

**FOTOGRAMETRYCZNE OKREŚLENIE PRZEMIESZCZEŃ GRUNTU  
W TRAKCIE LABORATORYJNEGO EKSPERYMENTU GEOTECHNICZNEGO**

**THE PHOTOGRAMMETRIC DETERMINATION OF SOIL DISLOCATIONS  
DURING A GEOTECHNICAL LABORATORY EXPERIMENT**

**Jerzy Mialdun**

Katedra Fotogrametrii i Teledetekcji, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

**SŁOWA KLUCZOWE:** fotogrametria, eksperyment geotechniczny, numeryczny model powierzchni, wymiar fraktalny

**STRESZCZENIE:** W laboratorium geotechnicznym Politechniki Gdańskiej prowadzone są badania przemieszczania się gruntu naciskanego stopą fundamentową budowli. Odbywa się to w urządzeniu specjalnie skonstruowanym dla tego celu. Jest to skrzynia z jedną ścianką wykonaną ze szkła. Typowy eksperyment tam prowadzony to eksperyment ze „smugami”. Do skrzyni wysypuje się odpowiednio spreparowany jasny piasek na przemian z piaskiem ciemniejszym. Grunt naciskany stopą odkształca się. Kierunki odkształceń są widoczne przez szybę. Mankamentem tej metody okazuje się brak możliwości pomiaru kierunku i długości przesunięć. Rozwinięciem tej metody jest zastąpienie smug znacznikami przylegającymi do szyby. Kilkanaście prób potwierdziło przydatność tej metody. Technika jednoobrazowej cyfrowej fotogrametrii można określić kierunki i długości przemieszczeń znaczników.

W pracy przedstawione są wyniki jednego z eksperymentów z propozycjami graficznej ich prezentacji oraz generowania cyfrowego „smug”. Przedstawiono też metodę obliczania wymiaru fraktalnego, który charakteryzuje dynamikę zmian zachodzących w odkształcanym gruncie.

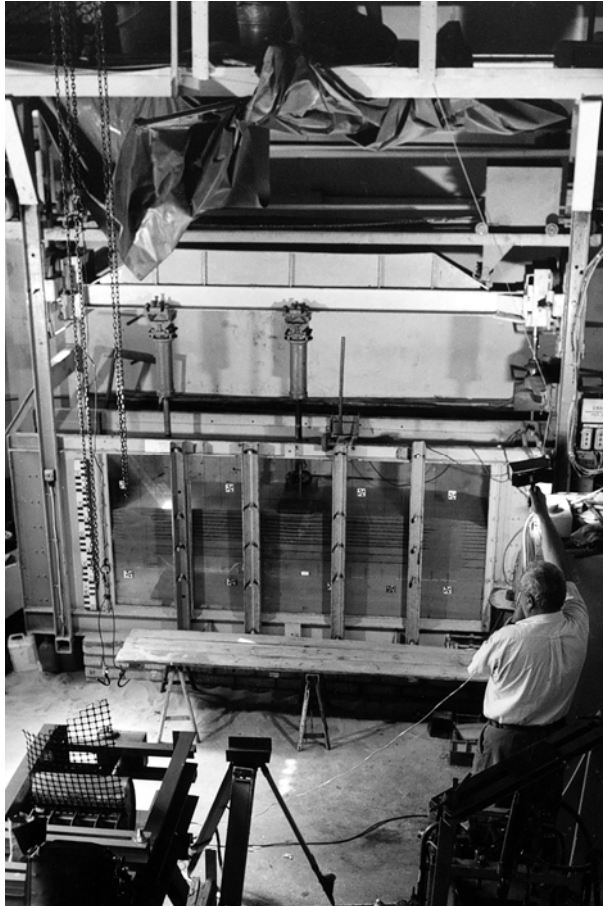
## **1. WSTĘP**

Geotechnika to dział geologii inżynierskiej zajmujący się określaniem fizycznych właściwości gruntu (zwłaszcza metodami laboratoryjnymi) w celu ustalenia warunków budowlanych. Wynikiem takich badań jest ocena stanu podłoża budowlanego z określeniem zasięgu osłabień gruntu.

Od kilku lat pracownicy Katedry Geotechniki Wydziału Nauk Technicznych UWM w Olsztynie prowadzą modelowe badania laboratoryjne dynamiki przemieszczeń gruntu pod naciskiem stopy fundamentowej budowli. Autorzy tego artykułu mieli sposobność wykonania fotogrametrycznej rejestracji przemieszczeń gruntu w czasie trwania eksperymentów i opracowania wyników. Podczas wielokrotnego omawiania wyników badań często pojawiał się temat wysokich kosztów prac fotogrametrycznych. Kierując się sugestiami geotechników powstał pomysł stworzenia narzędzia do cyfrowej obróbki wyników rejestracji fotogrametrycznej.

## 2. TECHNICZNE ASPEKTY EKSPERYMENTÓW

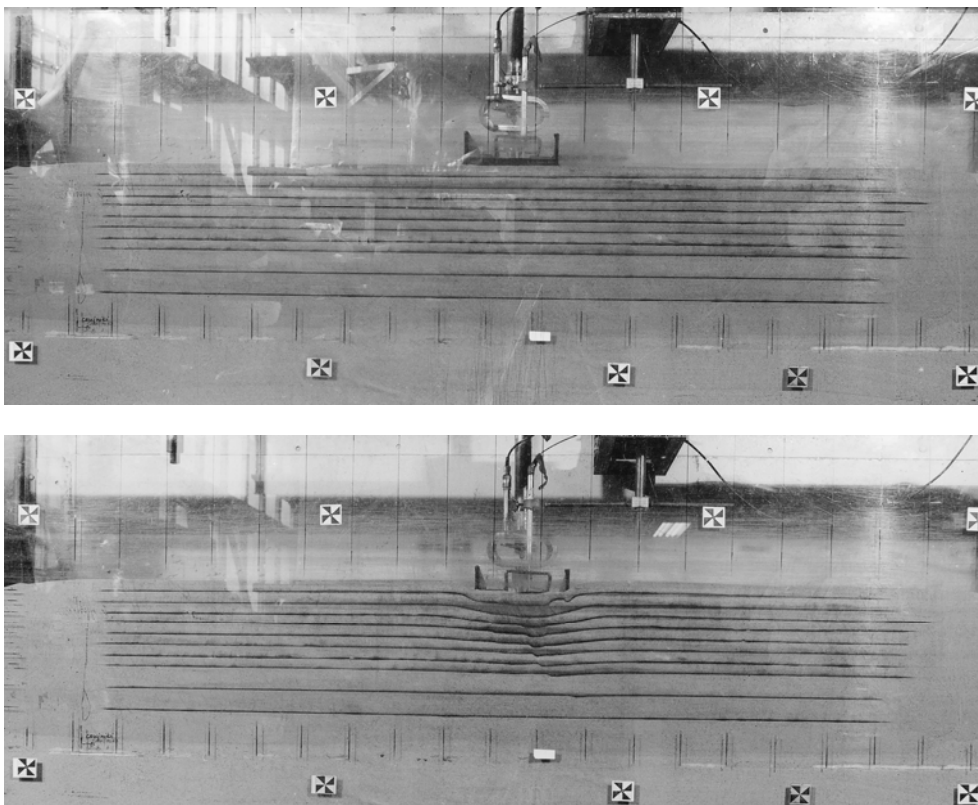
Eksperymenty prowadzone były w laboratorium geotechnicznym Politechniki Gdańskiej. Urządzenie do modelowania nacisku stopy fundamentowej na grunt to stalowa otwarta z góry skrzynia o prostokątnym dnie i szklanym jednym boku (Rys. 1).



Rys. 1. Widok urządzenia do prowadzenia eksperymentów geotechnicznych

Do skrzyni, w pierwszej wersji eksperymentów, nasypywany był piasek czysty, oraz zabarwiony sadzą o znanych cechach granulometrycznych. Cienkie warstwy ciemnego piasku tworzyły smugi, które pod działaniem siły nacisku miały pokazywać kierunki odkształcania się gruntu. Stopa fundamentowa, wykonana ze stalowego ceownika o szerokości ok. 30 cm, podlegała naciskowi mechanizmu śrubowego napędzanego silnikiem elektrycznym. Przesunięcie ceownika oraz siłę nacisku monitorowały czujniki połączone z komputerem.

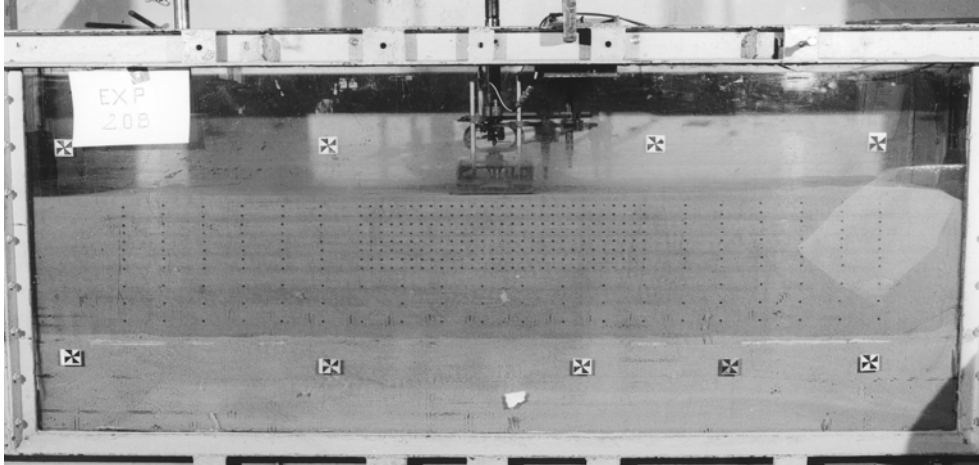
Po zakończeniu eksperymentu zespół badawczy stwierdził z przykrością, że rejestracja fotogrametryczna tak zaprojektowanego eksperymentu nie wnosi istotnych danych (rys. 2).



Rys. 2. Obraz smug przed i po zakończeniu eksperymentu

W drugiej wersji, po analizie wyników eksperymentu ze smugami, do skrzyni nasypywany był piasek o znanych cechach granulometrycznych a na styku gruntu z szybą umieszczano wg ustalonego wzorca kontrolne znaczki pomiarowe. Każdy znaczek wykonany był z czarnego tworzywa w kształcie stożka. Podstawa stożka miała średnicę 3 mm z białą plamką o średnicy 1 mm pośrodku. Wysokość stożka była równa 3 mm. Znaczki umieszczano tak aby po obsypaniu piaskiem ich podstawy przylegały do szyby (rys. 3). Na szybie urządzenia naklejono znaki w kształcie zbliżonym do krzyża maltańskiego. Na podstawie bezpośrednich pomiarów liniowych i niwelacji geometrycznej obliczono ich współrzędne w układzie lokalnym. Błąd położenia tych fotopunktów po wyrównaniu nie przekroczył  $\pm 0.4$  mm. Pierwsze eksperymenty prowadzone były w środkowej części urządzenia i dlatego najpierw założono sieć pięciu fotopunktów tworzących czworobok o wymiarach ok. 1 m na 1m. Piąty punkt służył do orientacji kamery i jako punkt kontrolny do oceny dokładności. Cztery kolejne – zewnętrzne fotopunkty dodano w fazie badań zajmujących całą przestrzeń urządzenia. Część punktów,

na pierwszy rzut oka, leży prawie na jednej prostej. Fakt ten nie ma jednak wpływu na możliwość wyznaczenia położenia znaczków kontrolnych, o czym będzie mowa później.



Rys. 3. Widok znaczków umieszczonych w pisku za szybą urządzenia

Stanowisko kamery UMK 10/1318 wyznaczono i zastabilizowano w podłodze w odległości 2,8 m od środka płaszczyzny szyby. Zdjęcia wykonywano na płytach ORWO TO1 orientując oś kamery prostopadle do płaszczyzny szyby urządzenia. Pierwsze zdjęcie wykonywano przed włączeniem mechanizmu naciskającego, następne co 10 minut do chwili utraty stabilności gruntu. Rejestracja fotogrametryczna trwała zazwyczaj 17 do 35 minut. Po wywołaniu negatywów współrzędne tłowe fotopunktów i znaczków kontrolnych mierzono na stereokomparatorze Stecometer C. W tym przypadku pełnił on rolę monokomparatora.

Różnicowy charakter pomiarów był osiągnięty przez wykonywanie zdjęć z tego samego stanowiska przy niezmienniej orientacji. Wpływ grubości na 25 mm szyby urządzenia laboratoryjnego, za którą umieszczone były znaczki kontrolne oraz dystorsji obiektywu kamery na położenie ich obrazów na zdjęciu w tym zadaniu był nieistotny.

Do obliczenia współrzędnych znaczków kontrolnych w układzie lokalnym fotopunktów wykorzystano następujący algorytm:

Przekształcenie rzutowe płaszczyzn wyrażone jest następującą zależnością:

$$x = \frac{AX + BY + C}{DX + EY + 1} \quad \text{oraz} \quad y = \frac{FX + GY + H}{DX + EY + 1} \quad (1)$$

gdzie:

A... H - to parametry przekształcenia, x, y, X, Y – współrzędne fotopunktów w obu płaszczyznach (zdjęcia i urządzenia laboratoryjnego).

Kiedy par punktów jest więcej niż 4 można napisać układ równań poprawek w postaci:

$$AX + BY + C - DxX - ExY - x = vx \quad (2)$$

$$- DyX - EyY + FX + GY + H - y = vy \quad (3)$$

Po ułożeniu układu równań normalnych i rozwiązaniu go otrzymujemy poprawki do współrzędnych fotopunktów w układzie zdjęcia. W oparciu o poprawione współrzędne  $x_w$ ,  $y_w$  oraz współrzędne fotopunktów  $X$ ,  $Y$  wykorzystując zależności:

$$X = \frac{A_1 x_w + B_1 y_w + C_1}{D_1 x_w + E_1 y_w + 1} \quad \text{oraz} \quad Y = \frac{F_1 x_w + G_1 y_w + H_1}{D_1 x_w + E_1 y_w + 1} \quad (4)$$

wyznaczamy współczynniki  $A_1 \dots H_1$  i obliczamy współrzędne przetworzone zmierzonych na zdjęciu znaczków kontrolnych.

Istotną i bardzo czasochłonną czynnością jest utworzenie par współrzędnych tych samych znaczków kontrolnych zarejestrowanych w różnym czasie. Na urządzenie laboratoryjne przenoszone są wibracje silnika elektrycznego napędzającego mechanizm śrubowy naciskający stopę fundamentową. Pod ich wpływem między część znaczków kontrolnych a szybę wciska się badany grunt. W ten sposób powstają obserwacje „sieroty” (bez pary). Usunięcie ich ze zbiorów wymaga czasu i cierpliwości. Po pokonaniu tego etapu można wyznaczyć z obliczonych współrzędnych:

- składowe wektorów przesunięcia znaczków kontrolnych  $\Delta X$  i  $\Delta Y$ ,
- długości wektorów przesunięć znaczków kontrolnych  $D$ ,
- wektory prędkości przesunięcia znaczków kontrolnych  $V$ .

W oparciu o te dane można stworzyć wykres przesunięć znaczków kontrolnych, a po wytworzeniu numerycznego modelu powierzchni (NMP) składowych  $\Delta X$  i  $\Delta Y$  oraz prędkości  $V$  wykresy równych przesunięć składowych i równych prędkości w postaci izolinii.

Mowa tu jest o parze współrzędnych znaczków kontrolnych, ale można prześledzić również drogę po jakiej poruszał się taki znaczek w dowolnie zadanych odcinkach czasowych. To zadanie wymaga jeszcze większej uwagi zwłaszcza gdy przesunięcia są duże i bliskie odległości początkowej między rzędami znaczków kontrolnych. Jeszcze trudniejsze jest tu wyeliminowanie „punktów-sierot” pozbawionych pary.

Po analizie wyników uzyskanych przy zastosowaniu analogowych fotogrametrycznych urządzeń pomiarowych postanowiono wykorzystać możliwości leżące w fotogrametrii obrazów cyfrowych. Za takim rozwiązaniem przemawiały przede wszystkim:

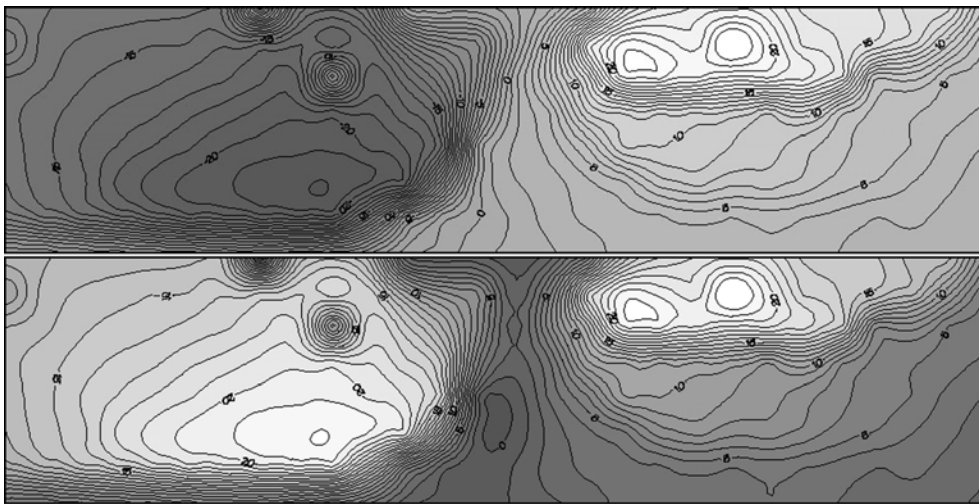
- trudny i kosztowny dostęp do specjalistycznych urządzeń fotogrametrycznych,
- powszechność i łatwość użytkowania dobrej klasy komputerów osobistych,
- porównywalne dokładności uzyskiwane z użyciem obrazów cyfrowych i technik komputerowych.

Pierwszym etapem było przetworzenie analogowych zdjęć fotogrametrycznych na postać cyfrową. Obrazy skanowano z rozdzielczością 1000 DPI, którą uznano wstępnie za optymalną dla jakości i ekonomiczności opracowania. Przy takim poziomie rozdzielczości na  $1 \text{ mm}^2$  w płaszczyźnie eksperymentu przypadło 1550 piskeli. Powyższe parametry skanowania umożliwiły osiąganie wyników z dokładnością do ok. 0,013 mm w skali zdjęcia czyli w tym przypadku 0,38 mm w mierze terenowej eksperymentu. Wielkości te

nieznacznie tylko odbiegają od dokładności pomiarów możliwych do osiągnięcia na stekometrze i (jednak) mogły zostać uznane za granicznie wystarczające do opracowania eksperymentu przy zachowaniu istotnej łatwości obsługi i dostępności oprogramowania dla nieco nawet przestarzałych platform sprzętowych. Następnie zdjęcia opracowano na autografie cyfrowym VSD oraz w eksperymentalnym systemie pomiarowym wykorzystującym „pseudoanaglify” (Janowski et al., 2002).

### 3. GRAFICZNA PREZENTACJA WYNIKÓW

Pożądanym jest, aby wyniki przedstawione były w atrakcyjny i sugestywny sposób.

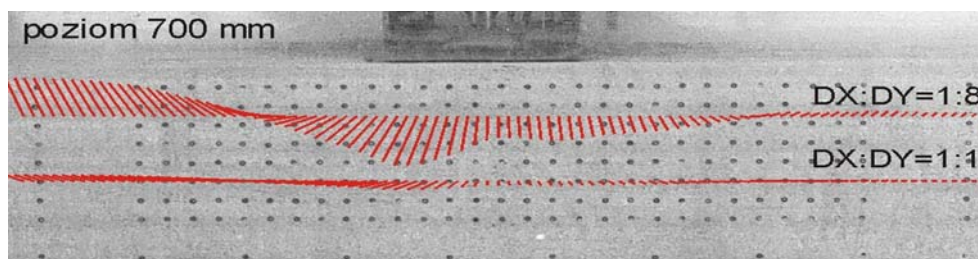


Rys. 4. Prezentacja graficzna przetworzonych wyników pomiarów w postaci hybrydowej.

Gameń różnorodnych sposobów prezentacji wyników można zaczerpnąć z kartograficznych metod redakcji map hipsometrycznych. Przykład, jeden z wielu, wykorzystujący wytworzony numeryczny model powierzchni (NMP) przedstawiono na rys.4.

Najistotniejszym zadaniem, po rezygnacji z eksperymentów ze smugami, było opracowanie numerycznej metody ich generowania. NMP pozwala na wyznaczenie w dowolnym miejscu składowych przesunięć. Umożliwia to wytworzenie wzdłuż zadanej linii wektorów przesunięć w założonym interwale (rys. 5).

Korzystając z tej techniki można zrezygnować z tradycyjnego eksperymentu ze smugami.



Rys. 5. Wektorowy obraz smug wygenerowany z NMP

Przedstawienie wyników, choćby w najatrakcyjniejszej formie, nie zawiera wskaźników liczbowych opisujących takie cechy obrazu jak kształt, liczebność elementów, pole powierzchni, długość krawędzi itp. (Tadeusiewicz et al., 1997). W literaturze opisane są współczynniki dotyczące głównie figur płaskich. Nie opisują one jednak stopnia komplikacji powierzchni. Parametrem opisującym tę cechę może być wymiar fraktalny (Clarke, 1986).

#### 4. METODY OBLICZANIA WYMIARU FRAKTALNEGO

Pojęcie wymiaru fraktalnego jest trudne do jednoznacznego zdefiniowania (Peitgen et al., 1997). Na przełomie XIX i XX wieku jednym z głównych problemów matematyki było stwierdzenie, co to jest wymiar i jakie ma własności. Od tamtej pory sytuacja pogorszyła się jeszcze, gdyż matematycy podali przynajmniej dziesięć różnych definicji wymiaru: wymiar topologiczny, wymiar Hausdorffa, wymiar fraktalny, wymiar samopodobieństwa, wymiar pudełkowy, wymiar euklidesowy i wiele innych. Wszystkie one są ze sobą powiązane. Niektóre z nich mają sens w pewnych warunkach, podczas gdy w innych przydatne są definicje alternatywne. Czasami wszystkie mają sens i pokrywają się. W innych przypadkach, mimo że kilka z nich ma sens, mogą prowadzić do różnych wartości.

Dziś w praktyce można spotkać się najczęściej z (Peitgen et al., 1997):

- wymiarem cyrklowym, czasem nazywanym metodą izorytmiczną,
- wymiarem obwodowo-powierzchniowym,
- wymiarem pudełkowym.

Pierwszy z nich jest dość trudny do zastosowania w prezentowanym przykładzie. Drugi wymaga posiadania większej kolekcji jednorodnego materiału badawczego (Frohn, 1997), co w tym przypadku wyklucza jego zastosowanie. Pozostaje więc wymiar pudełkowy. Metodycznie i technicznie jest on, w przypadku badania obrazów cyfrowych, najbardziej obiecujący ale dotyczy całych badanych powierzchni. Najbardziej interesujące są jednak zmiany lokalne tego wymiaru na małych powierzchniach sąsiadujących ze sobą.

Takie założenie stało się powodem podjęcia opracowania metody obliczania lokalnego wymiaru fraktalnego opartej na podobieństwie do założeń metody cyrklowej.

##### 4.1. Metoda cyrkłowa wyznaczania wymiaru

Ogólnie rzecz biorąc liniowy wymiar fraktalny jest miarą stopnia krętości linii i mieści się w przedziale od 1 (dla linii prostej) do 2 (dla linii tak krętej, że pokrywa całą dwuwymiarową powierzchnię). Idealne obiekty fraktalne są do siebie podobne w każdej

skali analizy. Rzeczywiste elementy krajobrazu są podobne do siebie tylko w sensie statystycznym.

Metoda cyrkłowa pozwala na wyznaczenie wymiarów fraktali krzywoliniowych o bardzo skomplikowanym przebiegu.

Jeżeli spełniona jest zależność:  $L=f(\varepsilon)$ , która ujawnia się w postaci prawa potęgowego:  $L \sim \varepsilon^{-a}$ , przy  $\varepsilon \rightarrow 0$ .  $L$  jest długością linii,  $\varepsilon$  długością miary,  $a$  jest wykładnikiem potęgowym o ujemnym znaku, gdyż  $L$  wzrasta przy malejącym  $\varepsilon$ . Pomiedzy wymiarem  $D_f = \frac{\log N(\varepsilon)}{\log(1/\varepsilon)}$  obiektów liniowych a wykładnikiem  $a$  zachodzi wyprowadzona

poniżej zależność.

Wiadomo, że  $N(\varepsilon)=L(\varepsilon)/\varepsilon$ , gdzie  $N(\varepsilon)$  oznacza liczbę odłożeń miary.

$$D_f \times \log\left(\frac{1}{\varepsilon}\right) = \log N(\varepsilon) \quad (5)$$

$$\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{D_f} = N(\varepsilon) \quad (6)$$

$$\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{D_f} = \frac{L(\varepsilon)}{\varepsilon} \quad (7)$$

$$\varepsilon^{-D_f} \times \varepsilon = L(\varepsilon) \quad (8)$$

$$\varepsilon^{1-D_f} = L(\varepsilon) = \varepsilon^a \quad (9)$$

$$1 - D_f = a \quad (10)$$

$$D_f = 1 - a \quad (11)$$

W praktycznym postępowaniu należy wybrać miarę o długości  $\varepsilon_1$  i zmierzyć nią długość fraktala  $L(\varepsilon_1) = \varepsilon_1 \cdot N_1(\varepsilon_1)$ , gdzie  $N_1$  jest liczbą odłożeń całkowitych i reszty miary. Następnie dobieramy coraz krótsze miary  $\varepsilon_1 > \varepsilon_2 > \varepsilon_3 > \dots > \varepsilon_n$  i wyznaczamy odpowiadające im długości fraktala  $L_1 \dots L_n$ . Wykreślamy w skali logarytmicznej zależność  $L_i$  i  $\varepsilon_i$  (Kudrewicz, 1993). Wymiar fraktalny  $D_f$  otrzymujemy jako  $1 - a$ , gdzie  $a$  oznacza nachylenie linii regresji. Nachylenie  $a$  ma wartość ujemną, ponieważ wraz ze wzrostem długości miary, coraz więcej szczegółów linii jest pomijanych i całkowita długość linii maleje. Ponieważ wartości przedstawione są na wykresie logarytmicznym, z praktycznej strony, najlepiej jest dobierać wielkości miary, które wzrastają zgodnie z potęgami dwójki, wtedy obserwacje zmiennej niezależnej dla linii regresji rozmieszczone są na osi w równych odstępach (Clarke, 1986).

Przy tej samej metodzie pomiaru wykorzystuje się również inny algorytm wyznaczania wymiaru linii. Niech  $L_1$  oznacza wynik pomiaru długości linii za pomocą miary o długości  $N_1$ , natomiast  $L_2$  wynik pomiaru miarą  $N_2$ .

Wymiar fraktalny obliczamy zgodnie z formułą:

$$D_f = \frac{\log(L_2 / L_1)}{\log(N_2 / N_1)} \quad (12)$$

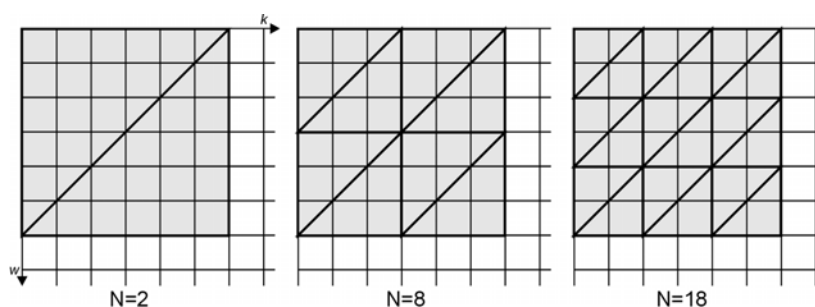


Im bardziej skomplikowany kształt mierzonego obiektu, tym większe będzie  $L_2$  od  $L_1$  i większy będzie wymiar fraktalny  $D_f$  (Green, 1995).

#### 4.2. Obliczanie ogólnego i lokalnego wymiaru fraktalnego w nawiązaniu do metody cyrkłowej

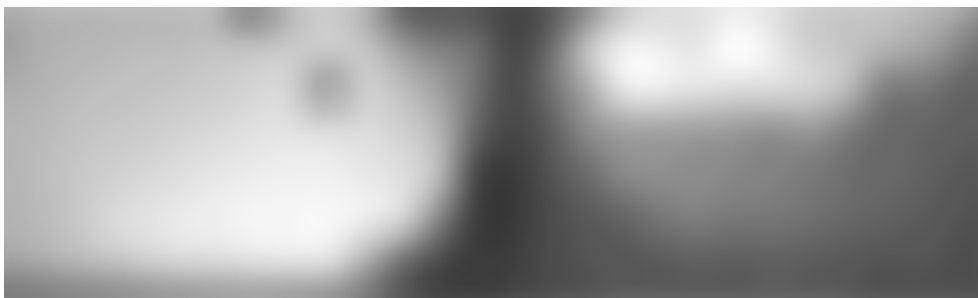
Wymiar fraktalny jako parametr ogólny macierzy można wyznaczyć w drodze pomiaru pola powierzchni stosując różne miary (Clarke, 1986). Niech  $P_1$  oznacza wynik pomiaru pola powierzchni za pomocą miary o powierzchni  $N_1$  (rys. 6). Miarą może być trójkąt prostokątny równoramienny (w rzucie na płaszczyznę  $w,k$ ) o ramieniu  $n_1$  pikseli. Natomiast  $P_2$  wynik pomiaru miarą  $N_2$  o ramieniu  $n_2$ . Wymiar fraktalny obliczamy analogicznie z formułą (12).

Jeżeli założymy, że najmniejszym analizowanym elementem obrazu będzie powierzchnia kwadratu o podstawie 6 pikseli to obliczenie pola powierzchni tego obszaru w przestrzeni można podzielić na 3 kroki. W pierwszym kroku pole powierzchni obszaru składa się z dwóch pól powierzchni trójkątów w drugim kroku z 8 a w trzecim z 18. W ten sposób przez zwiększanie liczby pól trójkątów zwiększamy dokładność pomiaru tego pola. Można się domyślać przez analogię do wymiaru cyrkłowego, że pole powierzchni tego obszaru powinno w każdym kroku wzrastać.

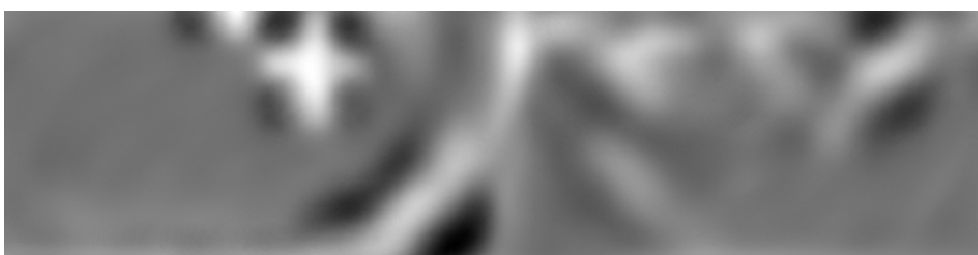


Rys. 6.

Mając trzy wyniki pomiaru pola powierzchni można obliczyć współczynnik nachylenia linii regresji  $a$  i obliczyć wymiar fraktalny  $D_f$ . Wymiar ten charakteryzuje stopień nieregularności powierzchni badanego obszaru w przestrzeni 3D. Przesuwając analizowane do następnej kolumny powtarzamy operacje. Po dojściu do końca wiersza przesuwamy analizowane pole do pierwszej kolumny następnego wiersza i powtarzamy operacje. Otrzymamy w ten sposób nową macierz złożoną ze współczynników  $D_f$ . Macierz tę można nazwać macierzą lokalnych wymiarów fraktalnych (rys. 7,8).



Rys. 7. Rozkład wartości składowej  $\Delta X$



Rys. 8. Rozkład wartości lokalnego wymiaru fraktalnego

## 5. PODSUMOWANIE

W wyniku zmiany koncepcji organizacji eksperymentów geotechnicznych uzyskano możliwość rejestracji przemieszczeń gruntu metodą fotogrametrii jednoobrazowej z dużą precyzją. Uzyskane błędy wzajemnego położenia znaczków, umieszczonych w badanym gruncie, nie przekroczyły  $\pm 0.2$  mm.

Adaptacja kartograficznych metod kartowania map do prezentacji numerycznych modeli powierzchni spowodowała podniesienie atrakcyjności i sugestywności przedstawianych wyników pomiarów.

Opracowanie metodyki numerycznego generowania smug w oparciu o NMP pozwoliło na rezygnację z eksperymentów ze smugami.

Wprowadzenie wymiaru fraktalnego, jako wskaźnika zmienności NMP, daje możliwość nowej klasyfikacji wyników eksperymentów. W przykładzie prezentowanym na Rys. 7 i 8 ogólny wymiar fraktalny wyniósł  $D_f = 1.814$  oraz wymiar lokalny w przedziale  $1.318 \div 1.909$ .

## 6. LITERATURA

Clarke K.C., 1986. Computation of the fractal dimension of topographic surfaces using the triangular prism surface area method. *Computers and Geosciences*, vol. 12, no. 5.

Green D.G., 1995. *Fractals and scale*. Copyright David G. Green 1993.

Janowski A., Miałdun J., Szulwic J., 2002. Wyznaczanie przemieszczeń gruntu podczas modelowych badań laboratoryjnych z wykorzystaniem pseudoanaglifów. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 12 a, s. 154-161.

- Kudrewicz J., 1993, *Fraktale i chaos*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Malina W., Smiatacz M., 2005. *Metody cyfrowego przetwarzania obrazów*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, s. 159-172.
- Peitgen H. –O., Jurgens H., Saupe D., 1997. *Granice chaosu fraktale*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Tadeusiewicz R., Korohoda P., 1997, *Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów*, Wydawnictwo Postępu Telekomunikacji, Kraków, 256-265.

### **THE PHOTOGRAMMETRIC DETERMINATION OF SOIL DISLOCATIONS DURING A GEOTECHNICAL LABORATORY EXPERIMENT**

KEY WORDS: photogrammetry, geotechnical experiment, digital surface model, fractal dimension

SUMMARY: The geotechnical laboratory at Gdańsk Polytechnic conducts investigation of the relocation of soil under the downward pressure of a building foundation footing. Tests are carried out in a device specially constructed for the purpose, i.e. a box with one of its walls made of glass. A typical experiment conducted with the use of that device is the one involving specially prepared sand, which is laid alternately in streaks of brighter and darker shades. As the foundation footing is placed, the ground gives in, and the directions in which the sand moves are visible through the glass. One drawback of that method is the fact that it is impossible to measure the direction and length of the sand relocations. The method can be developed by replacing streaks of sand with markers adhering to the glass. The method was confirmed as useful in several tests. The technique of single-image digital photogrammetry makes it possible to determine the directions and lengths of relocated markers. This paper presents the results of one such experiment, along with a number of suggestions of how they may be presented graphically, and how the streaks may be generated digitally. A method is also examined as regards calculating the fractal dimension, which describes the dynamics of changes that may be observed in the ground being deformed.

Dr inż. Jerzy Miałdun  
e-mail: [jerzy.mialdun@uwm.edu.pl](mailto:jerzy.mialdun@uwm.edu.pl)  
tel. +89 5234992  
fax +89 5233210