turbulencyjnych za pomocą EddyPro® – wybór trybu oraz kroki postępowania

Po przeprowadzeniu czynności wstępnych program wczytuje dane łącząc je w bloki danych o żądanej długości (w przypadku pomiarów w Kopytkowie było to 60 minut), a następnie kolejno dla każdego z nich realizuje obliczenia. Po wyznaczeniu kowariancji

i wstępnych wartości strumieni aplikacja koryguje je zgodnie z założeniami metody kowariancji wirów. Przeprowadzana jest zatem korekcja temperatury mierzonej przez anemometr soniczny ze względu na wilgotność powietrza (van Dijk i in., 2004), rotacja układu współrzędnych, uśrednienie danych, kompensacja wpływu separacji czujników, wyliczane są testy statystyczne dla danych „raw”, realizowana jest kompensacja fluktuacji gęstości powietrza, korekcja na straty spektralne oraz spektroskopowa korekcja dla czujnika metanu LI7700 (McDermitt i in., 2011). Etapem końcowym jest kontrola jakości danych oraz estymacja obszaru źródłowego (Tabela 5.2). Zasadniczym problemem pojawiającym się na tym etapie jest fakt, iż większość wymienionych procedur czy poprawek można rozwiązywać różnymi sposobami, zaproponowanymi przez różnych badaczy (Tabela 5.2). Odpowiedni ich dobór wymaga szczegółowej wiedzy teoretycznej dotyczącej metody kowariancji wirów. Co więcej, w przypadku niektórych z nich (np. sposób uśredniania, straty spektralne), wciąż trwa dyskusja nad optymalnym doбором rozwiązań.

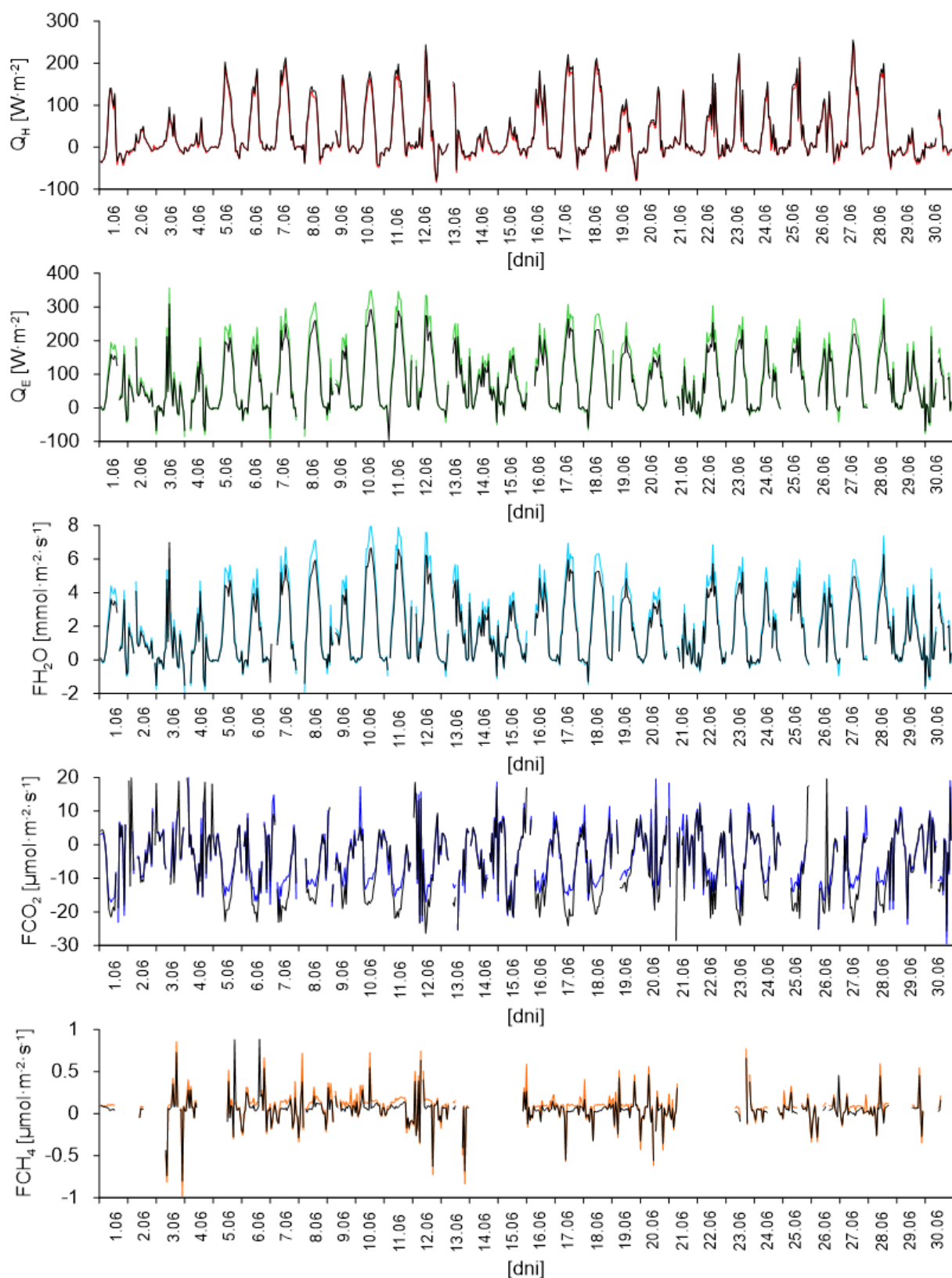
Aplikacja EddyPro[®] umożliwia pracę w dwóch trybach: ekspresowym (*express mode*) oraz zaawansowanym (*advanced mode*). Tryb ekspresowy zakłada natychmiastowe rozpoczęcie obliczeń po prawidłowym zdefiniowaniu zawartości plików „raw” oraz ich wczytaniu. Zaletą takiego rozwiązania jest szybkie uzyskanie wyniku, wadą natomiast brak możliwości wyboru sposobów rozwiązań kolejnych procedur i korekcji. Tryb ten stosuje się najczęściej do wstępnej analizy zmienności czasowej strumieni turbulencyjnych masy i energii, głównie w celu wyeliminowania błędów grubych. Przykładowe wyniki obliczeń strumieni turbulencyjnych ciepła jawnego Q_H i utajonego Q_E oraz strumieni gazów cieplarnianych FH_2O , dwutlenku węgla FCO_2 i metanu FCH_4 dla czerwca 2014 roku przedstawiono na rys. 5.4. Już na tym etapie widać, jak istotne jest wprowadzanie wszystkich zalecanych poprawek, ponieważ różnice między wartością strumieni skorygowanych i nieskorygowanych mogą być bardzo duże i sięgać kilkunastu bądź nawet kilkudziesięciu procent.

Tryb zaawansowany umożliwia dostęp do kolejnych kroków procesu obliczeniowego. Zgodnie z ogólnie przyjętą metodyką wykonywania obliczeń strumieni turbulencyjnych masy i energii, kolejność obliczania kolejnych poprawek i procedur jest ściśle określona (szczegóły w rozdziale 3):

- eliminacja sztucznie generowanych przez system pomiarowy impulsów (ang. *spikes detection*);
- eliminacja danych spoza zakresu fizycznie realnych wartości;
- uśrednianie parametrów w odpowiednio wybranym przedziale czasowym (zwykle z zakresu: 15 min. – 1godz.);
- korekcja ze względu na unoszenie sygnału anemometru akustycznego przez wiatr (w większości nowoczesnych anemometrów uwzględniona sprzętowo);
- obroty układu współrzędnych i transformacje wyników do nowego układu współrzędnych;
- korekcja ze względu na straty spektralne;
- korekcja strumienia ciepła jawnego ze względu na pomiar temperatury anemometrem akustycznym;
- korekcja ze względu na fluktuacje gęstości (tzw. poprawka WPL);

Tabela 5.2. Procedury obliczeniowe oraz metody ich rozwiązywania stosowane podczas obliczeń strumieni turbulencyjnych realizowanych za pomocą aplikacji EddyPro® (podkreślono rozwiązania wykorzystywane w trybie ekspresowym – wyjaśnienia w tekście oraz w rozdziale 3)

Kroki obliczeniowe strumieni turbulencyjnych	Metody rozwiązania
Rotacja układu współrzędnych wiatru	- <u>Double rotation</u> - Triple rotation - Sector-wise planar fit (Wilczak i in., 2001) - Sector-wise planar fit with no velocity bias (van Dijk i in., 2004)
Uśrednianie danych	- <u>Block averaging</u> - Linear detrending - Running average - Exponential running average
Kompensacja wpływu separacji czujników	- <u>Automatic time lag optimization (optionally as a function of RH for H₂O)</u> - Maximum covariance with default (circular correlation) - Maximum covariance without default - Constant - None (option to not apply compensation)
Testy statystyczne dla danych „raw” (Vickers i Mahrt, 1997)	- <u>Spike count/removal (Mauder i in., 2013)</u> - <u>Amplitude resolution</u> - <u>Dropouts</u> - <u>Absolute limits</u> - <u>Skewness and kurtosis</u> - Discontinuities - Time lags - Angle of attack - Steadiness of horizontal wind - Individually selectable and customizable
Kompensacja fluktuacji gęstości powietrza	- <u>Webb i in., 1980 (open path) / Ibrom i in., 2007a (closed path)</u> - Use (or convert to) mixing ratio (Burba i in., 2012) - Optional off-season uptake correction for LI-7500 (Burba i in., 2008) - None (option to not apply compensation)
Korekcje na straty spektralne	- <u>Analytic high-pass filtering correction (Moncrieff i in., 2004)</u> - Low-pass filtering, select and configure: - <u>Moncrieff i in. (1997)</u> - Massman (2000) - Horst (1997) - Ibrom i in. (2007b) - Horst i Lenschow (2009) - Fratini i in. (2012)
Kontrola jakości danych	- <u>Flagging according to Carbo Europe standard (Mauder i Foken, 2004)</u> - Flagging according to Foken (2003) - Flagging after Göckede i in. (2004)
footprint	- <u>Kljun i in. (2004)</u> - Kormann i Meixner (2001) - Hsieh i in. (2000)



Rys. 5.4. Turbulencyjne strumienie ciepła jawnego Q_H i utajonego Q_E oraz pary wodnej F_{H_2O} , dwutlenku węgla FCO_2 i metanu FCH_4 w czerwcu 2014 roku w Kopytkowie (Biebrzański Park Narodowy), obliczone za pomocą aplikacji EddyPro[®] w trybie „express mode”. Czarne linie oznaczają strumienie nieskorygowane

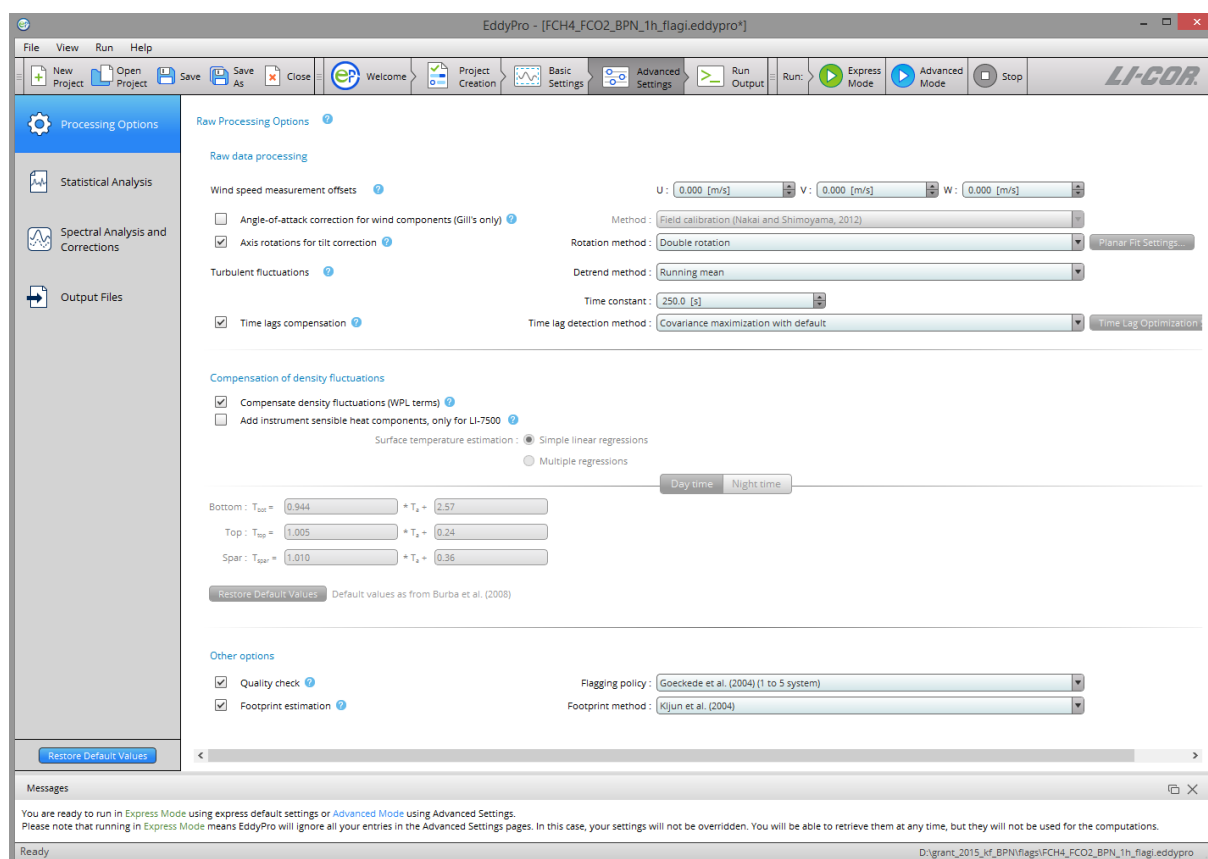
- w przypadku pomiarów wilgotności powietrza higrometrem kryptonowym, poprawka na pochłanianie pasm emisyjnych lampy kryptonowej przez tlen;
- opcjonalnie inne poprawki (np. na ruchy konwekcyjne wynikające z ogrzewania powietrza przez anemometr, poprawki spektroskopowe);
- testy spełnienia warunku stacjonarności i dobrze rozwiniętej turbulencji.

Aplikacja EddyPro® w trybie zaawansowanym umożliwia ingerencję w opisany proces. Po pierwsze można usunąć z procesu obliczeniowego dowolny krok. Po drugie, w niektórych przypadkach można zmieniać założenia brzegowe wybranych kroków (np. długość przedziału uśredniania, granice „realności” danych, definiowanie *spike detection* itd.). Po trzecie wreszcie, w przypadku niektórych kroków można zdecydować o sposobie ich rozwiązania. Niektóre z poprawek mają bowiem dwa lub więcej różnych rozwiązań (Tabela 5.2), przy czym celowość używania niektórych z nich od lat poddawana jest dyskusji (Aubinet i in., 2012). Do najważniejszych poprawek i procedur posiadających co najmniej dwa różne rozwiązania należą:

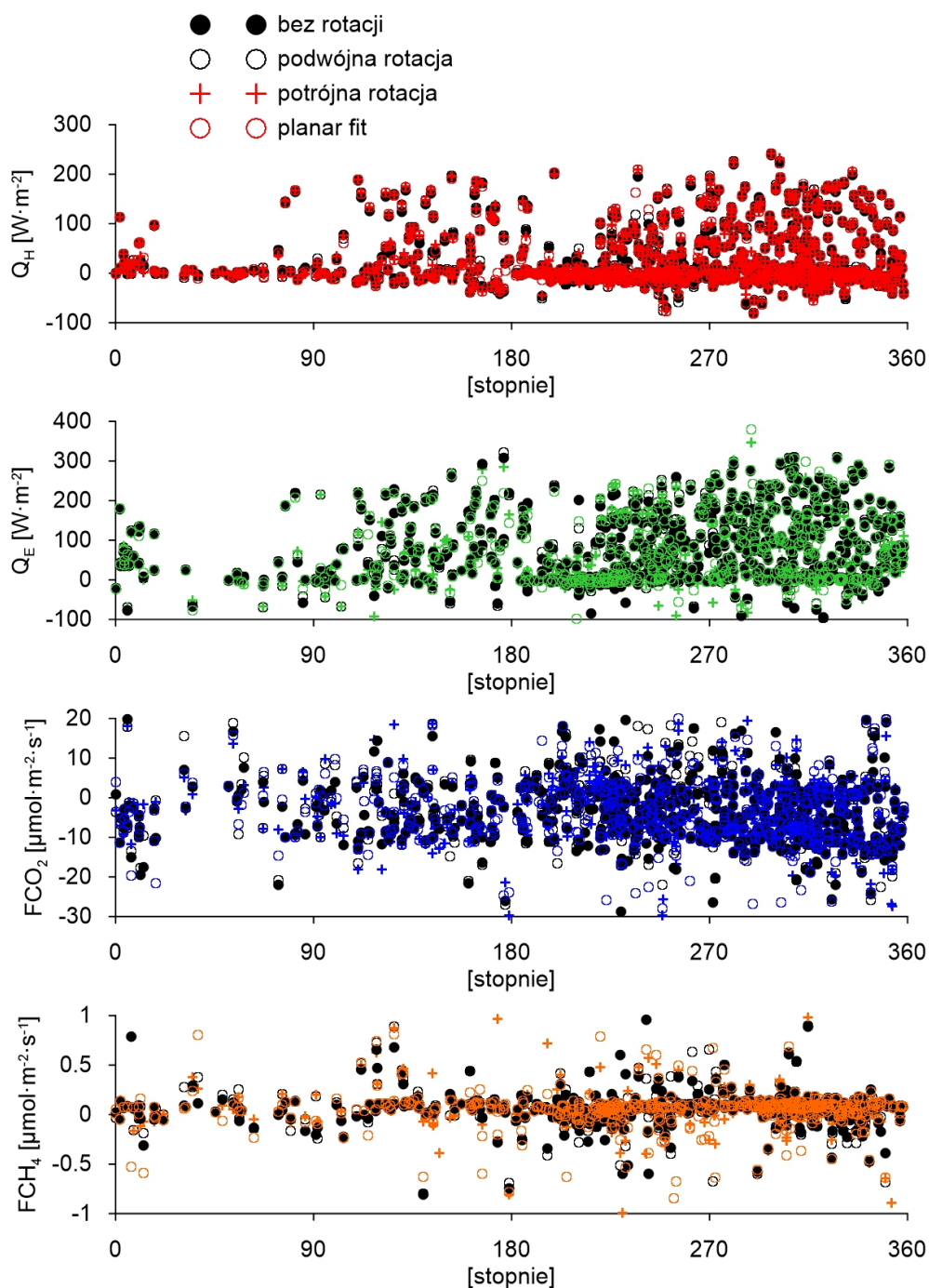
5.3.1. Rotacja układu współrzędnych wiatru

Jednym z podstawowych kryteriów zapewniających prawidłowy pomiar turbulencyjnych strumieni masy i energii jest prawidłowo skonstruowane stanowisko pomiarowe. Anemometr ultradźwiękowy, który odpowiedzialny jest za pomiary fluktuacji pionowej składowej prędkości wiatru powinien być ustawiony pionowo, tak aby spełniony był warunek $\bar{w} = 0$. W praktyce trwałe idealnie pionowe ustawienie przyrządu nie zawsze jest możliwe, a ukształtowanie terenu lub istniejące przeszkody, nawet niewielkie, mogą wywołać zaburzenie przepływu powietrza. Problem ten eliminuje się poprzez rotację układu współrzędnych wiatru, którą szerzej opisano w rozdziale 3. Znane są jednak co najmniej trzy sposoby realizacji tej procedury: obroty wokół dwóch osi (z i y) kartezjańskiego układu współrzędnych (tzw. podwójna rotacja, Kaimal i Finnigan, 1994; Lee i in., 2004), obroty wokół wszystkich trzech osi (tzw. potrójna rotacja, Finnigan i in., 2003; Lee i in., 2004; Mauder i Foken, 2011) oraz metoda płaszczyzny średniego przepływu (*planar fit method*, Wilczak i in., 2001). Najczęściej stosowane jest rozwiązanie pierwsze (podwójna rotacja). Rozwiązanie drugie (potrójna rotacja), jest często krytykowane jako prowadzące do nierealistycznych wyników. Z kolei rozwiązania trzeciego, w przeciwieństwie do dwóch poprzednich nie można stosować dla kolejnych, np. 60-minutowych bloków danych, a dopiero po zarejestrowaniu danych z dłuższego okresu obliczeniowego, rzędu np. kilku miesięcy, co uniemożliwia śledzenie turbulencyjnej wymiany masy i energii na bieżąco. Aplikacja EddyPro® umożliwia zastosowania każdego w wymienionych rozwiązań, przy czym jako domyślnego używa podwójnej rotacji (rys. 5.5). Rysunki 5.6 i 5.7 pokazują, że, stosowanie powyższych metod prowadzi do rozbieżności. Różnice uzależnione są od kierunku przepływu powietrza oraz od mierzonego strumienia. Najmniejsze rozbieżności obserwuje się w przypadku strumienia ciepła jawnego, są one natomiast zdecydowanie wyższe w przypadku wymiany gazów cieplarnianych. Różnice między wartościami strumieni obliczonymi bez rotacji oraz z podwójną rotacją są bardzo niewielkie (rys. 5.3), co w tym przypadku jest rezultatem dobrze ustawionego anemometru ultradźwiękowego, ale również

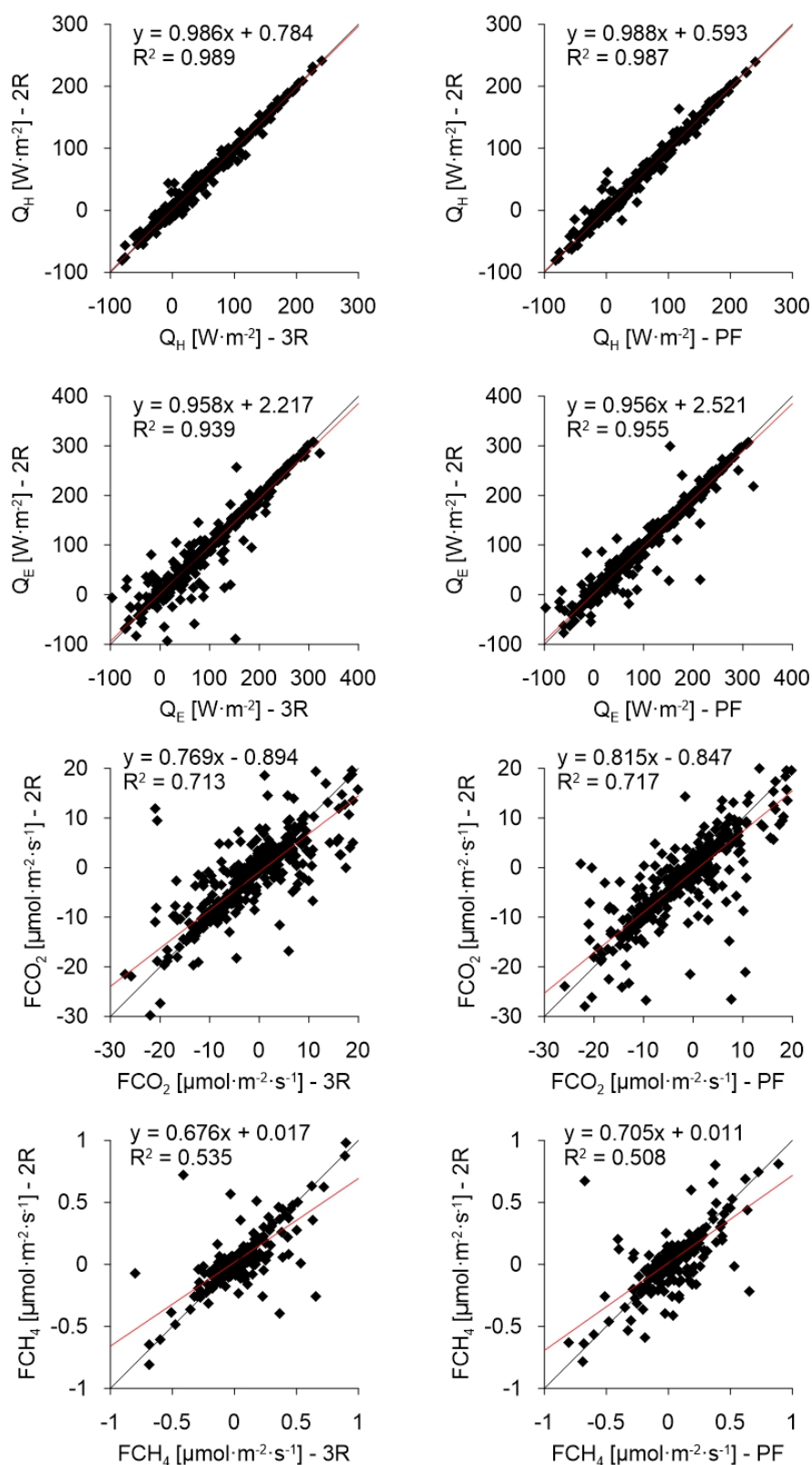
płaskiego terenu w otoczeniu stacji w Kopytkowie. Zastosowanie innych metod obrotu prowadzi do powstawania, w niektórych sektorach napływu powietrza, dość dużych rozbieżności. Na przykładzie pomiarów z czerwca 2014 roku można stwierdzić, że w niektórych przypadkach różnice te są bardzo duże i sięgają kilkudziesięciu i więcej procent. (rys. 5.3). Trudno tutaj doszukać się rozbieżności o charakterze systematycznym (rys. 5.5), a najważniejszym problemem wydaje się być pojawianie się pojedynczych, wyraźnie różniących się wartości strumieni, które obliczono stosując potrójną rotację oraz metodę planar fit. Z punktu widzenia krótkotrwałych kampanii pomiarowych, można zaryzykować stwierdzenie, iż dobór metody rotacji układu współrzędnych wiatru nie ma charakteru pierwszorzędowego a pojedyncze rozbieżności można uznać za mało istotne. W przypadku kampanii długookresowych, mających na celu oszacowanie np. rocznej wymiany gazów cieplarnianych, pewna liczba wyraźnie zaniżonych lub zawyżonych wyników (których istnienie trudno uzasadnić) może istotnie wpłynąć na końcowe wartości rocznych strumieni FH_2O , FCO_2 czy FCH_4 . W praktyce większość grup badawczych na świecie skłania się ku stosowaniu metody podwójnej rotacji, lub, rzadziej, planar fit (Aubinet i in., 2012).



Rys. 5.5. Aplikacja EddyPro[®] - panel wyboru rozwiązań procedur i poprawek stosowanych w metodzie kowariancji wirów (rotacja układu współrzędnych wiatru, metoda uśredniania, maksymalizacja kowariancji, system oznaczania jakości danych po przeprowadzonej kontroli, itd.)



Rys. 5.6. Turbulencyjne strumienie ciepła jawnego Q_H i utajonego Q_E oraz dwutlenku węgla FCO_2 i metanu FCH_4 w zależności od kierunku wiatru w czerwcu 2014 roku w Kopytkowie (Biebrzański Park Narodowy), obliczone za pomocą aplikacji EddyPro® z użyciem różnych metod rotacji układu współrzędnych wiatru

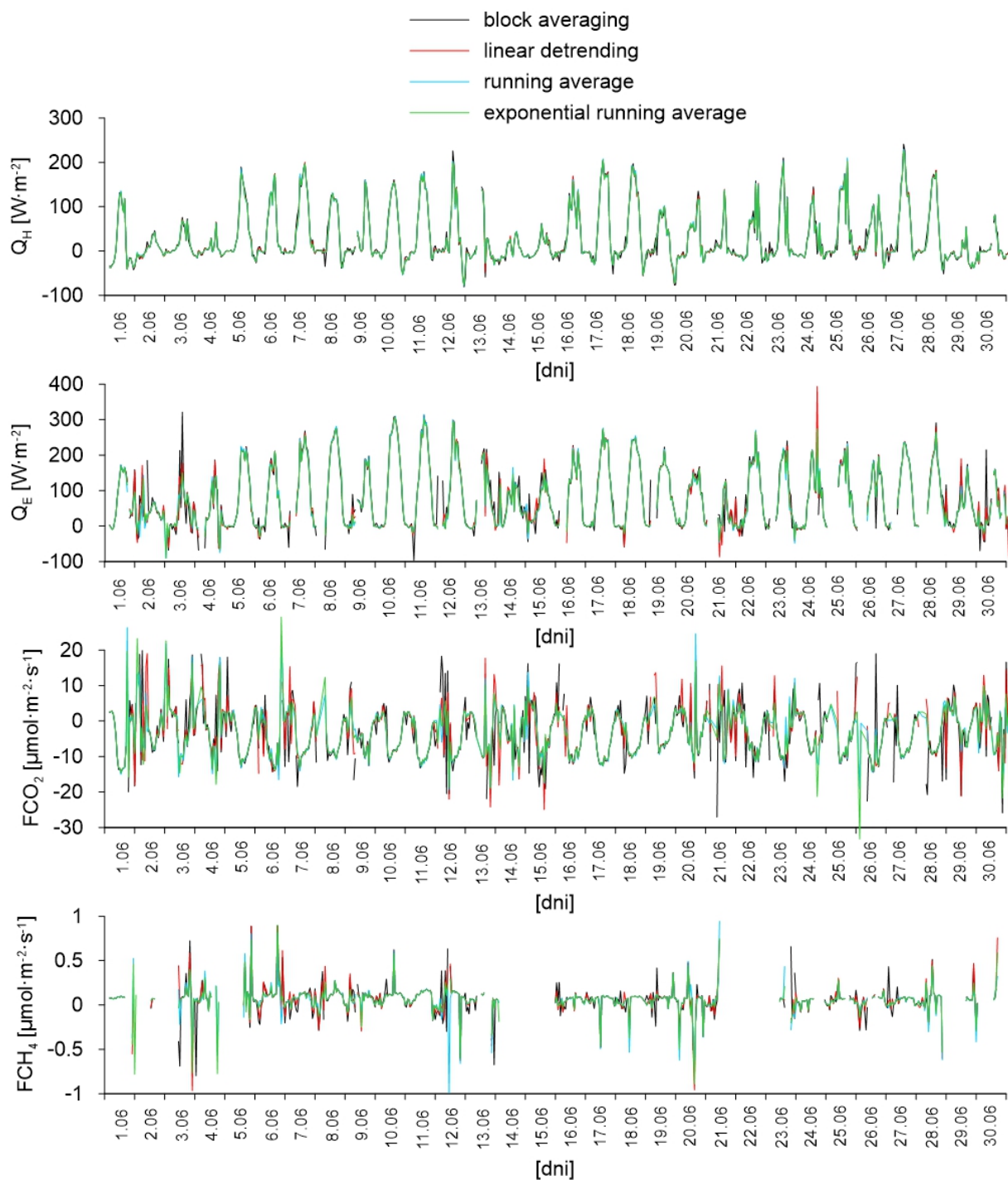


Rys. 5.7. Porównanie turbulentnych strumieni ciepła jawnego Q_H i utajonego Q_E oraz dwutlenku węgla FCO_2 i metanu FCH_4 w czerwcu 2014 roku w Kopytkowie (Biebrzański Park Narodowy), obliczonych za pomocą aplikacji EddyPro[®] w zależności od metody rotacji układu współrzędnych wiatru (2R – podwójna rotacja, 3R – potrójna rotacja, PF – planar fit)

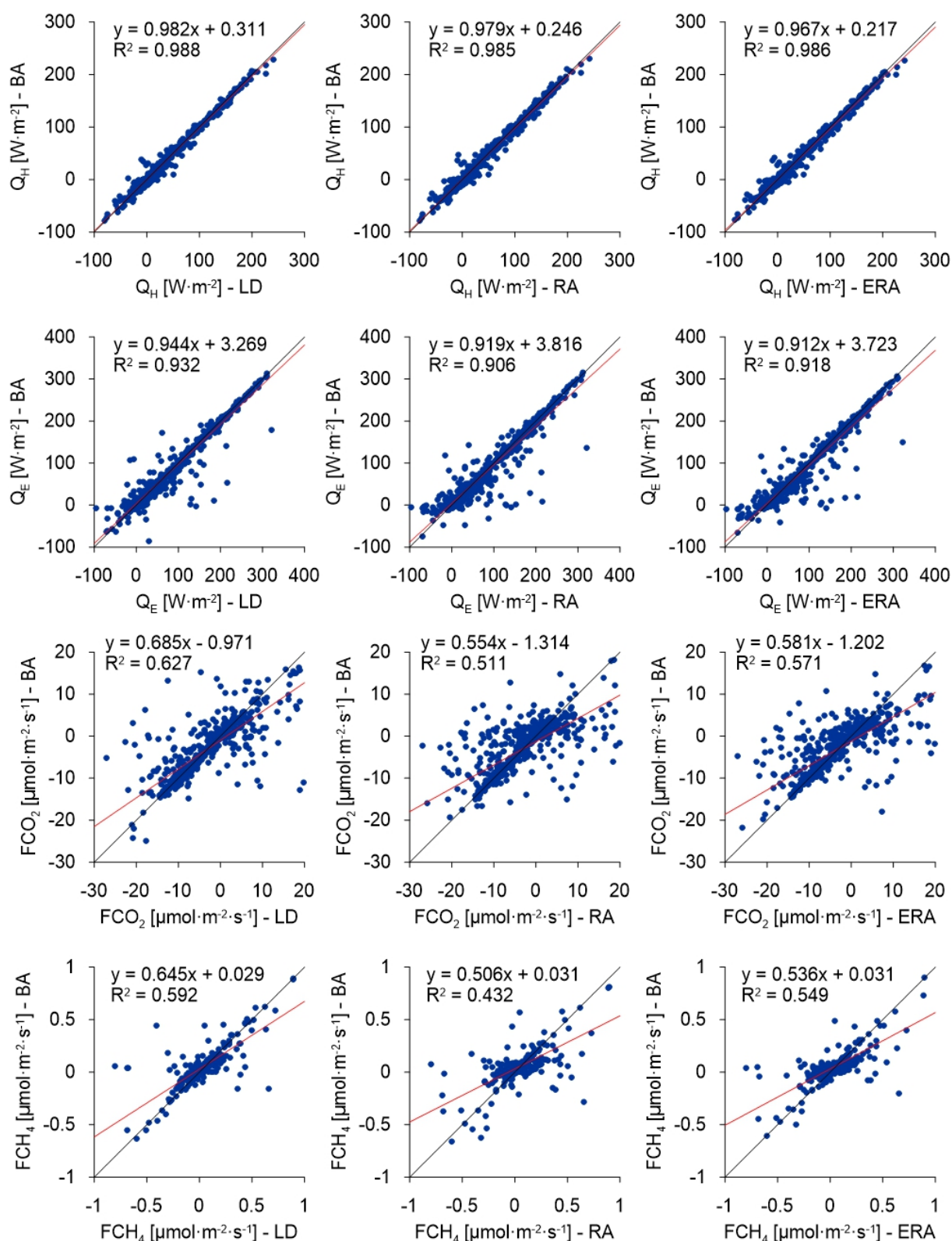
5.3.2. Metoda uśredniania danych

Turbulencyjne strumienie masy i energii oblicza się w pewnych przedziałach czasu. Zgodnie z teoretycznymi podstawami metody kowariancji wirów najczęściej stosuje się przedziały o długości od 30 do 60 minut⁶. Aplikacja EddyPro® pozwala na wykonywanie obliczeń strumieni turbulencyjnych dla dowolnie długich przedziałów czasowych, pozwala również na wybór metody uśredniania danych (rys. 5.8). Problem ten wciąż jest obiektem dyskusji, a proponowanych rozwiązań jest co najmniej kilka (Lenschow i in., 1994; Culf, 2000; Trevino i Andreas, 2000; Finnigan i in., 2003; Lee i in., 2004). Podczas pomiarów w Kopytkowie przyjęto rozwiązanie stosowane najczęściej, czyli zwykle uśrednianie przedziałowe. Należy podkreślić, że oprócz prostoty podejście takie posiada bardzo ważną cechę: jako jedyne spełnia założenia uśredniania Reynoldsa. Z drugiej jednak strony od wielu lat szeroko dyskutowany jest problem konieczności stosowania bardziej zaawansowanych metod uśredniania, zwłaszcza w przypadku dużej zmienności danych „raw” lub pojawienia się trendu, który powinien być wyeliminowany (McMillen, 1988; Beverland i in., 1996; Rannik i Vesala, 1999; Gallagher i in., 2000; Culf, 2000; de Franceschi i Zardi, 2003; Moncrieff i in., 2004; Rebmann i in., 2012; Burba, 2013). Stosowanie różnych metod uśredniania może jednak prowadzić do dużych rozbieżności w wartościach obliczonych strumieni, pojawienia się błędów systematycznych, jak również zaburza własności spektralne danych. Autorzy aplikacji EddyPro® umożliwili wybór czterech różnych procedur uśredniania danych (Tabela 5.2). Pierwszą z nich jest klasyczne uśrednianie przedziałowe (*block averaging* – domyślna metoda w EddyPro®), a pozostałe zakładają wykorzystanie detrendingu liniowego (*linear detrending*, Gash i Culf, 1996), średniej ruchomej (*running average*, Moncrieff i in., 2004), czy wykładniczej średniej ruchomej (*exponential running average*, McMillen, 1988; Rannik i Vesala, 1999). Jak wynika z rys. 5.8 zastosowanie różnych metod uśredniania może prowadzić do pewnych różnic w wynikach. Na podstawie danych z czerwca 2014 roku zarejestrowanych w Kopytkowie można zaryzykować stwierdzenie, że w przypadku strumienia ciepła jawnego, metoda uśredniania w niewielkim stopniu wpływa na wyniki. Metody zakładające uśrednianie inne niż blokowe dają w tym przypadku, średnio, wyniki wyższe o 2–3% (rys. 5.9, górny rząd). Problem jest bardziej złożony w przypadku strumieni gazów cieplarnianych. Zastosowanie różnych metod uśredniania danych generuje pewne rozbieżności w wynikach strumieni pary wodnej (ciepła utajonego), które są jeszcze większe w przypadku strumieni dwutlenku węgla i metanu (rys. 5.5). Strumienie ciepła utajonego obliczone metodami innymi niż uśrednianie przedziałowe zawyżają wartości strumieni o około 5–9% (w przypadku danych z czerwca 2014), jednak strumienie o bardzo rozbieżnych wynikach występują bardzo rzadko. W przypadku pozostałych gazów takie rozbieżności są zdecydowanie częstsze i pojawiają się przede wszystkim w okresach nieregularności w ogólnej zmienności dobowej strumieni (rys. 5.9, 5.10). Należy podkreślić, że w takich sytuacjach zastosowanie metody średniej ruchomej czy wykładniczej średniej ruchomej daje lepsze wyniki niż w przypadku pozostałych metod (rys. 5.10). Najczęstszymi przyczynami pojawiania się nieregularności w zmienności czasowej strumieni turbulencyjnych jest, pojawiająca się najczęściej w godzinach nocnych,

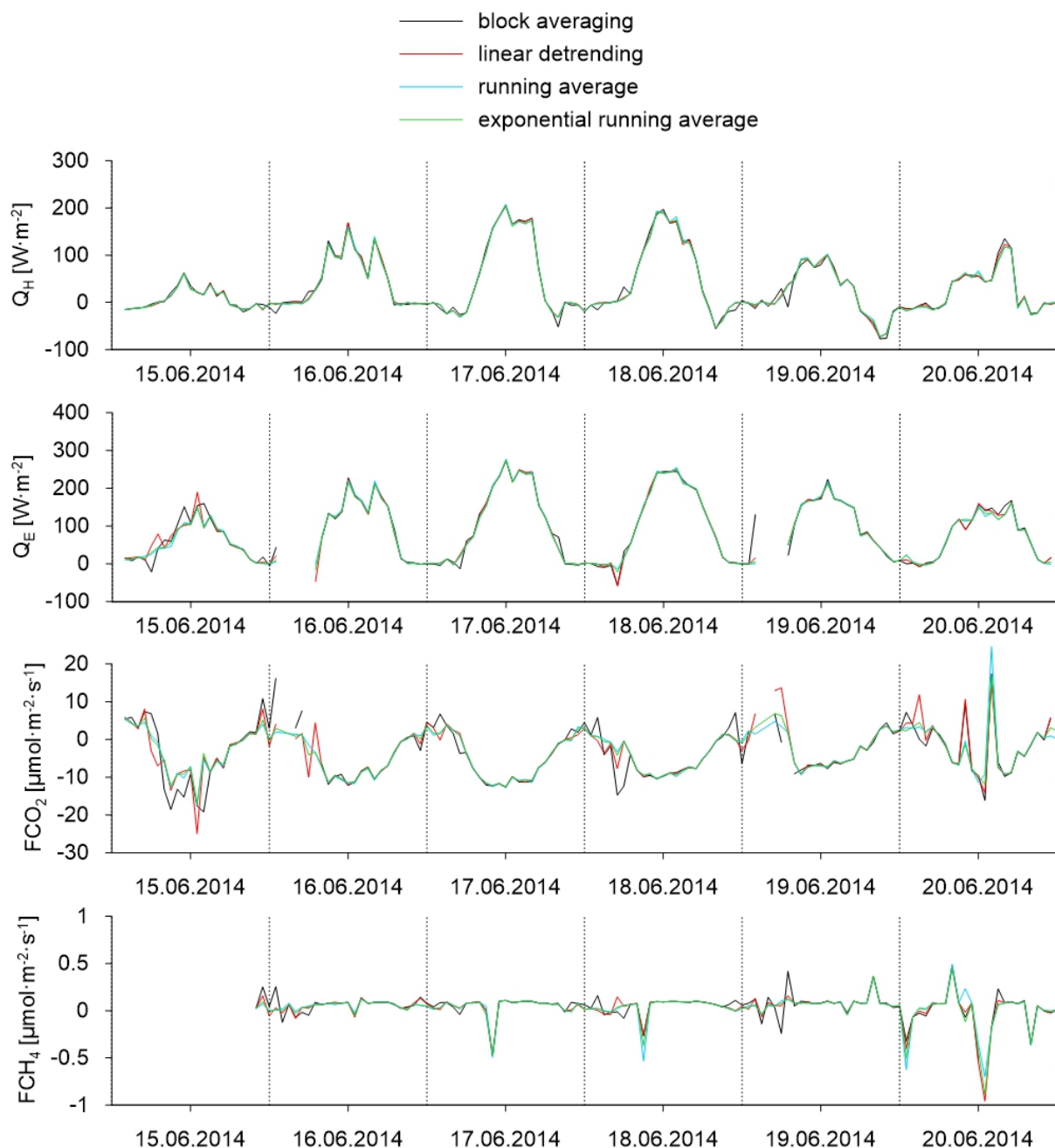
⁶ Szersza dyskusja dotycząca doboru przedziału uśredniania znajduje się w rozdziale 3



Rys. 5.8. Turbulencyjne strumienie ciepła jawnego Q_H i utajonego Q_E oraz dwutlenku węgla FCO_2 i metanu FCH_4 w czerwcu 2014 roku w Kopytkowie (Biebrzański Park Narodowy), obliczone za pomocą aplikacji EddyPro[®] z wykorzystaniem różnych metod uśredniania danych



Rys. 5.9. Porównanie turbulentnych strumieni ciepła jawnego Q_H i utajonego Q_E oraz dwutlenku węgla FCO_2 i metanu FCH_4 w czerwcu 2014 roku w Kopytkowie (Biebrzański Park Narodowy), obliczonych za pomocą aplikacji EddyPro® w zależności od metody uśredniania danych (BA – block averaging, LD – linear detrending, RA – running average, ERA – exponential running average)



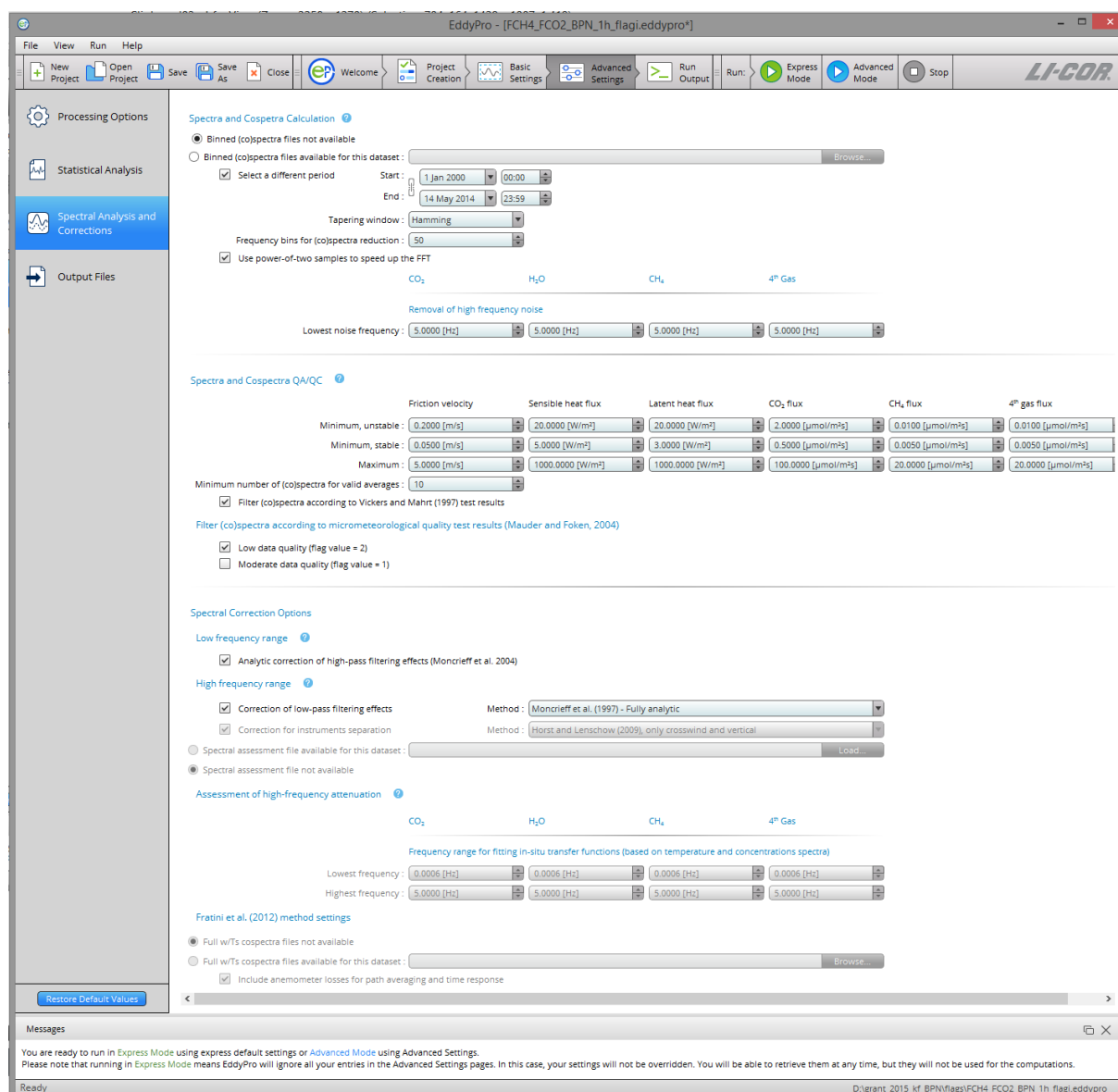
Rys. 5.10. Turbulencyjne strumienie ciepła jawnego Q_H i utajonego Q_E oraz dwutlenku węgla FCO_2 i metanu FCH_4 w dniach 15–20 czerwca 2014 roku w Kopytkowie (Biebrzański Park Narodowy), obliczone za pomocą aplikacji EddyPro[®] z wykorzystaniem różnych metod uśredniania danych

niewystarczająco rozwinięta turbulencja lub zjawisko nieciągłości turbulencji, czyli intermitencja. W takich przypadkach zwykle uśrednianie blokowe nie spełnia swego zadania. Z kolei podczas istnienia dobrze rozwiniętej turbulencji uśrednianie przedziałowe wydaje się być najkorzystniejszym, a jednocześnie najprostszym rozwiązaniem. Pozostałe metody należy wykorzystywać raczej w sytuacjach kiedy warunki są mniej korzystne dla transportu turbulentnego. Niestety aplikacja EddyPro[®] uniemożliwia „płynną” zmianę metody

uśredniania w trakcie obliczeń kolejnych wartości strumieni. Metoda uśredniania przedziałowego jako jedyna spełnia warunek uśredniania Reynoldsa, wielu badaczy opowiada się jednak za stosowaniem metod wykorzystujących detrending. Należy jednak pamiętać o tym, że metody te zmieniają własności spektralne szeregów danych „raw”, które należy potem korygować. Stosowanie uśredniania innego niż przedziałowe dla długich serii pomiarowych, bez względu na stopień rozwoju turbulencji, może prowadzić do korygowania szeregów na starty spektralne w okresach kiedy jest to niepotrzebne. Najczęściej wynikiem takiego podejścia są zatem zawyżone wartości turbulencyjnej wymiany energii, a przede wszystkim gazów cieplarnianych.

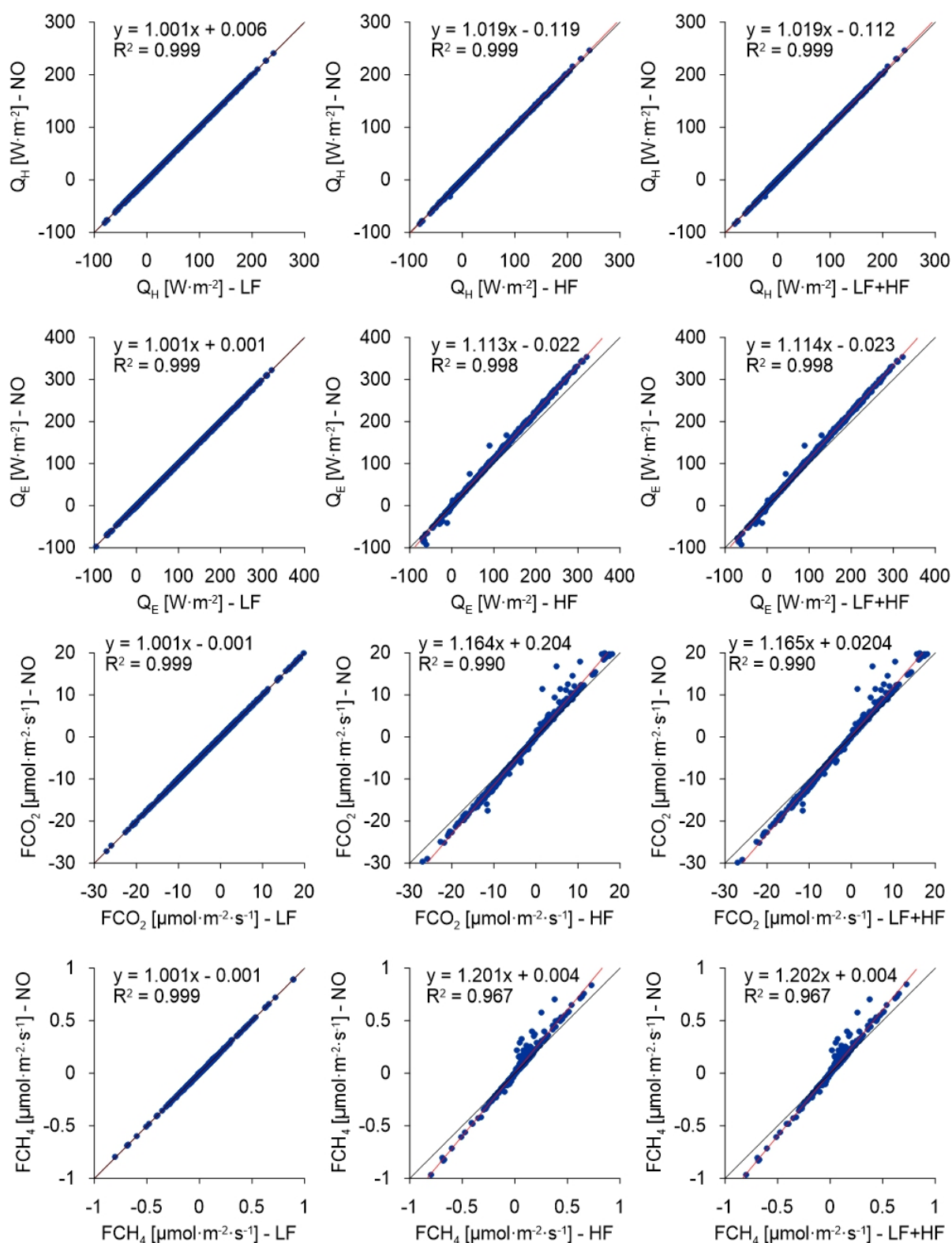
5.3.3. Poprawki na straty spektralne

Straty spektralne pojawiające się w danych „raw” (rys. 3.9) są efektem separacji przyrządów oraz rozmiarów ich ścieżek pomiarowych. Pojawianie się strat związanych z niemożnością uwzględnienia wirów o rozmiarach mniejszych od ścieżek pomiarowych przyrządów oraz od odległości między przyrządami (Horst, 1997; Horst i Lenschow, 2009), jak również wirów dużo od nich większych, omówione zostało w rozdziale 3. Ogólnie wiadomo, że nieuwzględnienie wirów o największych rozmiarach powoduje straty w zakresie niskich częstotliwości, a wirów bardzo małych generuje straty wśród częstotliwości wysokich. Ponieważ wartość strumienia można wyznaczyć jako pole powierzchni pod wykresem spektrum, takie „obcięcie” częstotliwości prowadzi do zaniżania obliczanych strumieni turbulencyjnych. Straty spektralne mogą być także generowane sztucznie poprzez, opisane w poprzednim podrozdziale, procedury uśredniania danych inne niż klasyczne uśrednianie przedziałowe. Spośród szeregu rozwiązań zaproponowanych w ostatnich latach, najczęściej stosowane są analityczne poprawki Massmana (2000, 2001) lub Moncrieffa (1997, 2004). Mimo, że dodawanie poprawek na straty spektralne od lat zajmuje stałe miejsce w zestawie procedur wymaganych podczas wyznaczania strumieni turbulencyjnych metodą kowariancji wirów, dyskusję nad tym czy ich wartości są odpowiednie należy uznać za wciąż otwartą. Aplikacja EddyPro® używana w trybie zaawansowanym umożliwia obliczanie wartości strumieni turbulencyjnych masy i energii bez poprawek na straty spektralne bądź z różnymi ich wersjami (Tabela 5.2, rys. 5.11). Tryb zaawansowany umożliwia zatem prześledzenie udziału poprawek na straty spektralne podczas procesu obliczania i korygowania strumieni turbulencyjnych. Na podstawie przykładowych danych zarejestrowanych w czerwcu 2014 roku w Kopytkowie (Biebrzański Park Narodowy), można stwierdzić, że, zgodnie z rozważaniami teoretycznymi, wartości poprawek, niezależnie od rodzaju, silnie zależą od rodzaju badanego strumienia (rys. 5.12). Zdecydowanie najmniejsze straty spektralne pojawiają się w przypadku strumienia ciepła jawnego. Poprawka na straty wśród niskich częstotliwości (związane z niemożnością uwzględnienia w pomiarach wszystkich dużych wirów turbulencyjnych) stanowi ułamek procenta. Z kolei poprawka na straty wśród wysokich częstotliwości (związana z nieuwzględnianiem w pomiarach bardzo małych wirów turbulencyjnych) jest nieco większa, ale nie przekracza 2% (rys. 5.12). W przypadku pozostałych strumieni poprawka na straty w przedziale niskich częstotliwości również nie odgrywa istotnej roli, zatem jej wkład w korekcję strat spektralnym w badanym okresie (czerwiec 2014) można uznać za minimalny czy wręcz nieistotny.

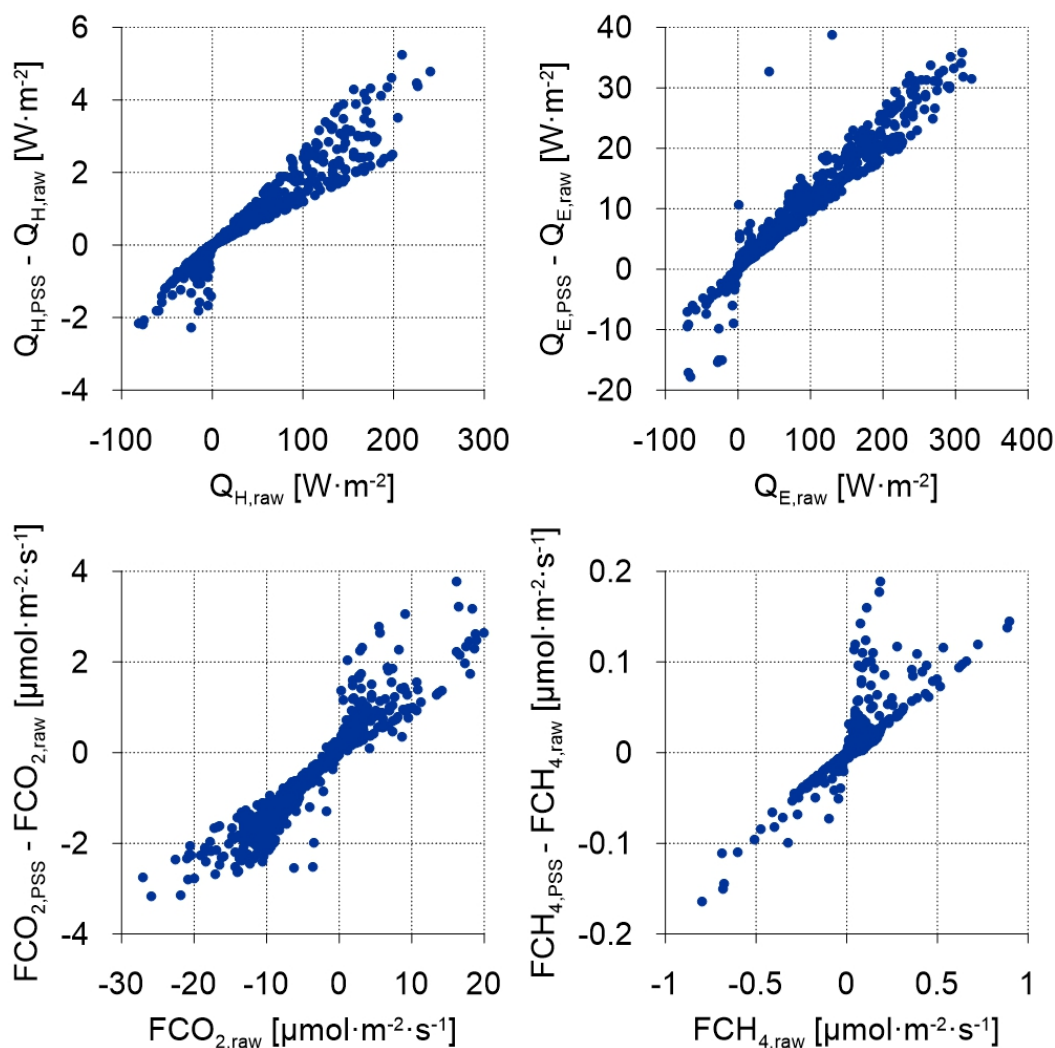


Rys. 5.11. Aplikacja EddyPro[®] - panel wyboru rozwiązań stosowanych do korygowania strat spektralnych

Wartość poprawki na straty w przedziale wysokich częstotliwości ma zdecydowanie większe wartości. W badanym okresie w przypadku strumienia ciepła utajonego wyniosła około 11%, podczas gdy dla pozostałych gazów była jeszcze większa, rzędu 16% (FCO₂) i 20% (FCH₄). Wartości te należy uznać za bardzo znaczące, przy czym pamiętać należy o tym, że niezwykle trudno jest rozstrzygnąć czy mamy do czynienia z niedoszacowanymi strumieniami, czy przeszacowanymi wartościami poprawek. Wartości sumaryczne poprawki na straty spektralne podczas pomiarów w czerwcu 2014 roku w Kopytkowie (rys. 5.12) zawierały się w granicach od ~2% (strumień ciepła jawnego) do ~20% (strumień metanu). W liczbach bezwzględnych (rys. 5.13) wartość sumarycznej poprawki na straty spektralne nie wydaje się zbyt duża w przypadku strumienia ciepła jawnego. W czerwcu 2014 roku wskazywała ona na maksymalne niedoszacowanie strumieni ciepła jawnego rzędu 4–5 W m⁻². Wyraźnie większa wartość poprawki odnotowana została w przypadku strumienia ciepła utajonego. Osiągała ona



Rys. 5.12. Porównanie turbulentnych strumieni ciepła jawnego Q_H i utajonego Q_E oraz dwutlenku węgla FCO_2 i metanu FCH_4 w czerwcu 2014 roku w Kopytkowie (Biebrzański Park Narodowy), obliczonych za pomocą aplikacji EddyPro® w zależności od rodzaju poprawki na straty spektralne (NO – brak poprawki, LF – poprawka na niskie częstotliwości, HF – poprawka na wysokie częstotliwości, LF+HF – sumaryczna poprawka na straty spektralne)

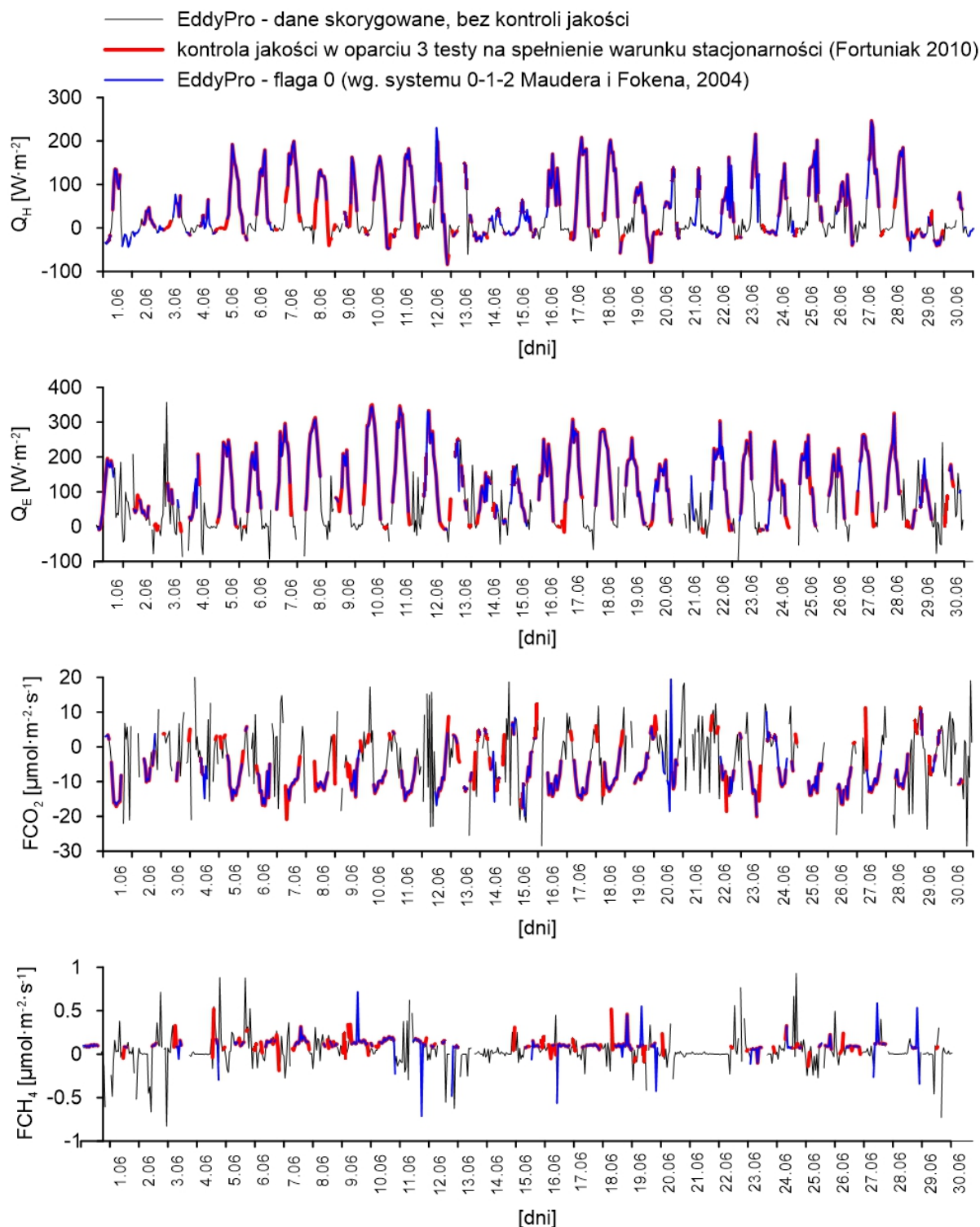


Rys. 5.13. Wartości poprawki na straty spektralne w funkcji strumienia ciepła jawnego Q_H i utajonego Q_E oraz dwutlenku węgla FCO_2 i metanu FCH_4 , bez korekcji na starty spektralne w czerwcu 2014 roku w Kopytkowie (Biebrzański Park Narodowy)

do $30\text{--}40\text{ W m}^{-2}$, co stanowiło około 10% wartości strumienia przed korekcją. Podobnie duże wartości poprawki na straty spektralne odnotowano w przypadku strumieni masy, do $2\text{--}3\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ (strumień dwutlenku węgla) oraz do $0,1\text{--}0,2\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ (strumień metanu). Oczywiście tak duże wartości poprawki na straty spektralne (w liczbach bezwzględnych) nie utrzymują się w ciągu całego roku – zdecydowanie niższe ich wartości obserwuje się w chłodnej połowie roku, kiedy turbulentna wymiana słabnie i wartości strumieni są wielokrotnie niższe. Nie zmienia to jednak faktu, że ten krok w całej procedurze obliczania strumieni turbulentnych bardzo wyraźnie koryguje ich wartość, co ma istotne znaczenie chociażby dla szacowania skumulowanej wymiany rocznej ciepła jawnego i utajonego oraz gazów cieplarnianych między podłożem a atmosferą.

5.3.4. Kontrola jakości danych

Wyznaczanie strumieni turbulencyjnych masy i energii jest czasochłonnym procesem, który, niezależnie jakim narzędziem jest rozwiązywany, musi być realizowany w oparciu o procedury w kolejności opisanej w poprzednich podrozdziałach i rozdziale 3. Należy jednak podkreślić, że otrzymanie wyników końcowych nie kończy całej procedury, ponieważ należy je poddać jeszcze procedurze kontroli jakości (Mauder i in., 2013). Wartości strumieni obliczane są w systemie ciągłym, np. co godzinę dla długiego okresu, rzędu roku i więcej. Turbulencja, która warunkuje transport masy i energii między podłożem a atmosferą jest jednak zmienna w czasie. Jeżeli jest w fazie intensywnego rozwoju, transport pionowy masy i energii odbywa się bez zakłóceń, jeżeli natomiast obserwowane jest jej osłabienie lub zanik, wartości strumieni (mimo wyliczonych pozornie prawidłowych wartości), mogą być efektem innych procesów, takich jak na przykład adwekcja ciepła lub gazów cieplarnianych z innych obszarów w otoczeniu stanowiska pomiarowego. Ze względu na brak możliwości obserwacji stopnia rozwoju turbulencji *in situ* (a także jednoznacznego kryterium definiującego fazy jej rozwoju), wartości strumieni wyliczone dla warunków niekorzystnych wykrywa się i odrzuca w trakcie obliczeń. Czynność ta jest obecnie integralnym etapem podsumowującym cały proces obliczania strumieni turbulencyjnych. Obejmuje on zastosowanie różnego rodzaju testów statystycznych, których zadaniem jest ocena czy każdy blok danych „raw” (np. 30-minutowy czy 1-godzinny) był zarejestrowany w warunkach prawidłowo rozwiniętej turbulencji oraz czy spełniony był warunek stacjonarności danych. Aplikacja EddyPro® wykorzystuje znany od ponad 10 lat system „flagowania” otrzymanych wyników, przy czym można zastosować jeden z trzech jego popularnych wariantów. Pierwszym ze stosowanych był system 1-9 zaproponowany przez Fokena (Lee i in., 2004), w którym flaga „1” oznaczała dane o najwyższej a „9” najniższej wartości. Uproszczeniem tego systemu są koncepcje zaproponowane przez Göckede (system 1-5, Göckede i in., 2006) oraz najpopularniejszy obecnie system 0-1-2 Fokena (Mauder i Foken, 2006), w którym dane oznaczone flagą „2” należy odrzucić. W praktyce działają one bardzo podobnie, dlatego najczęściej wykorzystuje się system 0-1-2. W powyższych systemach wykorzystuje się dwa rodzaje testów statystycznych. Zadaniem pierwszych jest ocena stacjonarności danych „raw” w kolejnych plikach, podczas gdy drugie oceniają stopień rozwoju turbulencji (szerzej zagadnienie to opisano w rozdziale 4). Po obliczeniach i skorygowaniu strumieni turbulencyjnych masy i energii w czerwcu 2014 roku otrzymano szereg danych (rys. 5.14), wskazujących na istnienie typowej dobowej zmienności wszystkich badanych strumieni. Krótkie luki w szeregach (poniżej 10% w całych szeregach) były następstwem opadów atmosferycznych, które uniemożliwiają prawidłowy pomiar fluktuacji mierzonych parametrów. System oceny jakości danych aplikacji EddyPro® zasugerował jednak, że danych najlepszej jakości (flaga „0” w systemie 0-1-2) jest znacznie mniej. W przypadku strumieni ciepła jawnego i utajonego flagą „0” oznaczonych zostało, odpowiednio 63,9 oraz 61,8% danych, podczas gdy dla strumieni gazów cieplarnianych odsetek był jeszcze mniejszy i wyniósł, odpowiednio 52,1 i 42,6% danych (rys. 5.14). Jak widać, system oceny wyraźnie różnicuje dane na te zmierzone w ciągu dnia (podczas dobrze rozwiniętej turbulencji) oraz nocne, kiedy słabo rozwinięta turbulencja, lub jej brak, sugerują, że wartości strumieni nie odpowiadają rzeczywistości, lub są efektem innych procesów, takich jak adwekcja czy gromadzenie się gazów cieplarnianych



Rys. 5.14. Turbulencyjne strumienie ciepła jawnego Q_H i utajonego Q_E oraz dwutlenku węgla FCO_2 i metanu FCH_4 w czerwcu 2014 roku w Kopytkowie (Biebrzański Park Narodowy), obliczone za pomocą aplikacji EddyPro[®] po korekcjach (czarna linia) oraz ocenione dwoma różnymi metodami kontroli jakości danych (linie czerwona i niebieska)

przy powierzchni Ziemi podczas bezwietrznych nocy. Wadą systemów kontroli jakości danych w aplikacji EddyPro[®] jest wykorzystanie jednego tylko testu sprawdzającego spełnienie warunku stacjonarności. Jest nim popularny, szeroko wykorzystywany test Fokena

(Foken i Wichura, 1996). Test ten jednak posiada pewne wady, a mianowicie nie do końca prawidłowo działa dla niewielkich wartości strumieni, zdarza mu się również odrzucać dane zarejestrowane w dobrych warunkach (Fortuniak, 2010). Z tego względu podczas wyznaczania strumieni turbulencyjnych masy i energii w Kopytkowie zastosowano rozwiązanie alternatywne, zakładające wykorzystanie trzech różnych testów oceniających stacjonarność szeregów. Jeżeli chociaż jeden z nich sugerował spełnienie tego warunku, takie dane oceniano jako nadające się do dalszych analiz (Fortuniak, 2010). Wyniki obliczeń strumieni turbulencyjnych z czerwca 2014 roku (rys. 5.14) pokazują, że zastosowanie takiego podejście wydaje się być mniej surowe i odrzuca mniejszą liczbę danych. W skali całego okresu badawczego eksperymentu pomiarowego w Kopytkowie (listopad 2012 – listopad 2015) system stosowany w aplikacji EddyPro® sugeruje, że odsetek „dobrych” danych Q_H , Q_E , FCO_2 i FCH_4 (spośród danych po korekcji i zarejestrowanych w okresach kiedy czynniki zewnętrzne nie zakłócały pomiarów) wynosi odpowiednio 63,8, 58,6, 51,6 i 50,1%. W przypadku rozwiązania alternatywnego odsetki te były większe i wyniosły, odpowiednio 83,4, 82,1, 75,7 i 78,1%. Ocena danych jest więc zagadnieniem równie problematycznym jak wybór rozwiązań podczas kolejnych etapów obliczania strumieni turbulencyjnych. Wieloletnie doświadczenia w pomiarach i obliczaniu strumieni sugerują, że nawet najbardziej skomplikowane operacje matematyczne i statystyczne należy poprzeć przeglądem szeregu danych, co bardzo często jest pomocne w wykrywaniu nieprawidłowych wyników, jak również pozwala na identyfikację danych błędnie określonych jako nieprawidłowe.

5.4. Piki wynikowe – zawartość oraz interpretacja

Wyznaczanie wartości strumieni turbulencyjnych jest czynnością nietypową w szerokim spektrum pomiarów meteorologicznych. Proces transportu turbulencyjnej wymiany masy i energii między podłożem a atmosferą jest bowiem na tyle skomplikowany, że do prawidłowej interpretacji wyników konieczne jest zapisywanie, oprócz wynikowych wartości strumieni, wielu parametrów dodatkowych. Aplikacja EddyPro® stosowana w trybie zaawansowanym również pod tym względem charakteryzuje się dużym stopniem zaawansowania. W Tabeli 5.3 zestawiono najważniejsze zmienne zapisywane do pliku wynikowego, oznaczonego jako „full_output” w trakcie obliczeń strumieni Q_H , Q_E , FH_2O , FCO_2 i FCH_4 podczas kampanii pomiarowej prowadzonej w Kopytkowie (Biebrzański Park Narodowy) od listopada 2012 roku. Zmienne te to, oprócz wartości strumieni, oznaczenia systemem flagowym ich jakości, ale również wartości strumieni przed korekcjami, dane dotyczące obszaru źródłowego, wariancje i kowariancje mierzonych parametrów czy dane dotyczące zmienności turbulencyjnej energii kinetycznej, prędkości tarciowej, czy stabilności atmosfery w trakcie pomiarów. Zmiennych tych jest aż 97, podczas gdy w rzeczywistym pliku jest ich około 2 razy więcej. Taka forma zapisu (w postaci pliku *.csv, który można łatwo przekonwertować na popularne pliki *.xls czy dowolny plik ASCII typu *.txt czy *.dat), zapewnia pełen zestaw danych koniecznych do dalszych analiz turbulencyjnej wymiany masy i energii. Aplikacja EddyPro® zapewnia również szeroką gamę plików dodatkowych oraz możliwości zapisu w formatach zapisu sugerowanych przez międzynarodowe sieci badawcze, takie jak np. AmeriFlux czy GHG-Europe (rys. 5.15). Można zatem w oddzielnych plikach zapisywać dane dotyczące otoczenia stanowiska (pliki

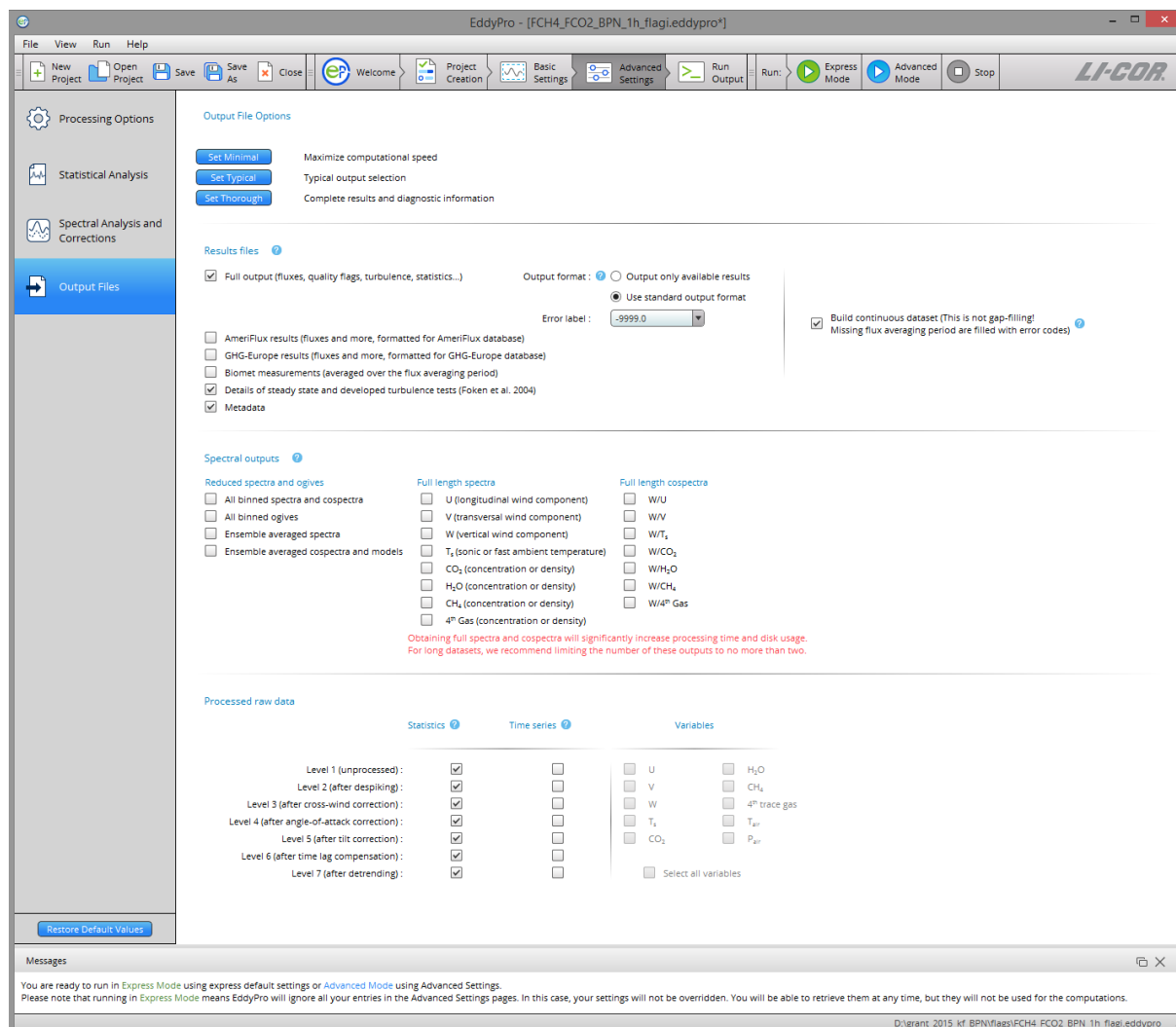
Tabela 5.3. Lista wybranych zmiennych w pliku wynikowym typu „full output” aplikacji EddyPro®

Lp.	zmienna	jednostka	Opis
1.	filename	-	Nazwa wczytanego pliku z danymi “raw”
2.	date	-	data
3.	time	-	Godzina
4.	file_records	-	Liczba prawidłowych linii danych w pliku z danymi “raw”
5.	used_records	-	Liczba linii danych “raw” wykorzystanych do dalszych obliczeń
6.	Tau	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$	Skorygowany strumień pędu
7.	qc_Tau	-	Flaga jakości danych strumienia pędu
8.	H	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	Skorygowany strumień ciepła jawnego
9.	qc_H	-	Flaga jakości danych strumienia ciepła jawnego
10.	LE	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	Skorygowany strumień ciepła utajonego
11.	qc_LE	-	Flaga jakości strumienia ciepła utajonego
12.	co2_flux	$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	Skorygowany strumień dwutlenku węgla
13.	qc_co2_flux	-	Flaga jakości danych strumienia dwutlenku węgla
14.	h2o_flux	$\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	Skorygowany strumień pary wodnej
15.	qc_h2o_flux	-	Flaga jakości danych strumienia pary wodnej
16.	ch4_flux	$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	Skorygowany strumień metanu
17.	qc_ch4_flux	-	Flaga jakości danych strumienia metanu
18.	H_strg	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	Strumień ciepła jawnego - storage
19.	LE_strg	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	Strumień ciepła utajonego – storage
20.	co2_strg	$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	Strumień dwutlenku węgla – storage
21.	h2o_strg	$\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	Strumień pary wodnej – storage
22.	ch4_strg	$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	Strumień metanu – storage
23.	co2_v-adv	$\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$	Pionowa adwekcja dwutlenku węgla
24.	h2o_v-adv	$\text{mmol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$	Pionowa adwekcja pary wodnej
25.	ch4_v-adv	$\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$	Pionowa adwekcja metanu
26.	co2_molar_density	$\text{mmol} \cdot \text{m}^{-3}$	Mierzona lub estymowana koncentracja dwutlenku węgla
27.	co2_mole_fraction	$\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$	Mierzona lub estymowana koncentracja dwutlenku węgla
28.	co2_mixing_ratio	$\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$	Mierzona lub estymowana koncentracja dwutlenku węgla
29.	h2o_molar_density	$\text{mmol} \cdot \text{m}^{-3}$	Mierzona lub estymowana koncentracja pary wodnej
30.	h2o_mole_fraction	$\text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$	Mierzona lub estymowana koncentracja pary wodnej
31.	h2o_mixing_ratio	$\text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$	Mierzona lub estymowana koncentracja pary wodnej
32.	ch4_molar_density	$\text{mmol} \cdot \text{m}^{-3}$	Mierzona lub estymowana koncentracja metanu
33.	ch4_mole_fraction	$\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$	Mierzona lub estymowana koncentracja metanu
34.	ch4_mixing_ratio	$\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$	Mierzona lub estymowana koncentracja metanu
35.	sonic_temperature	K	Temperatura soniczna mierzona przez anemometr soniczny
36.	air_temperature	K	Średnia temperatura powietrza
37.	air_pressure	Pa	Średnie ciśnienie atmosferyczne
38.	air_density	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Gęstość powietrza
39.	air_heat_capacity	$\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$	Ciepło właściwe powietrza
40.	ET	$\text{mm} \cdot \text{hour}^{-1}$	parowanie
41.	water_vapor_density	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Gęstość pary wodnej
42.	e	Pa	Prężność pary wodnej
43.	es	Pa	Prężność pary wodnej nasyconej
44.	specific_humidity	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Wilgotność właściwa
45.	RH	%	Wilgotność względna
46.	VPD	Pa	Niedosyt wilgotności
47.	Tdew	K	Temperatura punktu rosy
48.	u_unrot	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Średnia składowa u wiatru przed rotacją
49.	v_unrot	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Średnia składowa v wiatru przed rotacją
50.	w_unrot	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Średnia składowa w wiatru przed rotacją
51.	u_rot	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Średnia składowa u wiatru po rotacji

52.	v_rot	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Średnia składowa v wiatru po rotacji
53.	w_rot	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Średnia składowa w wiatru po rotacji
54.	wind_speed	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Średnia prędkość wiatru
55.	max_wind_speed	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Maksimum prędkości wiatru
56.	wind_dir	° (deg)	Kierunek wiatru
57.	yaw	° (deg)	Pierwszy kąt rotacji
58.	pitch	° (deg)	Drugi kąt rotacji
59.	u*	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Prędkość tarciova
60.	TKE	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	Turbulencyjna energia kinetyczna
61.	L	m	Długość Monia Obuchowa
62.	(z-d)/L	-	Parametr stabilności
63.	bowen_ratio	-	Współczynnik Bowena
64.	(footprint) model	-	Model estymujący footprint
65.	x_offset	m	Odległość udziału strumienia turbulencyjnego poniżej 1%
66.	x_peak	m	Odległość największego udziału strumienia turbulencyjnego
67.	x_10%	m	Odległość 10% udziału strumienia turbulencyjnego
68.	x_30%	m	Odległość 30% udziału strumienia turbulencyjnego
69.	x_50%	m	Odległość 50% udziału strumienia turbulencyjnego
70.	x_70%	m	Odległość 70% udziału strumienia turbulencyjnego
71.	x_90%	m	Odległość 90% udziału strumienia turbulencyjnego
72.	un_Tau	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$	Nieskorygowany strumień pędu
73.	Tau_scf	-	Poprawka na straty spektralne dla strumienia pędu
74.	un_H	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	Nieskorygowany strumień ciepła jawnego
75.	H_scf	-	Poprawka na straty spektralne dla strumienia ciepła jawnego
76.	un_LE	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	Nieskorygowany strumień ciepła utajonego
77.	LE_scf	-	Poprawka na straty spektralne dla strumienia ciepła utajonego
78.	un_co2_flux	$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	Nieskorygowany strumień dwutlenku węgla
79.	co2_flux_scf	-	Poprawka na straty spektralne dla strumienia dwutlenku węgla
80.	un_h2o_flux	$\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	Nieskorygowany strumień pary wodnej
81.	h2o_flux_scf	-	Poprawka na straty spektralne dla strumienia pary wodnej
82.	un_ch4_flux	$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	Nieskorygowany strumień metanu
83.	ch4_flux_scf	-	Poprawka na straty spektralne dla strumienia metanu
84.	spikes	HFu/v/w/ts/co2 /h2o/ch4/n2	Liczba "spikes" dla każdej mierzonej zmiennej
85.	abs_lim	HFu/v/w/ts/co2 /h2o/ch4/n2	Liczba odrzuconych danych każdej zmiennej ze względu na przekroczony zakres
86.	RSSI	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$	Średnia wartość Relative Signal Strength Indicator (LI7700)
87.	u_var	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$	Wariancja zmiennej u
88.	v_var	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$	Wariancja zmiennej v
89.	w_var	K^2	Wariancja zmiennej w
90.	ts_var	-	Wariancja temperatury powietrza
91.	co2_var	-	Wariancja koncentracji dwutlenku węgla
92.	h2o_var	-	Wariancja koncentracji pary wodnej
93.	ch4_var	-	Wariancja koncentracji metanu
94.	w/ts_cov	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}$	Kowariancja zmiennych w i temperatury powietrza
95.	w/co2_cov	-	Kowariancja zmiennych w i koncentracji dwutlenku węgla
96.	w/h2o_cov	-	Kowariancja zmiennych w i koncentracji pary wodnej
97.	w/ch4_cov	-	Kowariancja zmiennych w i koncentracji metanu

metadata), szczegółowe statystyki wyznaczane podczas procesu kontroli jakości danych, jak również wyliczone przez aplikację spektra i ko-spektra zmiennych. Szczególnie cennym wydaje się zapis (w oddzielnym katalogu) plików z wartościami strumieni i innych parametrów po każdym z kroków procedury obliczania strumieni turbulencyjnych.

W przypadku wątpliwości co do otrzymanych wartości, zestawienia te są niezwykle pomocne w ich rozstrzygnięciu.



Rys. 5.15. Aplikacja EddyPro® - panel wyboru danych zapisywanych do plików wynikowych

5.5. Podsumowanie

Aplikacja EddyPro® jest niezwykle funkcjonalnym narzędziem umożliwiającym sprawne, automatyczne i bardzo dokładne obliczanie strumieni turbulencyjnych masy i energii. Przede wszystkim wyposażono ją w czytelny i funkcjonalny interfejs, który usprawnia prowadzenie obliczeń. Podczas jednego cyklu obliczeniowego aplikacja wyznacza jednocześnie strumienie ciepła jawnego i utajonego oraz strumienie gazów cieplarnianych (pary wodnej, dwutlenku węgla i metanu). Inną jej zaletą jest prowadzenie obliczeń w formie projektu, z dodatkowym plikiem typu *.metadata, który jest zapisem konfiguracji aplikacji dla konkretnego stanowiska pomiarowego. Po przeniesieniu go wraz z danymi „raw” na inny komputer eliminuje to konieczność ponownej konfiguracji aplikacji i umożliwia szybkie wznowienie obliczeń. Ważną cechą jest również możliwość wczytywania danych

pochodzących z bardzo różnych przyrządów (nie tylko tych produkowanych przez firmę LI-COR) oraz sformatowanych w praktycznie dowolny sposób. W trybie zaawansowanym aplikacja umożliwia podjęcie decyzji o zastosowaniu różnych rozwiązań matematyczno-statystycznych dla każdego kroku podczas wyznaczania strumieni turbulencyjnych masy i energii. Można również śledzić wkład kolejnych poprawek w korygowanie wstępnie obliczonych strumieni, jak również zapisać w plikach szerokie spektrum parametrów dodatkowych, ułatwiających dalszą analizę wyników. Wszystkie powyższe zalety, jak również to, że EddyPro® jest aplikacją ciągle rozwijaną i poprawianą, powoduje, że w chwili obecnej uznaje się ją za standardowe narzędzie obliczeniowe w mikrometeorologicznych badaniach nad wymianą ciepła oraz gazów cieplarnianych między powierzchnią w dowolnym stopniu przekształconą przez człowieka a atmosferą. Opisana w kolejnych podrozdziałach tej części opracowania wszechstronność aplikacji, przejawiająca się mnogością rozwiązań i kombinacji poprawek i procedur możliwych do zastosowania podczas obliczeń, paradoksalnie wydaje się być też jej słabą stroną. Istnienie standardowego narzędzia zapewnia rzecz jasna reprezentatywność i porównywalność wyników pochodzących ze stanowisk realizujących pomiary na terenach o często zdecydowanie odmiennych cechach aerodynamicznych i przyrodniczych. Problemem wymagającym jednak szerszego spojrzenia jest pytanie czy rzeczywiście to standardowe narzędzie dostarcza standardowych wyników. Wiele grup badawczych wykorzystuje w swoich badaniach EddyPro®, ale jeżeli każda z nich używa trybu zaawansowanego z własną kombinacją rozwiązań poprawek, porównywalność wyników należy traktować z pewną ostrożnością. Opisane wcześniej możliwości zastosowania różnych rozwiązań podczas tylko kilku etapów obliczania strumienia turbulencyjnych masy i energii (na przykładzie danych z Kopytkowa w Biebrzańskim Parku Narodowym), pokazują, że subiektywny ich wybór może wpływać znacząco na otrzymane wyniki. Przyczyna takiej sytuacji w rzeczywistości tkwi poza aplikacją (jak również poza każdą inną aplikacją, czy autorskim zestawem programów obliczeniowych sporządzanych przez różne grupy badawcze), ponieważ sama metoda kowariancji wirów, mimo bardzo szerokiego jej zastosowania na całym świecie, wciąż znajduje się w fazie rozwoju (Baldocchi i in., 1988; Lee i in., 2004; Foken, 2008; Fortuniak, 2012; Aubinet i in., 2012; Baldocchi, 2014; Fratini i in., 2014). Pomimo ustalenia najważniejszych zasad definiujących prawidłowy pomiar i obliczanie strumieni turbulencyjnych masy i energii, trudno w jednoznaczny sposób ocenić precyzję i jakość otrzymanych wyników.

Praca wykonana w ramach projektu “Bilans absorpcji i emisji gazów cieplarnianych (metanu, dwutlenku węgla i pary wodnej) na obszarach bagiennych (studium Biebrzańskiego Parku Narodowego)” sfinansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2011/01/B/ST10/07550. Autorzy dziękują Dyrekcji Biebrzańskiego Parku Narodowego za umożliwienie prowadzenia badań na terenie Parku oraz Państwu Krystynie i Adamowi Raczkowskim z gospodarstwa agroturystycznego „Dworek na końcu świata” za opiekę nad stanowiskiem pomiarowym.

Literatura

- Aubinet, M., Vesala, T., Papale, D. (red.), 2012, *Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis*, Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 438 s.
- Baldocchi, D., 2003, Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future, *Global Change Biol.*, 9, 479–492.
- Baldocchi, D., 2013, A Brief History on Eddy Covariance Flux Measurements: A Personal Perspective, *FluxLetter*, 5(2), 1–8.
- Baldocchi, D., 2014, Measuring fluxes of trace gases and energy between ecosystems and the atmosphere – the state and future of the eddy covariance method, *Glob. Change Biol.* 20, 3600–3609.
- Baldocchi, D., Falge, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., Anthoni, P., Bernhofer, C., Davis, K., Evans, R., Fuentes, J., Goldstein, A., Katul, G., Law, B., Lee, Z., Malhi, Y., Meyers, T., Munger, W., Oechel, W., Paw, U., Pilegaard, K., Schmid, H., Valentini, R., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K., Wofsy, S., 2001, FLUXNET: A New Tool to Study the Temporal and Spatial Variability of Ecosystem-Scale Carbon Dioxide, Water Vapor, and Energy Flux Densities, *Bulletin of American Meteorological Society*, 82, 2415–2434.
- Baldocchi, D., Hicks, B., Meyers, T., 1988, Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods, *Ecology*, 69, 1331–1340.
- Beverland, I.J., Ónéill, D.H., Scott, S.L., Moncrieff, J.B., 1996, Design, construction and operation of flux measurement systems using the conditional sampling technique, *Atmos. Environ.*, 30, 3209–3220.
- Burba, G., 2013, *Eddy Covariance Method for Scientific, Industrial, Agricultural and Regulatory Applications. A Field Book on Measuring Ecosystem Gas Exchange and Areal Emission Rates*. LI-COR Biosciences, Lincoln, Nebraska, 345 s.
- Burba, G., Schmidt, A., Scott, R.L., Nakai, T., Kathilankal, J., Fratini, G., Hanson, C., Law, B., McDermitt, D.K., Eckles, R., Furtaw, M., Velgersdyk, M., Calculating CO₂ and H₂O eddy covariance fluxes from an enclosed gas analyzer using an instantaneous mixing ratio, *Global Change Biology*, 18, 385–399.
- Culf, A.D., 2000, Examples of the effects of different averaging methods on carbon dioxide fluxes calculated using the eddy correlation method, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 4(1), 193–198.
- Finnigan, J.J., Clements, R., Malhi, Y., Leuning, R., Cleugh, H., 2003, A re-evaluation of long-term flux measurement techniques. Part I: Averaging and coordinate rotation, *Boundary-Layer Meteorol.*, 107, 1–48.
- Foken, T., 2008, *Micrometeorology*, Springer, Berlin, 306 s.
- Foken, T., Wichura, B., 1996, Tools for quality assessment of surface based flux measurements, *Agr. Forest Meteorol.*, 78, 83–105.
- Fortuniak, K., 2010, *Radiacyjne i turbulencyjne składniki bilansu cieplnego terenów zurbanizowanych na przykładzie Łodzi*, Wyd. UŁ, Łódź, 232 s.
- Franceschi, M. de, Zardi, D., 2003, Evaluation of cut-off frequency and correction of filter-induced phase lag and attenuation in eddy covariance analysis of turbulence data, *Boundary-Layer Meteorol.*, 108, 289–303.
- Fratini, G., Mauder, M., 2014, Towards a consistent eddy-covariance processing: an intercomparison of EddyPro and TK3, *Atmos. Meas. Tech.*, 7, 2273–2281.
- Fratini, G., McDermitt, D.K., Papale, D., 2014, Eddy-covariance flux errors due to biases in gas concentration measurements: origins, quantification and correction, *Biogeosciences*, 11, 1037–1051, doi:10.5194/bg-11-1037-2014.

- Gallagher, M.W., Clayborough, R., Beswick, K.M., Hewitt, C.N., Owen, S., Moncrieff, J., Pilegaard, K., 2000, Assessment of a relaxed eddy accumulation for measurements of fluxes of biogenic volatile organic compounds: Study over arable crops and a mature beech forest, *Atmos. Environ.*, 34, 2887–2899.
- Göckede, M., Rebmann, C., Foken, T., 2006, A combination of quality assessment tools for eddy covariance measurements with footprint modelling for the characterisation of complex sites, *Agr. Forest Meteorol.*, 127, 175–188.
- Hsieh, C.-I., Katul, G., Chi, T., 2000, An approximate analytical model for footprint estimation of scalar fluxes in thermally stratified atmospheric flows, *Advances in Water Resources*, 23, 765–772.
- Horst, T.W., 1997, A simple formula for attenuation of eddy fluxes measured with first-order-response scalar sensors, *Boundary-Layer Meteorol.*, 82, 219–233.
- Horst, T.W., Lenschow, D.H., 2009, Attenuation of Scalar Fluxes Measured with Spatially-displaced Sensors, *Boundary-Layer Meteorol.*, 130, 275–300.
- Kaimal, J.C., Finnigan, J.J., 1994, *Atmospheric boundary flows. their structure and measurement*, Oxford Univ. Press, 289 s.
- Kljun, N., Calanca, P., Rotach, M.W., Schmid, H.P., 2004, A simple parameterization for flux footprint predictions, *Boundary-Layer Meteorol.*, 112, 503–523.
- Kormann, R., Meixner, F.X., 2001, An Analytical Footprint Model For Non-Neutral Stratification, *Boundary-Layer Meteorol.*, 99, 207–224.
- Lee, X., Massman W.J., Law, B. (red.), 2004, *Handbook of micrometeorology: A guide for surface flux measurement and analysis*, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, 250 s.
- Lenschow, D.H., Mann, J., Kristensen, L., 1994, How long is long enough when measuring fluxes and other turbulence statistics?, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 11, 661–673.
- Massman, W.J., 2000, A simple method for estimating frequency response corrections for eddy covariance systems, *Agr. Forest Meteorol.*, 104, 185–198.
- Mauder, M., Cuntz, M., Drüe, C., Graf, A., Rebmann, C., Schmid, H.P., Schmidt, M., Steinbrecher, R., 2013, A strategy for quality and uncertainty assessment of long-term eddy-covariance measurements, *Agr. Forest Meteorol.*, 169, 122–135.
- Mauder, M., Foken, T., 2006, Impact of post-field data processing on eddy covariance flux estimates and energy balance closure, *Meteorol. Z.*, 15, 597–609.
- Mauder, M., Foken, T., 2011, *Documentation and Instruction Manual of the Eddy-Covariance Software Package TK3*. Universität Bayreuth, Abteilung Mikrometeorologie, 46, 60 s.
- Mauder, M., Foken, T., Clement, R., Elbers, J.A., Eusgter, W., Grünwald, T., Heusinkveld, B., Kolbe, O., 2008, Quality control of CarboEurope flux data – Part 2: Inter-comparison of eddy-covariance software, *Biogeosciences*, 5, 451–462.
- Mauder, M., Oncley, S.P., Vogt, R., Weidinger, T., Ribeiro, L., Bernhofer, C., Foken, T., Kohsiek, W., de Bruin, H.A.R., Liu, H., 2007, The Energy Balance Experiment EBEX-2000. Part II: Intercomparison of eddy-covariance sensors and post-field data processing methods, *Boundary-Layer Meteorol.*, 123, 29–54.
- McDermitt, D., Burba, G., Xu, L., Anderson, T., Komissarov, A., Riensche, B., Schedlbauer, J., Starr, G., Zona, D., Oechel, W., Oberbauer, S., Hastings, S., 2011, A new low-power, open path instrument for measuring methane flux by eddy covariance, *Applied Physics B: Laser and Optics*, 102, 391–405.
- McMillen, R.T., 1988, An eddy correlation technique with extended applicability to non simple terrain, *Boundary-Layer Meteorol.*, 43, 231–245.

- Moncrieff, J.B., Clement, R., Finnigan, J.J., Meyers, T., 2004, Averaging and de-trending. w: X. Lee, W. Massman, B. Law (red.), Handbook of Micrometeorology: A guide for surface flux measurement and analysis, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, 7–31.
- Moncrieff, J.B., Massheder, J.M., de Bruin, H., Elbers, J., Friborg, T., Heusinkveld, B., Kabat, P., Scott, S., Soegaard, H., Verhoef, A., 1997, A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapor and carbon dioxide, Journal of Hydrology, 188–189, 589–611.
- Rannik, Ü., Vesala, T., 1999, Autoregressive filtering versus linear detrending in estimation of fluxes by the eddy covariance method, Boundary-Layer Meteorol., 91(2), 259–280.
- Rebmann, C., Kolle, O., Heinesch, B., Queck, R., Ibrom, A., Aubinet, M., 2012, Data Acquisition and Flux Calculations. w: M. Aubinet, T. Vesala, D. Papale (red.), Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis, Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York., 59–84.
- Stull, R.B., 1988, *An introduction to boundary layer meteorology*, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, 666 s.
- Trevino, G., Andreas, E.L., 2006, Dynamical implications of block averaging, Boundary-Layer Meteorol., 120, 497–508.
- van Dijk, A., Moene, A.F., de Bruin, H.A.R., 2004, The principles of surface flux physics: Theory, practice and description of the ECPACK library, Internal Report 2004/1, Meteorology and Air Quality Group, Wageningen University, Wageningen, the Netherlands, 99 s.
- Wilczak, J.M., Oncley, S.P., Stage, S.A., 2001, Sonic Anemometer Tilt Correction Algorithms. Boundary-Layer Meteorol., 99, 127–150.

Application of EddyPro[®] software for calculation of turbulent fluxes of heat and energy with use of eddy covariance method (Kopytkowo, Biebrza National Park case study)

Abstract

The chapter focuses on the problem of calculating the turbulent fluxes of mass and energy and procedures used in the case of data greenhouse gases fluctuations in the air measured by sensors equipped with an open path. The most popular and widely available application EddyPro[®] developed by company LI-COR (USA) has been discussed. On the basis of its operation a wide range of problems encountered during turbulent fluxes has been shown. Moreover, the chapter describes in details the advantages of the program, discusses how to import data, describes all the steps of calculations, express and advanced mode of its action and the method of recording data in output files. On the basis of selected parts of measurements carried out in Kopytkowo (Biebrza National Park) selected problems associated with the application of procedures and corrections resolved by different methods has been emphasized.

Key words: turbulent flux, eddy covariance method, calculation methodology