

## **6. Podsumowanie perspektyw rozwojowych i systemu transferu technologii kształtowania struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich**

### **6.1. Podsumowanie w zakresie rozwoju poszczególnych technologii kształtowania struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich**

W niniejszym rozdziale dokonano podsumowania dotychczas wykonanych autorskich prac z udziałem szerokiego blisko 500-osobowego zespołu ekspertów w ramach zorganizowanego systemu współpracy i pozyskiwania wiedzy ukrytej, którą dysponuje każdy z nich, na wiedzę otwartą, możliwą do przetwarzania i porządkowania w celu opracowania prognoz rozwoju każdej z technologii kształtowania struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich oraz tendencji ogólnych i generalnych trendów rozwojowych w kontekście rozwoju gospodarki kraju lub nawet w skali międzynarodowej. Autorskie prace w tym zakresie obejmują niemal całe minione dziesięciolecie. Początkowe studia i analizy teoretyczne zyskały na znaczeniu w trakcie aplikacji, a następnie realizacji Projektu FORSURF wykonanego pod kierunkiem naukowym Autorki niniejszej książki w okresie ostatnich kilku lat w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, kontynuowanych w ramach pracy własnej po jego zakończeniu. Największym osiągnięciem naukowym, ale również aplikacyjnym tych działań jest opracowanie kompleksowej metodologii prognozowania rozwoju technologii kształtowania struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich, opublikowanej w całości w pracy [3]. Metodologia komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów ma charakter interdyscyplinarny, gdyż obejmuje zagadnienia dotyczące inżynierii powierzchni jako działu inżynierii materiałowej, foresightu technologicznego z obszaru organizacji i zarządzania oraz technologii informacyjnej z zakresu informatyki. Metodologia ta aplikowana do zagadnień inżynierii powierzchni, ma jednak walor uniwersalny i bez trudu może być zastosowana do dowolnego obszaru technologicznego, wszakże pod warunkiem wykonania szerokich badań e-foresightowych z wykorzystaniem autorskiej metody e-Delphix i z udziałem kilkusetosobowego zespołu odpowiednio dobranych ekspertów. Warto zwrócić uwagę, że w cytowanej pracy [3] wykazano, przez równoległe wykonanie pełnego i komplementarnego zestawu klasycznych badań materiałoznawczych oraz odpowiednich badań e-foresightowych, że każde z tych podejść metodologicznych prowadzi do analogicznych wniosków. To właśnie stwierdzenie upoważnia do stosowania jedynie metod e-foresightowych z wykorzystaniem metody e-Delphix do diagnozowania i predykcji rozwoju dowolnej grupy technologii, bez konieczności każdorazowego wykonywania badań

materiałoznawczych. W niniejszej książce na podstawie własnych badań wykonanych zgodnie z autorską metodologią komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów, w dwóch poprzednich rozdziałach zaprezentowano szczegółowe wyniki badań w odniesieniu do 140 grup technologii inżynierii powierzchni materiałów, uznanych za krytyczne, od których zgodnie z tymi wynikami najbardziej uzależniony jest przyszły rozwój całej branży, wytypowanych – na podstawie wykonanych badań – spośród ponad 500 technologii zinwentaryzowanych i opisanych we wcześniejszych pracach własnych [1, 2]. W celu porównania priorytetowych spośród tych technologii, o najlepszych perspektywach rozwojowych i o kluczowym znaczeniu w przemyśle, sklasyfikowano je w ramach dwóch pól badawczych: *M* (ang.: *Manufacturing*) i *P* (ang.: *Product*), odpowiadających alternatywnemu spojrzeniu wytwórczemu lub konsumenckiemu na analizowane zagadnienia. W ramach każdego pola badawczego wyróżniono po 7 obszarów tematycznych, z których każdy zawiera po 10 grup technologii. Jako wyniki wykonanych badań i prac analitycznych, dla każdej grupy 10 technologii, tworzących obszar tematyczny, przedstawiono graficznie prognozowane trendy zmian znaczenia poszczególnych grup technologii krytycznych, tworzących ten obszar, oraz macierze kontekstowe, kolejno: (1) macierze strategii dla technologii krytycznych wchodzących w skład tego obszaru; (2) macierze dendrologiczne, prezentujące potencjał i atrakcyjność poszczególnych grup technologii krytycznych oraz (3) macierze meteorologiczne, przedstawiające intensywność oddziaływania sposobności i trudności płynących z otoczenia na poszczególne grupy technologii krytycznych tego obszaru. Zbiór opracowanych macierzy kontekstowych służy pozycjonowaniu technologii, będąc narzędziem graficznej analizy porównawczej poszczególnych technologii lub ich grup, umożliwiającym zobiektywizowaną ocenę w dziesięciostopniowej uniwersalnej skali stanów względnych (rys. 3.9). Prezentacja każdej analizowanej technologii zawiera identyfikację aktualnej zobiektywizowanej fazy cyklu życia danej technologii, w dziesięciostopniowej skali (rys. 3.10), kompatybilnej z uniwersalną skalą stanów względnych, zawartej pomiędzy technologią schyłkową, a technologią embrionalną; prezentację perspektyw rozwojowych tej technologii ustalonych w znormalizowany sposób w dziesięciopunktowej skali stanów względnych oraz mapę drogową i kartę informacyjną technologii. Opracowane według autorskiej koncepcji mapy drogowe technologii stanowią bardzo wygodne narzędzie analizy porównawczej, umożliwiając wybór technologii najlepszej pod względem wybranego kryterium materiałoznawczego, technologicznego lub ekonomicznego. Mapy te opracowano z wykorzystaniem danych pierwotnych pozyskanych w wyniku wykonanych badań eksperymentalno-porównawczych, z uwzględnieniem siedmiu głównych warstw odpowiadających kolejno na pytania o coraz większym stopniu szczegółowości: Kiedy? Dlaczego? Co? Jak? Gdzie? Kto? Ile? Główne warstwy mapy drogowej

technologii uporządkowano hierarchicznie, począwszy od górnych najbardziej ogólnych, określających ogólnospołeczne i ekonomiczne przesłanki, przyczyny i powody realizowanych działań, poprzez warstwę produktową charakteryzującą produkt powstający w danym procesie technologicznym, do warstw dolnych precyzujących szczegóły organizacyjno-techniczne dotyczące miejsca, wykonawcy i kosztów. Karty informacyjne technologii zawierają: opis procesu technologicznego i charakterystykę towarzyszącego mu zjawiska fizykochemicznego, zalety i wady danej technologii, najbardziej perspektywiczne technologie szczegółowe oraz technologie zastępcze/alternatywne, ogólny lub przykładowy schemat rozpatrywanego procesu produkcyjnego oraz trójelementowy wykaz rekomendowanych źródeł literaturowych. Określono w nich ponadto rodzaje możliwej do naniesienia powłoki/warstwy wierzchniej lub procesów zachodzących na powierzchni podłoża, a także szczegółowe własności powłok/warstw wierzchnich/powierzchni podłoża nabyte w wyniku zastosowania danej technologii i ogólne fizykochemiczne warunki realizacji procesu technologicznego, metody przygotowania materiału podłoża, typ/rodzaj urządzeń naukowo-badawczych i oprzyrządowania. W kartach informacyjnych technologii zamieszczono również dane określone na podstawie wyników badań eksperckich z wykorzystaniem uniwersalnej skali stanów względnych, obejmujące: wpływ aplikacji technologii na przewidywane i oczekiwane własności materiału, skuteczność przeciwdziałania technologii skutkom zużycia, sekcji przemysłu wg klasyfikacji PKD o najwyższej aplikacyjności technologii oraz ich perspektywy rozwojowe. Te wyniki badań uwzględniają wszystkie zinwentaryzowane mikrocynniki decydujące o możliwościach rozwojowych każdej z analizowanych technologii krytycznych. Zgromadzony w ten sposób cenny zbiór informacji umożliwia niemal od zaraz przystąpienie do prac nad wdrożeniem danej technologii w konkretnych warunkach produkcyjnych. Wartość naukowa tych informacji idzie zatem w parze z ich potencjałem wdrożeniowym. Uzupełnieniem opisanych wyników badań jest ogólny ranking prognozowanego wzrostu znaczenia analizowanych technologii krytycznych. Do grup technologii krytycznych kształtowania struktury i własności materiałów inżynierskich o przewidywanym, w najbliższych kilkunastu latach, najsilniejszym wzroście należą ocenione najwyżej w procesie wieloetapowej ankietyzacji ekspertów: chemiczne osadzanie powłok z fazy gazowej aktywowane laserowo ( $E_{M3}$ ), technologie hybrydowe z udziałem procesów ciepno-chemicznych ( $J_{M4}$ ), nanoszenie powłok gradientowych ( $F_{M5}$ ), z nanonapełniaczami ( $F_{M5}$ ) i z pamięcią kształtu ( $H_{M5}$ ) na materiały polimerowe oraz fizyczne i chemiczne osadzanie powłok z fazy gazowej na materiały konstrukcyjne metalowe ( $J_{P2}$ ) i niemetalowe ( $A_{P3}$ ,  $B_{P3}$ ) oraz impulsowe osadzanie laserowe, będące obróbką powierzchniową materiałów narzędziowych ( $I_{P4}$ ), co do których wzrostu eksperci są stuprocentowo pewni. Szczegółowe wyniki badań heurystycznych z podziałem na

trzy zakresy odzwierciedlające tendencje silnie wzrostowe (oznaczone kolorem zielonym), średnio wzrostowe (oznaczone na żółto) i rojújące stosunkowo słabo (kolor czerwony) przedstawiono w tabelcy 6.1.

**Tablica 6.1.** Ranking prognozowanego wzrostu znaczenia technologii krytycznych kształtowania struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich

Pozycja rankingowa	Symbol	Nazwa	Wzrost znaczenia technologii %
		technologii krytycznej kształtowania struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich	
1	E <sub>M3</sub>	Chemiczne osadzanie powłok z fazy gazowej aktywowane laserowo (LCVD)	100
1	J <sub>M4</sub>	Technologie hybrydowe z udziałem procesów ciepno-chemicznych	100
1	F <sub>M5</sub>	Nanoszenie powłok gradientowych na materiały polimerowe	100
1	G <sub>M5</sub>	Nanoszenie powłok z nanonapełniaczami na materiały polimerowe	100
1	H <sub>M5</sub>	Nanoszenie powłok z pamięcią kształtu na materiały polimerowe	100
1	J <sub>P2</sub>	Fizyczne i chemiczne osadzanie powłok z fazy gazowej (PVD/CVD) na materiały konstrukcyjne metalowe	100
1	A <sub>P3</sub>	Fizyczne osadzanie powłok z fazy gazowej (PVD) na materiały konstrukcyjne niemetalowe	100
1	B <sub>P3</sub>	Chemiczne osadzanie powłok z fazy gazowej (CVD) na materiały konstrukcyjne niemetalowe	100
1	J <sub>P4</sub>	Impulsowe osadzanie laserowe (PLD) warstw powierzchniowych na materiały narzędziowe	100
2	H <sub>P7</sub>	Utworzenie na powierzchni polimerów powłok gradientowych	92
2	I <sub>P7</sub>	Utworzenie na powierzchni polimerów powłok samowykształcalnych	92
2	J <sub>P7</sub>	Polimeryzacja <i>in situ</i>	92
3	D <sub>M3</sub>	Plazmo-chemiczne osadzanie powłok z fazy gazowej (PACVD/PECVD)	91
3	I <sub>P4</sub>	Technologie hybrydowe stosowane w odniesieniu do kształtowania powierzchni materiałów narzędziowych	91
4	E <sub>M1</sub>	Laserowe wytwarzanie przyrostowe	90
4	F <sub>M4</sub>	Nawęglanie plazmowe i pod obniżonym ciśnieniem	90
4	I <sub>M5</sub>	Nanoszenie powłok samowykształcalnych na powierzchnię polimerów	90
4	J <sub>M5</sub>	Nanoszenie powłok biokompatybilnych na powierzchnię polimerów	90
4	E <sub>P6</sub>	Wytwarzanie powłok hybrydowych – organiczno-nieorganicznych na powierzchni materiałów funkcjonalnych	90
5	H <sub>P2</sub>	Implantacja jonów stosowana w odniesieniu do materiałów konstrukcyjnych metalowych	88
5	I <sub>P2</sub>	Pokrywanie ceramiką/cermetami powierzchni materiałów konstrukcyjnych metalowych	88
5	J <sub>P3</sub>	Osadzanie pokryć laserem impulsowym lub przez promieniowanie laserowo-plazmowych źródeł EUV na powierzchni materiałów konstrukcyjnych niemetalowych	88
6	B <sub>P1</sub>	Nanoszenie na biomateriały monowarstw samoorganizujących się	85

Pozycja rankingowa	Symbol	Nazwa	Wzrost znaczenia technologii %
		technologii krytycznej kształtowania struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich	
7	D <sub>P7</sub>	Obróbka laserem powierzchni polimerów	84
8	H <sub>P4</sub>	Nanoszenie powłok gradientowych na materiały narzędziowe	83
9	H <sub>M1</sub>	Obróbka laserowa materiałów funkcjonalnych	81
9	J <sub>M1</sub>	Obróbka laserowa biomateriałów	81
9	B <sub>M4</sub>	Azotowanie pod obniżonym ciśnieniem	81
10	E <sub>M6</sub>	Fizyczne osadzanie nanometrycznych warstw powierzchniowych z odparowaniem wiązki elektronową z jonizacją par (EB-PVD)	80
10	F <sub>M6</sub>	Osadzanie pojedynczych warstw atomowych (ALD)	80
10	B <sub>P6</sub>	Fizyczne osadzanie na powierzchni materiałów funkcjonalnych powłok z fazy gazowej (PVD)	80
10	J <sub>P6</sub>	Teksturowanie laserowe powierzchni materiałów funkcjonalnych	80
11	C <sub>P2</sub>	Technologie cieplne i ciepno-chemiczne stosowane do kształtowania struktury i własności materiałów konstrukcyjnych metalowych	77
11	I <sub>P5</sub>	Nanoszenie polimerowych powłok proszkowych	77
12	J <sub>M3</sub>	Osadzanie pojedynczych warstw atomowych (ALD) metodą CVD	75
13	A <sub>M4</sub>	Azotowanie plazmowe	72
14	A <sub>P1</sub>	Immobilizacja (biomateriały)	71
14	C <sub>P1</sub>	Wzornikowanie (biomateriały)	71
14	J <sub>P1</sub>	Nanoszenie warstw diamentowych i diamentopodobnych powłok węglowych (DLC) na powierzchnię biomateriałów	71
15	B <sub>M6</sub>	Elektronolitografia (EBL)	70
15	I <sub>M6</sub>	Nakładanie na warstwę powierzchniową powłok zawierających nanomateriały	70
15	B <sub>M7</sub>	Pokrywanie warstwy powierzchniowej materiału powłokami natryskiwanymi cieplnie	70
15	E <sub>M7</sub>	Pokrywanie warstwy powierzchniowej materiału ceramiką/cermetalami	70
15	D <sub>P6</sub>	Metoda zol-żel wytwarzania warstw powierzchniowych materiałów funkcjonalnych	70
16	F <sub>P2</sub>	Natapianie/stopowanie laserowe materiałów konstrukcyjnych metalowych	66
16	F <sub>P3</sub>	Metoda zol-żel wytwarzania warstw powierzchniowych na materiałach konstrukcyjnych niemetalowych	66
16	A <sub>P4</sub>	Fizyczne osadzanie powłok z fazy gazowej (PVD) na powierzchni materiałów narzędziowych	66
16	B <sub>P4</sub>	Chemiczne osadzanie powłok z fazy gazowej (CVD) na powierzchni materiałów narzędziowych	66
16	H <sub>P5</sub>	Malowanie i lakierowanie ciekłymi materiałami polimerowymi	66
17	A <sub>P6</sub>	Chemiczne osadzanie na powierzchni materiałów funkcjonalnych powłok z fazy gazowej (CVD)	60
17	B <sub>M2</sub>	Reaktywne rozpylanie magnetronowe (RMS)	60

Pozycja rankin-gowa	Symbol	Nazwa	Wzrost znaczenia technologii %
		technologii krytycznej kształtowania struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich	
17	J <sub>M2</sub>	Impulsowe osadzanie laserowe (PLD)	60
17	D <sub>M6</sub>	Fizyczne osadzanie nanometrycznych warstw powierzchniowych z wykorzystaniem wiązki jonowej (IBAD)	60
17	J <sub>M6</sub>	Obróbka powierzchniowa nanomateriałów	60
17	F <sub>M7</sub>	Wytwarzanie powierzchniowych warstw odlewniczych i infiltracyjnych	60
18	B <sub>P5</sub>	Cynkowanie ogniowe z dodatkowym wyżarzaniem (powłoka Zn-Fe)	55
18	J <sub>P5</sub>	Nakładanie powłok z folii polimerowych	55
19	C <sub>M1</sub>	Stopowanie/wtapienie laserowe	54
20	C <sub>P7</sub>	Obróbka plazmą powierzchni polimerów	53
21	A <sub>M2</sub>	Katodowe odparowanie łukowe (CAD)	50
21	G <sub>M2</sub>	Aktywowane reaktywnie naporowanie przy użyciu działła elektronowego (BARE)	50
21	H <sub>M2</sub>	Reaktywne nanoszenie ze zjonizowanych klastrow (ICB)	50
21	G <sub>M3</sub>	Osadzanie powłok z użyciem prekursorów metaloorganicznych (MOCVD)	50
21	C <sub>M7</sub>	Pokrywanie powłokami formowanymi niskociśnieniowo z proszków i spiekanie	50
21	J <sub>M7</sub>	Utwardzanie detonacyjne	50
21	F <sub>P4</sub>	Stopowanie/wtapienie laserowe materiałów narzędziowych	50
21	H <sub>P6</sub>	Reaktywne trawienie jonowe (RIE) powierzchni materiałów funkcjonalnych	50
22	F <sub>P7</sub>	Obróbka powierzchni polimerów z użyciem promieni gamma	46
23	D <sub>M1</sub>	Napawanie laserowe	45
23	I <sub>M1</sub>	Impulsowe osadzanie laserowe (PLD)	45
23	D <sub>M4</sub>	Kompleksowe obróbki z udziałem azotowania	45
24	B <sub>P2</sub>	Technologie galwaniczne stosowane do materiałów konstrukcyjnych metalowych	44
24	G <sub>P2</sub>	Natapianie/stopowanie elektronowe materiałów konstrukcyjnych metalowych	44
24	E <sub>P3</sub>	Implantacja jonów na powierzchni materiałów konstrukcyjnych niemetalowych	44
24	I <sub>P3</sub>	Osadzanie elektroforetyczne warstw powierzchniowych na materiałach konstrukcyjnych niemetalowych	44
24	E <sub>P5</sub>	Metalizacja natryskowa	44
24	F <sub>P5</sub>	Natryskiwanie ciepłe	44
24	G <sub>P5</sub>	Nanoszenie powłok podkładowych polimerowych	44
25	D <sub>P1</sub>	Metoda zol-żel nakładania warstw na powierzchnię biomateriałów	42
25	E <sub>P1</sub>	Infiltracja (biomateriały)	42
25	F <sub>P1</sub>	Osadzanie elektroforetyczne i sedymentacyjne warstw powierzchniowych na biomateriały	42

Pozycja rankin-gowa	Symbol	Nazwa	Wzrost znaczenia technologii %
		technologii krytycznej kształtowania struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich	
25	G <sub>P1</sub>	Konsolidacja (biomateriały)	42
25	I <sub>P1</sub>	Impulsowe osadzanie laserowe (PLD) warstw powierzchniowych na biomateriałach	42
26	C <sub>M3</sub>	Osadzanie powłok z fazy gazowej pod obniżonym ciśnieniem (LPCVD)	41
26	D <sub>P4</sub>	Metalurgia proszków stosowana w celu zmiany składu chemicznego i/lub fazowego warstwy powierzchniowej materiałów narzędziowych	41
26	E <sub>P4</sub>	Azotowanie i kompleksowe obróbki z udziałem azotowania stosowane do materiałów narzędziowych	41
27	E <sub>M2</sub>	Odparowanie metalu niskonapięciowym działem elektronowym (HHCD)	40
28	B <sub>P7</sub>	Elektrokoronowanie (polimery)	38
28	G <sub>P7</sub>	Obróbka powierzchni polimerów z użyciem promieniowania elektronowego	38
29	B <sub>M1</sub>	Przetapianie laserowe	36
29	G <sub>M1</sub>	Fizyczne osadzanie z fazy gazowej wspomagane laserowo (LAPVD)	36
30	F <sub>M3</sub>	Osadzanie powłok aktywowane wiązką promieni UV (Photo CVD)	33
30	I <sub>M3</sub>	Chemiczna infiltracja z fazy gazowej (CVI)	33
30	D <sub>P2</sub>	Natryskiwanie cieplne dla poprawy własności warstwy powierzchniowej materiałów konstrukcyjnych metalowych	33
30	E <sub>P2</sub>	Utwardzanie detonacyjne laserowe/elektronowe/wybuchowe powierzchni materiałów konstrukcyjnych metalowych	33
30	G <sub>P3</sub>	Natryskiwanie cieplne powierzchni materiałów konstrukcyjnych niemetalowych	33
31	D <sub>M2</sub>	Osadzanie warstw z wykorzystaniem wiązki jonowej (IBAD)	30
31	F <sub>M2</sub>	Osadzanie warstw z odparowaniem wiązką elektronową z jonizacją par (EB-PVD)	30
31	A <sub>M7</sub>	Pokrywanie powłokami galwanicznymi	30
31	A <sub>P7</sub>	Metalizacja powierzchni polimerów	30
31	E <sub>P7</sub>	Obróbka powierzchni polimerów z użyciem promieni UV	30
32	H <sub>P1</sub>	Fizyczne i chemiczne osadzanie na powierzchni biomateriałów powłok z fazy gazowej (PVD/CVD)	28
33	F <sub>M1</sub>	Chemiczne osadzanie z fazy gazowej aktywowane laserowo (LCVD)	27
34	B <sub>M3</sub>	Osadzanie powłok z fazy gazowej pod ciśnieniem atmosferycznym (APCVD)	25
35	A <sub>P2</sub>	Malowanie powierzchni materiałów konstrukcyjnych metalowych	22
36	B <sub>M5</sub>	Natrysk hydrodynamiczny służący nanoszeniu powłok polimerowych	20
36	E <sub>M5</sub>	Nanoszenie fluidyzacyjno-elektrostatyczne powłok polimerowych	20
36	A <sub>M6</sub>	Reaktywne trawienie jonowe (RIE)	20
36	G <sub>M6</sub>	Elektroosadzanie nanometrycznych warstw powierzchniowych	20
36	C <sub>P6</sub>	Pyroliza i jej odmiany stosowane w odniesieniu do materiałów funkcjonalnych	20
36	F <sub>P6</sub>	Odparowanie stosowane w odniesieniu do materiałów funkcjonalnych	20



Pozycja rankingowa	Symbol	Nazwa	Wzrost znaczenia technologii %
		technologii krytycznej kształtowania struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich	
36	G <sub>P6</sub>	Metody chemiczne/wyługowanie alkaliów z warstwy powierzchniowej materiałów funkcjonalnych i zagęszczenie pozostałego SiO <sub>2</sub>	20
36	I <sub>P6</sub>	Teksturowanie mechaniczne powierzchni materiałów funkcjonalnych z wykorzystaniem ostrza diamentowego	20
37	E <sub>M4</sub>	Nawęglanie gazowe i węglazotowanie wysokotemperaturowe	18
38	H <sub>M3</sub>	Chemiczne osadzanie powłok realizowane w złożu fluidalnym (Fluidized-Bed CVD)	16
38	G <sub>P4</sub>	Napawanie na powierzchni materiałów narzędziowych	16
39	D <sub>P3</sub>	Metalizacja próżniowa dotycząca materiałów konstrukcyjnych niemetalowych	11
39	A <sub>P5</sub>	Cynkowanie ogniowe (w czystym Zn i stopach Zn-Al)	11
39	C <sub>P5</sub>	Aluminiowanie ogniowe (w czystym Al i stopach Al-Si)	11
40	C <sub>M2</sub>	Odparowanie metalu impulsowo-plazmowo (PPM)	10
40	C <sub>M5</sub>	Malowanie proszkowe	10
40	D <sub>M5</sub>	Osadzanie elektroforetyczne	10
40	I <sub>M2</sub>	Odparowanie reaktywne łukiem elektrycznym (TAE)	10
40	C <sub>M6</sub>	Chemiczne osadzanie nanometrycznych warstw powierzchniowych z fazy gazowej (CVD)	10
40	H <sub>M6</sub>	Metoda zol-żel otrzymywania nanometrycznych warstw powierzchniowych	10
40	D <sub>M7</sub>	Pokrywanie powłokami metalizowanymi zanurzeniowo	10
40	G <sub>M7</sub>	Napawanie powłok	10
40	H <sub>M7</sub>	Nagniatanie, kulkowanie	10
40	I <sub>M7</sub>	Platerowanie	10
41	C <sub>M4</sub>	Azotowanie gazowe	9
41	G <sub>M4</sub>	Aluminiowanie	9
41	I <sub>M4</sub>	Pasywowanie	9
42	A <sub>M3</sub>	Wysokotemperaturowe chemiczne osadzanie powłok z fazy gazowej (HFCVD)	8
42	C <sub>P4</sub>	Natryskiwanie służące poprawie własności powierzchni materiałów narzędziowych	8
43	A <sub>M1</sub>	Laserowa obróbka cieplna	0
43	H <sub>M4</sub>	Borowanie	0
43	A <sub>M5</sub>	Tradycyjne techniki malarskie i nanoszenie zanurzeniowo	0
43	C <sub>P3</sub>	Technologie galwaniczne stosowane do poprawy własności powierzchni materiałów konstrukcyjnych niemetalowych	0
43	H <sub>P3</sub>	Malowanie powierzchni materiałów konstrukcyjnych niemetalowych	0
43	D <sub>P5</sub>	Technologie galwaniczne stosowane w przemyśle samochodowym	0

**LEGENDA**

	Technologie silnie wzrostowe		Technologie umiarkowanie wzrostowe		Technologie o ograniczonym potencjale wzrostowym
--	------------------------------	--	------------------------------------	--	--



## 6.2. Scenariusze opracowane z użyciem autorskiego oprogramowania wspomagane sztucznymi sieciami neuronowymi jako narzędzie prognozowania rozwoju technologii kształtowania struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich

Z punktu widzenia przedsiębiorców oraz menadżerów odpowiedzialnych za podjęcie decyzji w sprawie rozpoczęcia nowej produkcji przemysłowej lub ustalenia profilu produkcyjnego na kolejne lata, a także władz państwowych i samorządowych przeznaczających środki finansowe na badania naukowe oraz na wsparcie inwestycji przemysłowych, najistotniejszym elementem procesu decyzyjnego jest informacja dotycząca perspektyw rozwojowych poszczególnych technologii i ich wzajemnego pozycjonowania i to w perspektywie kilku, a nawet kilkunastu najbliższych lat. Spośród ponad 500 szczegółowych technologii obróbki powierzchniowej i ich licznych odmian technologicznych, należy wybrać te, które będą miały najwyższy potencjał rozwojowy. Nie mniej koniecznym jest przeanalizowanie w jakim stopniu każda z analizowanych grup technologii może zaważyć na ogólnym rozwoju kraju, i czy może korzystnie lub niekorzystnie wpłynąć na konkurencyjność krajowej gospodarki. Zaprezentowane w poprzednich rozdziałach macierze kontekstowe, mapy drogowe i karty informacyjne technologii, obejmujące mikrocynniki decydujące o rozwoju tych technologii, stanowią wraz z wykonanymi autorskimi badaniami foresightowymi podstawę do sformułowania alternatywnych scenariuszy przyszłych wydarzeń, związanych z rozwojem inżynierii powierzchni. W niniejszej części książki zaprezentowano mezo- i makroscenariusze rozwoju inżynierii powierzchni materiałów. Ze scenariuszy tych mogą korzystać przedsiębiorcy oraz inne podmioty gospodarcze w celu ich wykorzystania w działalności gospodarczej oraz władze samorządowe i gospodarcze, mogące je zaaplikować w procesach decyzyjnych dotyczących rozdziału środków publicznych lub opracowywania strategii rozwoju.

Prognozowanie rozwoju inżynierii powierzchni materiałów na poziomie mezo i makro zostało poprzedzone przyjęciem wstępnych założeń metodycznych i utworzeniem dedykowanych temu zadaniu autorskich programów komputerowych, wykorzystujących jako funkcje, uprzednio utworzone z użyciem komercyjnego oprogramowania, sieci neuronowe. Przegląd piśmiennictwa [67, 472-475] wskazuje, że nie istnieje jeden poprawny i ogólnie przyjęty sposób konstruowania scenariuszy przyszłych wydarzeń bądź algorytm postępowania zalecany do wdrożenia w procesie ich budowania. Praktyka wykazuje, że każdorazowo algorytm ten jest tworzony na nowo przez realizatorów konkretnego badania [476]. W celu kreowania scenariuszy przedstawiających prognozowaną przyszłość inżynierii powierzchni materiałów wszystkie analizowane czynniki podzielono na trzy grupy: makro, mezo i mikro. Zgodnie z doniesieniami literaturowymi

RODZAJE SCENARIUSZY		KRYTERIUM PODZIAŁU
<b>FORECASTINGOWY</b> Analiza (zadanie proste) zjawisk występujących w teraźniejszości i określenie w jaki sposób wpłyną one na wydarzenia w rzeczywistości	<b>TERYTORYJALNY</b> Prognoza dotyczy obszaru terytorialnego	<b>SPÓSOB DEDUKACJI</b> <b>BACKCASTINGOWY</b> Syntaza (zadanie odwrotne) polegająca na przyjęciu za punkt odniesienia określonego stanu przyszłości i poszukiwaniu dróg do osiągnięcia tego stanu
<b>PROBLEMOVY</b> Prognoza dotyczy problemu natury ogólnej	<b>MEZO</b> Prognoza dotyczy obszaru tematycznego	<b>PRZEDMIOT PROGNOZY</b> <b>TEMATYCZNY</b> Prognoza dotyczy obszaru tematycznego
<b>MAKRO</b> Rozpatruje się niewielką liczbę czynników, istotnie oddziałujących na dużą liczbę innych czynników	<b>MIKRO</b> Rozpatruje się ograniczoną liczbę czynników umiarkowanie oddziałujących na inne czynniki	<b>SKALA ZAWISK</b> <b>MIKRO</b> Rozpatruje się dużą liczbę czynników jednostkowo, nieznacznie oddziałujących na inne czynniki
<b>KRÓTKOTERMINOWY</b> Do 10 lat	<b>SREDNIOTERMINOWY</b> Od 11 do 24 lat	<b>HORYZONT CZASOWY*</b> <b>DLUGOTERMINOWY</b> Powyżej 25 lat
<b>NIINTERWENCYJNY</b> Opracowania teoretyczne opisujące możliwe warianty przyszłych wydarzeń bez ambicji oddziaływania na rzeczywistość	<b>INTERWENCYJNY (NORMATYWNY)</b> Opracowania służące przewidywaniu, zarządzaniu i kreowaniu przyszłości	<b>UTILITYARNOSĆ</b> <b>INTERWENCYJNY (NORMATYWNY)</b> Opracowania służące przewidywaniu, zarządzaniu i kreowaniu przyszłości
<b>PROSTY</b> Dotyczy jednego, wąskiego obszaru analizy	<b>ZŁOŻONY</b> Dotyczy wielu zmiennych powiązanych przyczynowo-skutkowo w czasie i przestrzeni	<b>POZIOM ZŁOŻONOŚCI</b> <b>ZŁOŻONY</b> Dotyczy wielu zmiennych powiązanych przyczynowo-skutkowo w czasie i przestrzeni
<b>PERYFERYJNY</b> Koncentrujący się na zdarzeniach skrajnych, mało prawdopodobnych, peryferyjnych	<b>ALTERNATYWNY</b> Przedstawiający kilkuwarntową alternatywną wersję wydarzeń	<b>ROZPATRYWANE WARIANTY</b> <b>EKSTRAPOLACYJNY</b> Ograniczający się do ekstrapolacji istniejących trendów
<b>PIERWOTNY</b> Sporządzony na podstawie danych pierwotnych, zebranych podczas ankietyzacji ekspertów i/lub dyskusji panelowych (burze mózgów)	<b>WTÓRNY</b> Sporządzony na podstawie danych wtórnych sporządzonych na podstawie studiów literaturowych	<b>ZRÓDŁA DANYCH</b> <b>SIMULACYJNY</b> Sporządzony na podstawie wyników symulacji komputerowych
<b>HOMOGENICZNY</b> Obejmuje dane o podobnym charakterze dotyczące jednego obszaru tematycznego	<b>HETEROGENICZNY</b> Obejmuje zróżnicowane dane dotyczące wielu obszarów tematycznych	<b>ZAKRES ANALIZOWANYCH DANYCH</b> <b>HETEROGENICZNY</b> Obejmuje zróżnicowane dane dotyczące wielu obszarów tematycznych
<b>DYSKRETNY</b> Opisuje stan końcowy bez analizy procesu prowadzącego do jego osiągnięcia	<b>CIĄGŁY</b> Opisuje rozwój zdarzeń prowadzących do osiągnięcia stanu w przyszłości	<b>TYP ZMIENNYCH W FUNKCJI CZASU</b> <b>CIĄGŁY</b> Opisuje rozwój zdarzeń prowadzących do osiągnięcia stanu w przyszłości
<b>JAKOŚCIOWY</b> Wyniki prezentowane są w postaci opisowej	<b>ILOŚCIOWY</b> Wyniki prezentowane są w postaci zestawień liczbowych	<b>SPÓSOB PREZENTACJI WYNIKÓW</b> <b>ILOŚCIOWO-JAKOŚCIOWY</b> Wyniki prezentowane są w postaci zestawień liczbowych uzupełnionych opisem
<b>PROGNOSTYCZNY</b> Opisuje najbardziej prawdopodobny przebieg wydarzeń	<b>PROBABILISTYCZNY</b> Opisuje wariant przyszłych wydarzeń z uwzględnieniem prawdopodobieństwa ich zajścia	<b>PREZENTACJA WIZJI PRZYSZŁOŚCI</b> <b>WARUNKOWY</b> Opisuje przyszłe wydarzenia, które mogą mieć miejsce pod warunkiem zaistnienia określonych zjawisk

Charakterystyka scenariuszy opracowanych w ramach wykonanych badań

Charakterystyka scenariuszy opcjonalnych

\*) W naukach o zarządzaniu zjawiska długoterminowe dotyczą ponadpięcioletniego horyzontu czasowego. W odniesieniu do scenariuszy, które w swej istocie zawsze dotyczą długiego horyzontu czasowego, zastosowano adekwatną skalę wziętą.

Rysunek 6.1. Różne rodzaje scenariuszy przyszłych wydarzeń scharakteryzowane według wybranych kryteriów podziału [3]

[89, 474, 476, 477], scenariusze przyszłych wydarzeń dotyczących technologii kształtowania struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich, mogą być podzielone na wiele sposobów, z uwzględnieniem różnorodnych kryteriów, które wybrano arbitralnie [3] i zgodnie z nimi scharakteryzowano utworzone scenariusze na tle scenariuszy opcjonalnych (rys. 6.1).

Wyniki panelowych dyskusji eksperckich, wspartych niektórymi wynikami badań wykonanych w ramach Narodowego Programu Foresight Polska 2020 [478], umożliwiły opracowanie następujących opcjonalnych wariantów makroscenariuszy przyszłych wydarzeń dotyczących Polski, Europy i Świata [3]:

- optymistycznego,
- neutralnego,
- pesymistycznego.

**Scenariusz optymistyczny** *Wygrany wyścig* zakłada, że światowy kryzys gospodarczy został zażegnany i ma miejsce wzrost gospodarczy opierający się na pokojowej współpracy i integracji międzynarodowej. Wzrasta pozycja konkurencyjna Unii Europejskiej wśród gospodarek światowych. W kraju realizowane są z powodzeniem, znajdujące akceptację społeczną, liczne reformy, służące rzeczywistej transformacji gospodarki, co sprzyja zrównoważonemu rozwojowi w ramach gospodarki opartej na wiedzy i innowacji. Polska umiejętnie łączy endogenne czynniki wzrostu z inwestycjami zagranicznymi i efektywnym wykorzystaniem funduszy unijnych. Konsekwencją szeroko zakrojonych planowych działań strategicznych jest systematyczny wzrost poziomu wykształcenia społeczeństwa, aplikacja na szeroką skalę innowacyjnych, proekologicznych technologii w licznych prężnie rozwijających się mikro-, małych i średnich przedsiębiorstwach oraz dużych korporacjach coraz częściej działających w gałęziach wysokiej techniki, efektywne wykorzystanie zasobów rolnych kraju, a także ukształtowanie się nowoczesnej infrastruktury transportowej i teleinformatycznej. Dostępny potencjał jest należycie wykorzystywany do realizacji strategicznych celów rozwojowych, statystycznie ludzom żyje się lepiej, nastroje społeczne są optymistyczne, a perspektywy na kolejne lata – świetlane.

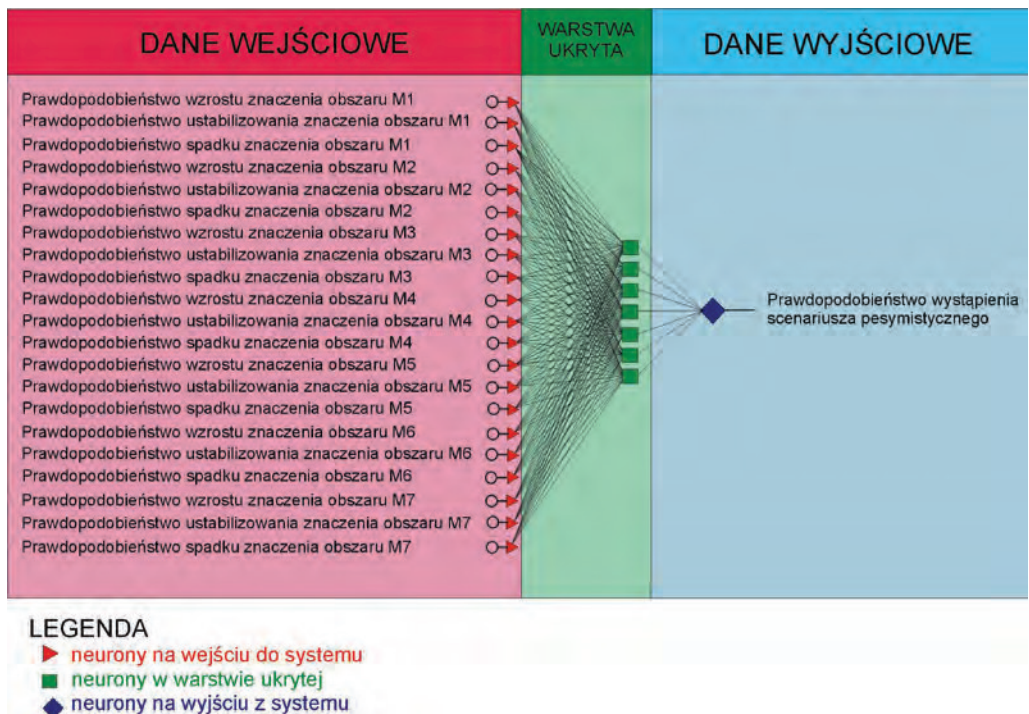
Zgodnie ze **scenariuszem neutralnym** o nazwie *Wypracowany rozwój* światowy kryzys gospodarczy został zażegnany i Świat ostrożnie powraca na ścieżkę wzrostu gospodarczego w paradygmacie zrównoważonego rozwoju, opierającego się na współpracy i integracji międzynarodowej, choć cały czas ciąży nad nim widmo terroryzmu i lokalnych wojen, które w niesprzyjających okolicznościach mogą rozszerzyć się na wiele krajów. Unia Europejska musi ostro walczyć o swoją pozycję wśród gospodarek światowych, zwłaszcza z wyrastającymi na światowe potęgi Chinami i Indiami. W kraju podejmowane są, z różnym skutkiem, próby prowadzenia reform służących transformacji gospodarki, które często spotykają się z niechęcią ludzi do zmian.

Polska stara się wykorzystywać fundusze unijne, lecz nie wszystkie pieniądze zostają efektywnie zagospodarowane. Wdrażanie idei gospodarki opartej na wiedzy i innowacji oraz zrównoważonego rozwoju przynosi efekt w postaci wzrostu poziomu wykształcenia społeczeństwa i jego proekologicznej świadomości. Sektor mikro-, małych i średnich przedsiębiorstw rozwija się w stałym, lecz powolnym tempie, a poziom aplikacji priorytetowych innowacyjnych technologii nadal pozostawia wiele do życzenia. Duże korporacje głównie działają w gałęziach średnio-niskiej i średniowysokiej techniki. Kraj stale boryka się z problemami w obszarze finansów publicznych, rolnictwa i służby zdrowia, a tempo kształtowania się nowoczesnej infrastruktury transportowej i teleinformatycznej jest stałe, lecz stosunkowo wolne. Dostępny potencjał jest tylko częściowo wykorzystywany do realizacji strategicznych celów rozwojowych, statystycznie ludziom żyje się nieco lepiej, lecz nastroje społeczne są mieszane. Teoretycznie dość dobre perspektywy rozwojowe na kolejne lata w głównej mierze zależą od kondycji europejskiej i ogólnoświatowej gospodarki, mądrego gospodarowania finansami publicznymi w długim horyzoncie czasowym i tempa realizacji kolejnych reform popartych zaangażowaniem społeczeństwa.

**Scenariusz pesymistyczny** *Równia pochyła* zakłada, że światowy kryzys gospodarczy został jedynie nieco spowolniony. Świat boryka się z terroryzmem, wzrastającymi cenami ropy naftowej, skutkami katastrof i lokalnych wojen rozszerzających się na coraz liczniejsze kraje. Unia Europejska pozostaje w tyle w odniesieniu do innych gospodarek światowych, zwłaszcza wyrastających na światowe potęgi Chin i Indii. W kraju podejmowane są najczęściej nieudane próby prowadzenia reform służących transformacji gospodarki, które spotykają się z ostracyzmem społecznym i silną niechęcią ludzi do zmian. Przekazywane Polsce fundusze unijne z roku na rok maleją, a większość środków finansowych zostaje wykorzystana na bieżące ratowanie kondycji gospodarki, podczas gdy poziom inwestycji maleje. Wdrażanie idei gospodarki opartej na wiedzy i innowacji oraz zrównoważonego rozwoju, które początkowo zapowiadało się dobrze, podupada. Sektor mikro-, małych i średnich przedsiębiorstw rozwija się słabo, a aplikacja innowacyjnych proekologicznych technologii jest najczęściej niemożliwa ze względu na brak inwestycji i trudno dostępne kredyty. Duże korporacje działają w gałęziach średnio-niskiej i średniowysokiej techniki, a wiele z nich bankrutuje lub przenosi swoje siedziby do państw azjatyckich. Kraj stale boryka się z problemami w obszarze finansów publicznych, rolnictwa, służby zdrowia, edukacji i infrastruktury transportowej. Dostępny potencjał jest słabo wykorzystywany do realizacji strategicznych celów rozwojowych, które najwyraźniej zostały źle sformułowane, statystycznie ludziom żyje się coraz gorzej, czemu towarzyszą niepokoje społeczne. Perspektywy rozwojowe na kolejne lata są słabe i jeżeli nie nastąpi gwałtowny przełom, Polska będzie zmierzać ku katastrofie.



W prowadzonych badaniach przyjęto sposób dedukcji polegający na poszukiwaniu kombinacji mikro- i mezoczynników, która spowoduje, że z określonym prawdopodobieństwem każdy z trzech możliwych makrosceńsariuszy będzie miał miejsce w przyszłości. Pozycję strategiczną technologii szczegółowych i grup technologii krytycznych odpowiadających poziomowi mikro, wraz z określeniem trendów prognozowanego rozwoju, sporządzono na podstawie wyników badań eksperckich i zaprezentowano Rozdziałach 4. i 5. niniejszej książki. Do analizy wzajemnych oddziaływań pomiędzy zdarzeniami w skali makro i mezo zastosowano natomiast własną metodykę badań informatycznych i oryginalne programy komputerowe: SCENNET21 i SCENNET48 [3]. Wyniki badań eksperckich w postaci wartości prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych analizowanych zjawisk, otrzymane w procesie ankietyzacji ekspertów metodą e-Delphix, stanowiły zmienne wejściowe, które posłużyły do trenowania sieci neuronowych. Zmienne wyjściowe są natomiast generowane w postaci różnych wykresów prezentujących zależności pomiędzy wartościami prawdopodobieństwa poszczególnych makrosceńsariuszy a podlegającymi poszczególnym trendom pozostałymi czynnikami analizy [3].



**Rysunek 6.2.** Przykładowy model sieci neuronowej dla pesymistycznego makrosceńsariusza dotyczącego pola badawczego M, który dołączono do programu SCENNET21 jako funkcję

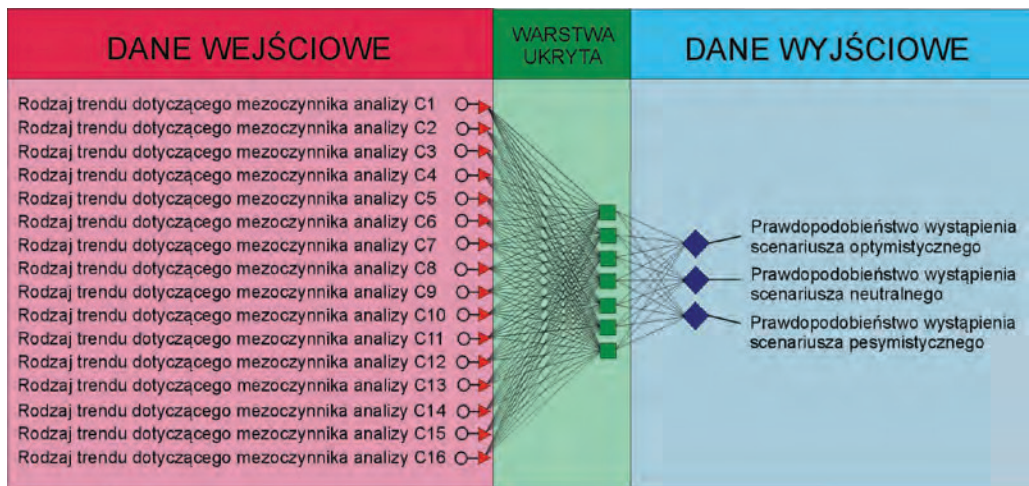
Eksperymenty symulacyjne wykonane z użyciem programu **SCENNET21** [3], napisanego w języku C++, miały na celu określenie, w jakim stopniu na zaistnienie, z danym prawdopodobieństwem, każdego z trzech alternatywnych scenariuszy ma rozwój poszczególnych 14 obszarów tematycznych (rys. 3.5), wchodzących w skład pola badawczego  $M$ , odzwierciedlającego punkt widzenia producenta i pola  $P$  odpowiadającego podejściu klienta. Zadaniem programu SCENNET21 jest w szczególności znalezienie optymalnych parametrów wejściowych, w celu uzyskania zadanej wartości wyjściowej dla wybranych sieci neuronowych. Umożliwia on wyszukiwanie maksymalnej wartości wyjściowej, minimalnej wartości wyjściowej i wartości zadanej przez użytkownika oraz znalezienie wartości suboptymalnych dla jednej z 6 sieci neuronowych przygotowanych za pomocą programu *Statistica Neural Networks 4.0F*. Sieci zaimplementowano w języku C++ i dołączono do programu jako funkcje. Każda z tych funkcji, jako parametry wejściowe, przyjmuje 21-elementową tablicę reprezentującą zmienne wejściowe wybranej sieci neuronowej, a wynikiem jej działania jest liczba reprezentująca zmienną wyjściową sieci neuronowej. Zbiór 21 parametrów wejściowych jest podzielony na siedem trzelementowych grup, z których każda odpowiada jednemu analizowanemu obszarowi tematycznemu, odpowiednio od  $M1$  do  $M7$  oraz od  $P1$  do  $P7$ , w zależności od wybranej sieci. Trzy elementy wewnątrz grupy oznaczają kolejno: prawdopodobieństwo wystąpienia trendu wzrostowego, prawdopodobieństwo wystąpienia trendu ustabilizowanego na dotychczasowym poziomie i prawdopodobieństwo wystąpienia trendu spadkowego w odniesieniu do poszczególnych grup technologii, na tle ogółu technologii inżynierii powierzchni. Każdy parametr wejściowy funkcji może przyjmować wartości z przedziału  $\langle 0, 100 \rangle$ . Przykład modelu sieci neuronowej, sporządzonego w odniesieniu do pesymistycznego makroscenariusza dotyczącego pola badawczego  $M$ , zaprezentowano na rysunku 6.2. Zbiór wszystkich sześciu modeli stanowi kombinację dwóch rozpatrywanych pól badawczych ( $M$  i  $P$ ) i trzech rodzajów makroscenariuszy, o strukturze różniącej się liczbą neuronów w warstwie ukrytej. Algorytm działania programu SCENNET21 zostaje uruchomiony w momencie, gdy użytkownik określa następujące parametry wyszukiwania:

- liczbę iteracji wyszukiwania rozwiązania,
- sieć, która będzie funkcją celu,
- zakresy zmiennych wejściowych,
- wartość oczekiwaną dla zmiennej wyjściowej sieci.

Wykorzystując wprowadzone dane wejściowe, program oblicza szerokość zakresów poszukiwań, a następnie wszystkie możliwe kombinacje prawdopodobieństw dotyczące każdego obszaru tematycznego, dające sumę 100. Symulacje przeprowadzono przy założeniu, że obszar poszukiwań wartości zmiennych decyzyjnych jest ograniczony do zakresu zmian, zdefiniowanych

w ograniczeniach modeli neuronowych. Kolejnym krokiem jest wylosowanie siedmiu kombinacji prawdopodobieństw zapisanych na poprzednim etapie, a następnie jest uruchamiana funkcja reprezentująca sieć neuronową, gdzie parametrami wejściowymi jest siedem kombinacji liczb wylosowanych w poprzednim kroku. Wartość wyjścia sieci jest zapisywana do tablicy *magazyn*, a następnie usuwana jest z niej najgorsza wartość. Wymienione etapy są powtarzane do momentu, gdy licznik pętli jest równy liczbie iteracji określonej na wstępie przez użytkownika, umożliwiając finalnie określenie wartości prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych trendów rozwojowych (wzrostowego, ustabilizowanego na dotychczasowym poziomie i spadkowego) analizowanych obszarów tematycznych, przy żądanej przez użytkownika wartości prawdopodobieństwa wystąpienia każdego z trzech alternatywnych makroszenariuszy przyszłych wydarzeń. Użytkownik przeprowadzając symulację komputerową, może zarówno zadać konkretną wartość liczbową prawdopodobieństwa wybranego makroszenariusza, jak i poszukiwać rozwiązania dla jego skrajnych wartości, tj. maksymalnej lub minimalnej. Po zakończeniu obliczeń wyniki są prezentowane w postaci tabeli. Istnieje możliwość eksportu wyników do arkusza kalkulacyjnego i ich prezentacji w postaci wykresu zapisanego do pliku graficznego.

**Program SCENNET48** został utworzony w celu określenia, w jaki sposób kluczowe mezo-czynnikii rozwoju inżynierii powierzchni materiałów (rys. 3.12) wpływają na prawdopodobieństwo wystąpienia poszczególnych makroszenariuszy przyszłych wydarzeń: optymistycznego, neutralnego



**LEGENDA**

- ▶ neurony na wejściu do systemu
- neurony w warstwie ukrytej
- ◆ neurony na wyjściu z systemu

**Rysunek 6.3.** Model sieci neuronowej dołączony do programu SCENNET48 jako funkcja [3]



i pesymistycznego, z użyciem modelu sieci neuronowej mającego 16 neuronów na wejściu, 3 na wyjściu i 7 w warstwie ukrytej (rys. 6.3). Program SCENNET48 daje możliwość wykonania symulacji komputerowych, przy założeniu że zmienna niezależna może przyjmować wartość ze zbioru  $\{1, 0, -1\}$ , odpowiadając kolejno trendowi wzrostowemu, neutralnemu i spadkowemu. Uwzględniając 16 zmiennych, liczba możliwych przypadków wynosi  $3^{16}$ , czyli 43 046 721. Jeżeli poszczególne mezocynniki mogą przyjmować tylko dwie wartości, liczba przypadków zostaje ograniczona do  $2^{16}$ , czyli 65 536, stąd wykonując symulacje w trzech wariantach przyjęto takie właśnie założenie początkowe. Interfejs użytkownika pozwala ponadto na arbitralne zadanie wartości poszczególnym mezocynnikom z dostępnego zbioru i obserwację wpływu zmiany tych wartości na prognozowane prawdopodobieństwo wystąpienia danego makrosценariusza. Wyniki symulacji mogą być prezentowane tabelarycznie lub w postaci graficznej. Do predykcji wartości prawdopodobieństwa wystąpienia makrosценariusza program wykorzystuje funkcję klasy *f\_16zRun*, będącą implementacją w języku C++ wcześniej przygotowanej i wytrenowanej jednej z trzech opracowanych w tym celu sztucznych sieci neuronowych. Parametrami wejściowymi tej funkcji jest 16 liczb typu *double*, określających rodzaj występującego trendu i odpowiadających każdemu z 16 mezocynników. Wartości wyjściowe funkcji zawarte są w tablicy trzech liczb typu *double*, które odpowiadają kolejnym prawdopodobieństwom wystąpienia makrosценariuszy. Każda ze zmiennych wyjściowych może przyjmować wartości z zakresu od 0 do 100, przy czym suma elementów tablicy wartości wyjściowych musi być równa 100. Interfejs użytkownika pozwala na ustalenie wartości wejściowych za pomocą 48 elementów typu *TRadioButton*, podzielonych na 16 grup po 3 elementy umieszczone w elemencie *TPanel*. W celu poprawienia ergonomii interfejsu użytkownika, po wskazaniu dowolnego elementu *TRadioButton*, w panelu, na którym znajduje się element, zmienia się kolor tła na zielony, żółty lub czerwony, co dotyczy odpowiednio trendów: wzrostowego, neutralnego i spadkowego dla każdego z 16 mezocynników. Zastosowanie do rozwiązania rozpatrywanego problemu badawczego narzędzi sztucznej inteligencji pozwala na błyskawiczne wyszukiwanie w wielotysięcznym zbiorze rozwiązania zbliżonego do optymalnego, satysfakcjonującego użytkownika. Sieć neuronowa wytrenowana z użyciem zaimplementowanych do niej danych wejściowych, pozyskanych w drodze ankietyzacji ekspertów, generuje wielowariantowe prognozy przyszłych wydarzeń.

W kolejnych podrozdziałach zostaną zaprezentowane eksperymenty symulacyjne, stanowiące reprezentatywne przykłady dużo szerszych badań, wskazujące, że zasadne jest stosowanie sieci neuronowych do analizy wzajemnych oddziaływań pomiędzy zdarzeniami w ramach kreowania wielowariantowych probabilistycznych scenariuszy przyszłych wydarzeń. Sztuczne sieci neuronowe cieszą się w ostatniej dekadzie dużym zainteresowaniem naukowców, ponieważ

charakteryzuje je łatwość użycia, związana z brakiem konieczności programowania i możliwością rozwiązywania problemów bez znajomości analitycznej zależności między danymi wejściowymi i oczekiwanymi wyjściami. Zalety modeli obliczeniowych utworzonych z użyciem sztucznych sieci neuronowych powodują, że są one wybitnie predestynowane do rozwiązywania szerokiej gamy różnorodnych problemów dotyczących wielu materiałów inżynierskich. Wśród najważniejszych z tych zalet należy wyróżnić: wysoką odporność na szумы w danych uczących, wysoką efektywność w systemach z dużą liczbą danych, umiejętność przetwarzania danych ilościowych i jakościowych, możliwość współdziałania z innymi metodami modelowania oraz zdolność do generalizacji wiedzy nabytej w trakcie uczenia. W ostatniej dekadzie sieci neuronowe z powodzeniem użyto do modelowania i symulowania własności różnych rodzajów stali konstrukcyjnych, maszynowych, narzędziowych, szybko tnących i niskostopowych pracujących w warunkach pełzania, odlewniczych stopów metali lekkich i materiałów kompozytowych. Liczne z tych prac zostały wykonane w Instytucie Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych Politechniki Śląskiej [355, 479-483]. Należy podkreślić, że ogólnie rzecz biorąc zakres współczesnych zastosowań metod sztucznej inteligencji w nauce o materiałach i inżynierii materiałowej, związany z modelowaniem i symulacją procesów technologicznych wytwarzania, przetwórstwa oraz kształtowania struktury, własności użytkowych i eksploatacyjnych materiałów, jest szeroki. Dotyczy on nie tylko wspomnianych już sieci neuronowych, lecz także logiki rozmytej [484-486], algorytmów genetycznych [487, 488], systemów ekspertowych [489] i metod hybrydowych łączących w sobie przynajmniej dwie różne klasyczne metody sztucznej inteligencji.

Najnowsze badania własne wskazują na możliwość rozszerzenia zakresu dotychczasowych zastosowań szeroko rozumianych metod sztucznej inteligencji na nowe obszary związane z prognozowaniem rozwoju technologii obróbki powierzchniowej materiałów, którego celem jest świadome ukierunkowanie obszarów przyszłych badań i inwestycji na obszary najlepiej rokujące i mogące w przyszłości przynieść największą wartość dodaną oraz ograniczenie ryzyka towarzyszącego temu procesowi. Utworzone modele obliczeniowe wykorzystano do kreowania wielowariantowych probabilistycznych scenariuszy przyszłych wydarzeń, na podstawie heurystycznych zmiennych niezależnych pozyskanych w drodze wieloetapowego ankietowania ekspertów. W szczególności określono zależności pomiędzy zaistnieniem z określonym prawdopodobieństwem każdego z rozpatrywanych alternatywnych makroscenariuszy a wariantami zmiany poszczególnych obszarów tematycznych lub mezoczynnikiem, biorąc pod uwagę fakt, że ich znaczenie może w założonym horyzoncie czasowym rosnać, pozostawać na ustabilizowanym poziomie lub maleć. Eksperymentalny i nowatorski pomysł implementacji sieci neuronowych do kreowania scenariuszy przyszłych wydarzeń wiązał się z napotkaniem wszystkich

trudności, które spotykają pionierów. Główne wyzwanie stanowiła specyfika danych wejściowych w postaci wyrażonych liczbowo (w procentach) opinii ekspertów. Spotykana rozbieżność oceny zjawisk wynikała z jej subiektywności, wpisanej w specyfikę badań eksperckich. W szczególności eksperci, zapewne w sposób niezamierzony, z jednej strony starali się reprezentować interesy własnych środowisk, a z drugiej strony na zagadnienia o dużym poziomie ogólności (skala makro i mezo) niejednokrotnie spoglądali przez pryzmat swojej znacznie węższej specjalizacji.

O zasadności realizacji badań z użyciem narzędzi sztucznej inteligencji, w obszarze inżynierii materiałowej i nauki o materiałach, decydują przesłanki ekonomiczne. Nakłady na klasyczne eksperymenty materiałoznawcze obejmują w podstawowym wariantcie wynagrodzenia pracowników naukowo-badawczych, materiał do badań i zwykle bardzo wysokie koszty eksploatacji specjalistycznej aparatury naukowo-badawczej, a często także dodatkowo koszty zakupu i/lub modernizacji bazy sprzętowej, współpracy krajowej i/lub zagranicznej, a także powtórzenia lub poszerzenia zakresu eksperymentów bądź testowania prototypów w warunkach przemysłowych. Koszt modelowania i eksperymentów symulacyjnych z użyciem narzędzi sztucznej inteligencji jest nieporównanie niższy. W wielu przypadkach na ich podstawie jest możliwe podejmowanie szybkich i trafnych decyzji dotyczących doboru parametrów procesu lub składu chemicznego materiałów. Narzędzia sztucznej inteligencji mogą być także stosowane jako metody wstępnej selekcji, zawężające zakres poszukiwań na wstępnym etapie eksperymentów materiałoznawczych, co również daje istotne oszczędności czasu i środków finansowych.

### 6.3. Wpływ wzrostu znaczenia kluczowych mezoczynników na prawdopodobieństwo wystąpienia opcjonalnych makroscenariuszy przyszłych wydarzeń

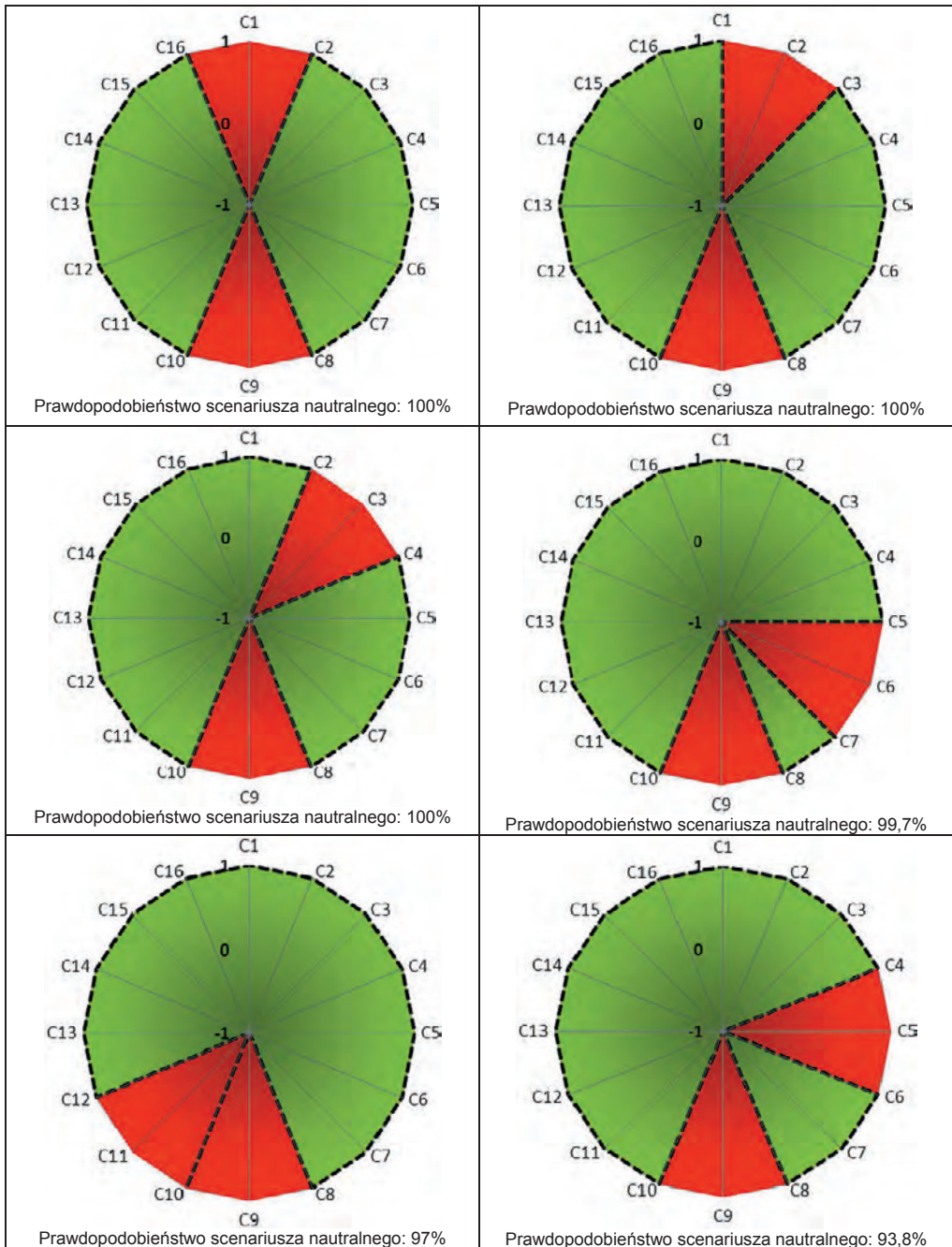
W celu określenia wpływu kluczowych, wyselekcjonowanych na wcześniejszych etapach prac, mezoczynników determinujących rozwój inżynierii powierzchni materiałów (rys. 3.12) na wartość prawdopodobieństwa zaistnienia opcjonalnych makroscenariuszy przyszłych wydarzeń, zastosowano oryginalny program komputerowy SCENNET48, do którego dołączono jako funkcję – uprzednio wytrenowaną, z użyciem zaimplementowanych do niej danych wejściowych, stanowiących wyniki badań eksperckich – sztuczną sieć neuronową.

W ramach badań symulacyjnych wykonano trzy grupy eksperymentów, których wybrane wyniki zaprezentowano w niniejszej książce, przyjmując następujące **wstępne założenia** [3]:

1. W odniesieniu do każdego wektora wyjściowego klasyfikator oblicza wartość prawdopodobieństwa wystąpienia scenariusza optymistycznego, neutralnego lub pesymistycznego.

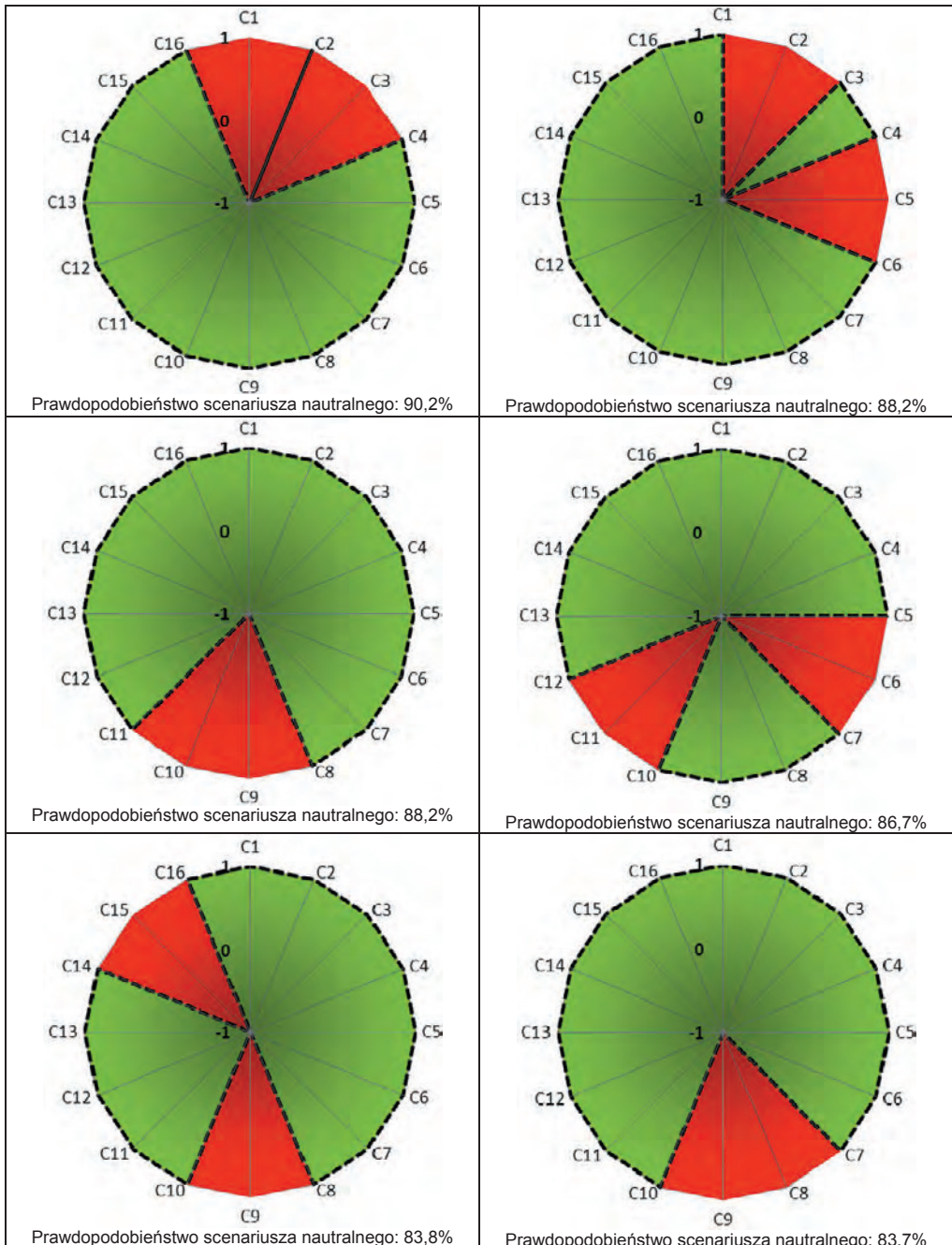
2. Każda zmienna niezależna może przyjmować jedną z trzech wartości ze zbioru  $\{1, 0, -1\}$ , przy czym wartość 1 odpowiada trendowi wzrostowemu, 0 – trendowi ustabilizowanemu na dotychczasowym poziomie (neutralnemu), natomiast -1 – trendowi spadkowemu danego mezoczynnika.
3. Poszczególne zmienne niezależne, podczas każdego z eksperymentów, mogą przyjmować tylko dwie wybrane wartości ze zdefiniowanego zbioru wartości dopuszczalnych  $\{1, 0, -1\}$ , dzięki czemu liczba możliwych przypadków zostaje ograniczona z  $3^{16}$ , czyli 43 046 721, co odpowiada liczbie wszystkich kombinacji rozpatrywanych równocześnie 16 mezoczynników mogących przyjmować każdy z 3 możliwych trendów, do  $2^{16}$ , czyli 65 536, co ma miejsce, gdy tylko 2 trendy są brane pod uwagę.

**Pierwsza grupa eksperymentów** miała na celu wyselekcjonowanie mezoczynników, które wpłyną na zmianę makroscenariusza z optymistycznego na neutralny wraz z określeniem wartości prawdopodobieństwa tego zdarzenia. Zmienne niezależne mogą przyjmować wartość ze zbioru  $\{1, -1\}$ , co odpowiada zmianie trendu badanych mezoczynników ze wzrostowego na spadkowy. Zgodnie z przyjętym założeniem poszukiwano przypadków, w których liczba mezoczynników wykazujących zmianę trendu ze wzrostowego na spadkowy jest jak najmniejsza. Wyniki wykonanych eksperymentów, w których zdaniem ekspertów zmiana dwóch mezoczynników z największym prawdopodobieństwem wpływa na zmianę makroscenariusza z optymistycznego na neutralny zaprezentowano na rysunkach 6.4-6.6. Kolorem zielonym oznaczono pola odpowiadające wzrostowym trendom mezoczynników, natomiast kolor czerwony oznacza trend spadkowy danego mezoczynnika poddanego analizie szczegółowej. Zgodnie z wynikami wykonanych eksperymentów wśród sześciu dwuelementowych kombinacji (rys. 6.4), których równoczesne wystąpienie z największym prawdopodobieństwem, zawierającym się w przedziale  $(91; 100)$ , spowoduje zmianę makroscenariusza z optymistycznego na neutralny, znajduje się każdorazowo mezoczynnik (C9) Dążenie do ciągłego doskonalenia poprzez zapewnianie wyższej jakości technologii i liczne wdrożenia, zwłaszcza w małych i średnich przedsiębiorstwach. Kombinacja mezoczynnika C9 z mezoczynnikami: (C1) Skuteczność działań państwa służących umożliwieniu szerokiego dostępu do informacji dotyczących kluczowych technologii i wyników foresightów technologicznych; (C2) Przejrzystość i przyjazność przepisów prawnych lub (C3) Strategiczne priorytety zjednoczonej Europy określone poziomem współpracy międzynarodowej i kwotą przekazywanych funduszy, spowoduje zmianę makroscenariusza z optymistycznego na neutralny ze stuprocentowym prawdopodobieństwem. Zmiana trendu mezoczynnika C9 ze wzrostowego na spadkowy w połączeniu z taką samą zmianą dotyczącą mezoczynnika (C6) Poziom społeczeństwa informacyjnego kształtowany poprzez politykę edukacyjną państwa,

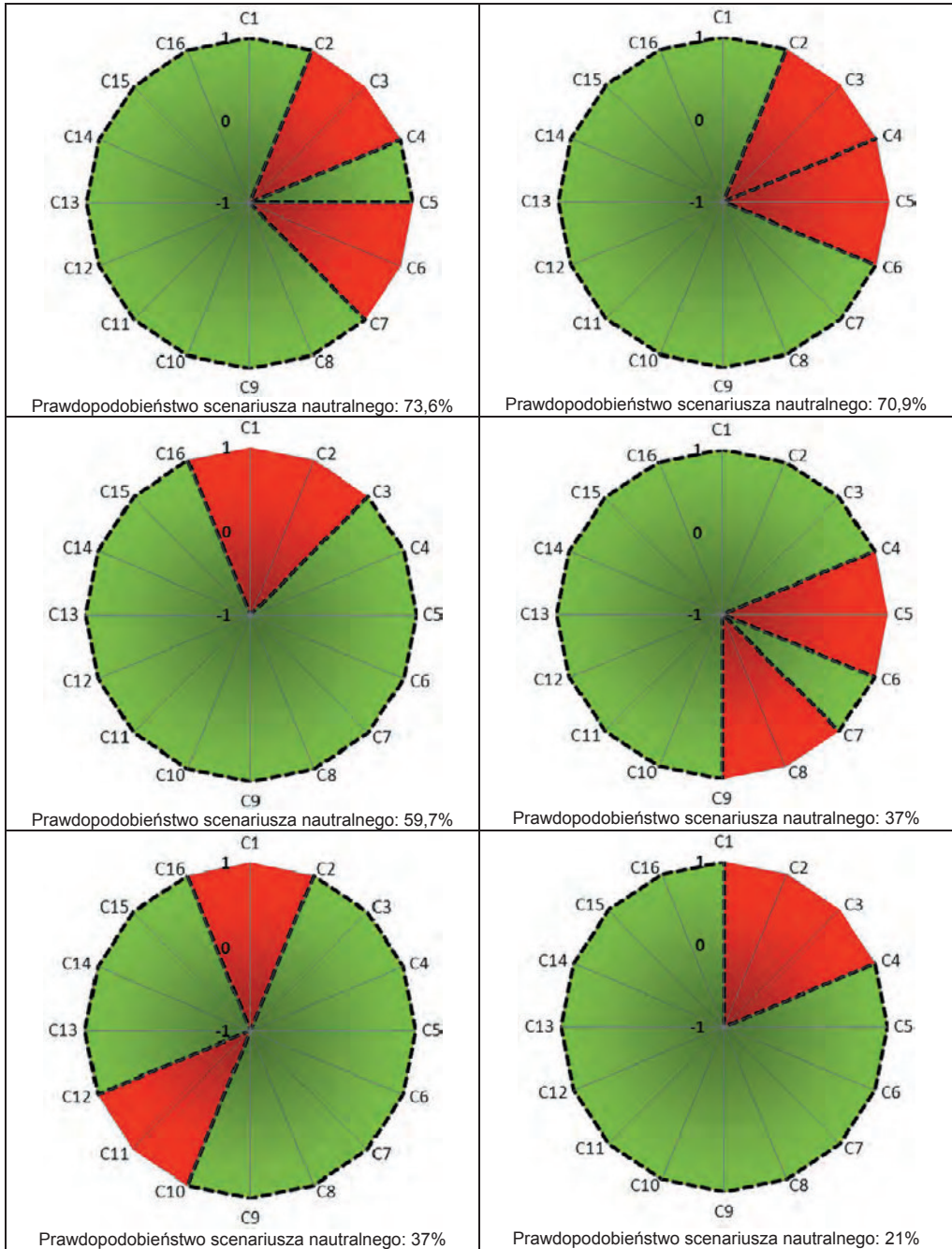


**Rysunek 6.4.** Dwieelementowe kombinacje mezoczynników najsilniej wpływających na zmianę makroszenariusza z optymistycznego na neutralny z prawdopodobieństwem z przedziału (91; 100)





**Rysunek 6.5.** Dwieelementowe kombinacje mezoczynników najsilniej wpływających na zmianę makroscenariusza z optymistycznego na neutralny z prawdopodobieństwem z przedziału (80, 91)

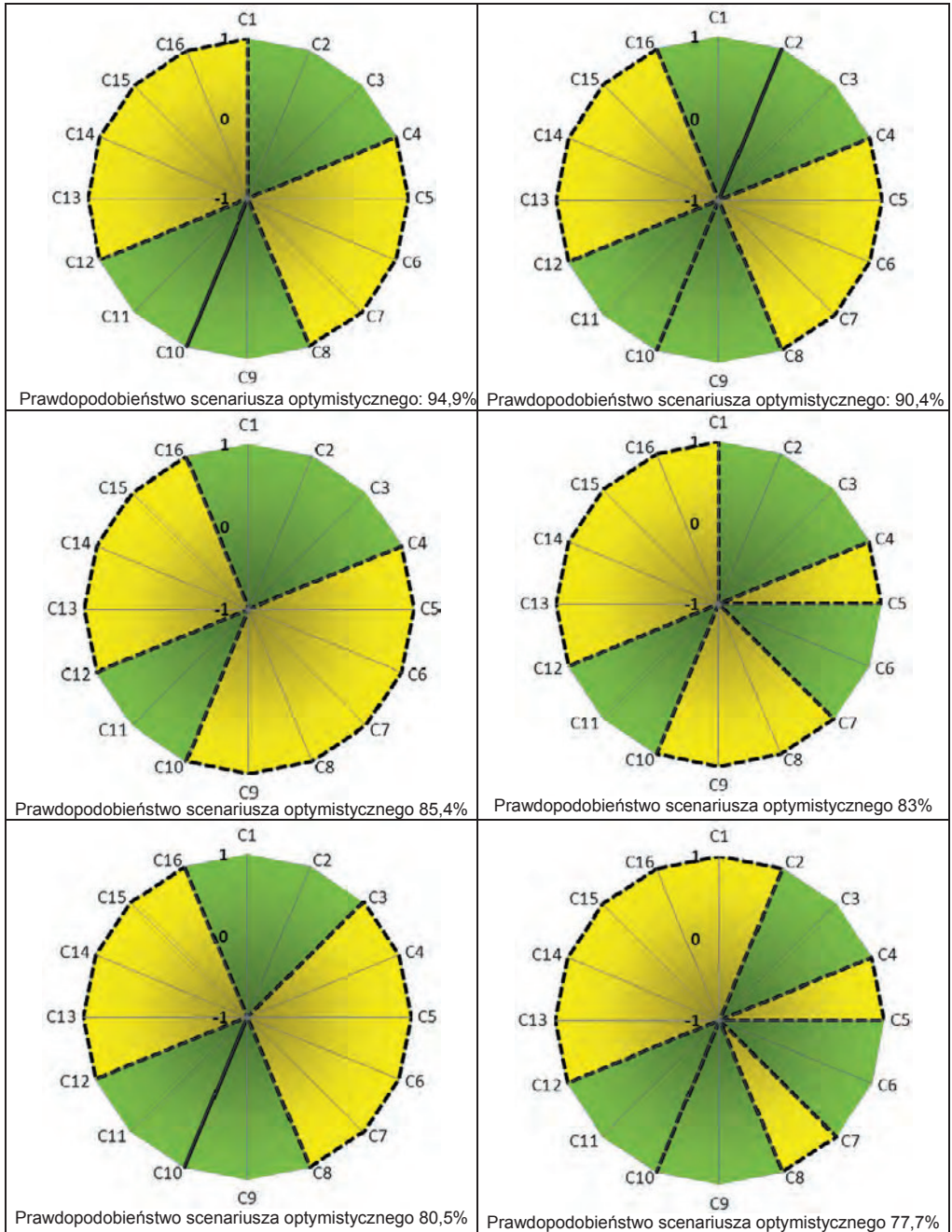


**Rysunek 6.6.** Dwieelementowe kombinacje mezoczynników najsilniej wpływających na zmianę makroszenariusza z optymistycznego na neutralny z prawdopodobieństwem z przedziału (20, 80)

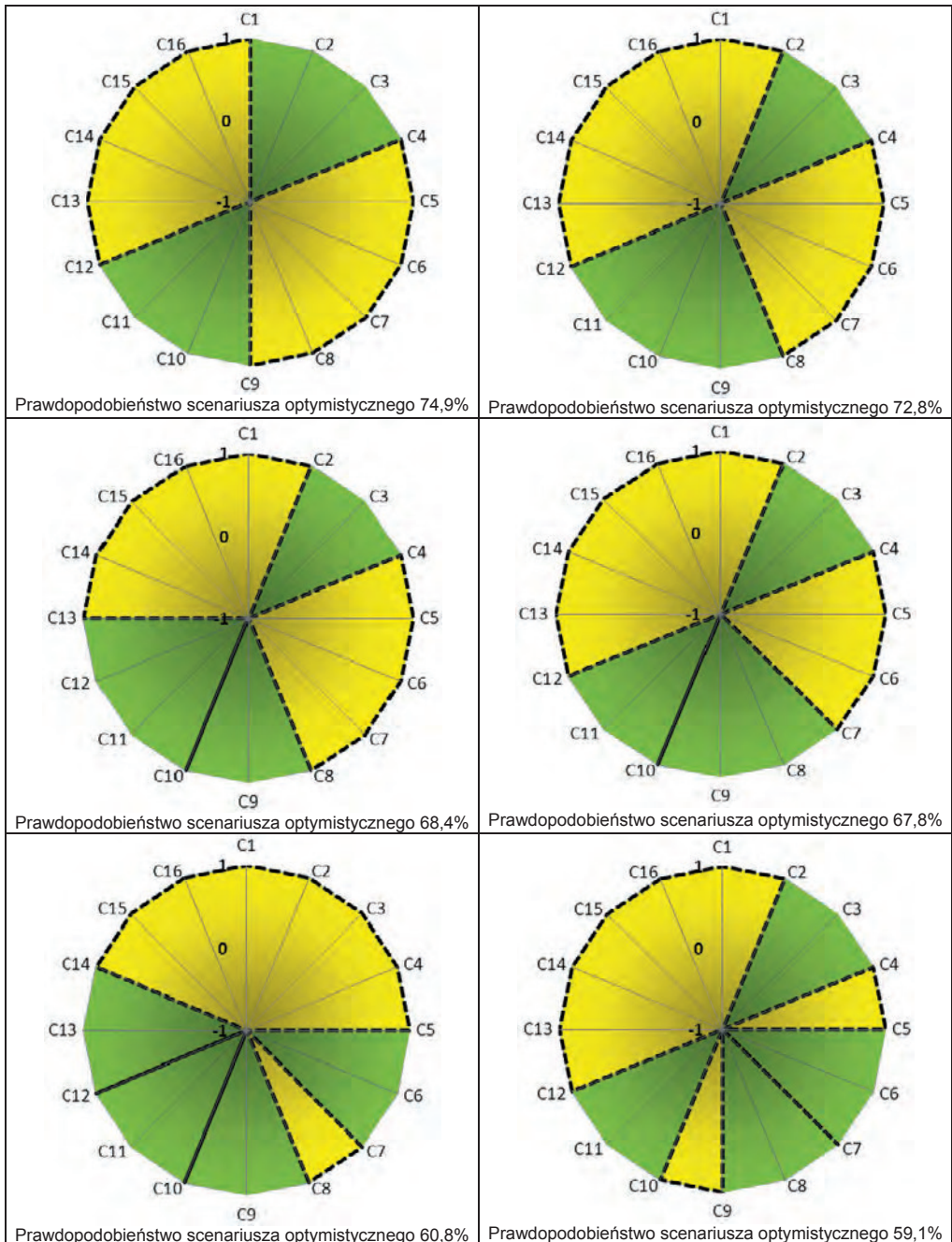


spowoduje natomiast zmianę makroscenariusza z optymistycznego na neutralny z prawdopodobieństwem równym 99,7%. Podobnie zmianę makroscenariusza z optymistycznego na neutralny spowoduje połączenie spadkowych trendów mezoczynnika C9 z mezoczynnikiem (C11) Znaczenie technologii proekologicznych dla poprawy funkcjonalności, wydłużenia żywotności i możliwości recyklingu (prawdopodobieństwo: 97%), jak również z mezoczynnikiem (C5) Poziom współpracy pomiędzy środowiskami naukowymi i przemysłowymi (prawdopodobieństwo: 93,8%). Kolejne dwuelementowe kombinacje mezoczynników, których zmiana z tendencji wzrostowej na spadkową spowoduje zmianę makroscenariusza z optymistycznego na neutralny z prawdopodobieństwem zawartym w przedziałach  $(80, 91)$  i  $(20, 80)$  zaprezentowano odpowiednio na rysunkach 6.5 i 6.6.

Celem **drugiej grupy eksperymentów** było określenie mezoczynników, które wpłyną na zmianę makroscenariusza z neutralnego na optymistyczny wraz z określeniem wartości prawdopodobieństwa tego zdarzenia. Zmienne niezależne mogą przyjmować wartość ze zbioru  $\{0, 1\}$ , co odpowiada zmianie trendu badanych mezoczynników z neutralnego na wzrostowy. Zgodnie z przyjętym założeniem poszukiwano przypadków, w których liczba mezoczynników wykazujących zmianę trendu z ustabilizowanego na wzrostowy jest jak najmniejsza i dla prowadzonego eksperymentu wynosi 4. Wyniki wykonanych eksperymentów, w których zdaniem ekspertów zmiana czterech mezoczynników z największym prawdopodobieństwem wpływa na zmianę makroscenariusza z neutralnego na optymistyczny zaprezentowano na rysunkach 6.7-6.9. Kolorem zielonym oznaczono pola odpowiadające wzrostowym trendom mezoczynników, natomiast kolor żółty oznacza trend danego mezoczynnika ustabilizowany na dotychczasowym poziomie (neutralny). Analiza wyników eksperymentów symulacyjnych wykazuje największe prawdopodobieństwo (94,9%) zmiany makroscenariusza z neutralnego na optymistyczny, w przypadku gdy nastąpi równoczesna zmiana trendów z neutralnych na wzrostowe, dotyczących następujących mezoczynników: (C2) Przyjazność i przejrzystość przepisów prawnych; (C3) Strategiczne priorytety zjednoczonej Europy określone poziomem współpracy międzynarodowej i kwotą przekazywanych funduszy; (C9) Dążenie do ciągłego doskonalenia poprzez zapewnianie wyższej jakości technologii i liczne wdrożenia, zwłaszcza w małych i średnich przedsiębiorstwach oraz (C11) Znaczenie technologii proekologicznych dla poprawy funkcjonalności, wydłużenia żywotności i możliwości recyklingu. Kolejne czteroelementowe kombinacje mezoczynników, których zmiana z tendencji ustabilizowanej na dotychczasowym poziomie na wzrostową spowoduje zmianę makroscenariusza z neutralnego na optymistyczny z prawdopodobieństwem zawartym kolejno w przedziałach  $(100, 75)$ ,  $(58, 75)$  i  $(20; 68)$  zaprezentowano odpowiednio na rysunkach 6.7-6.9.

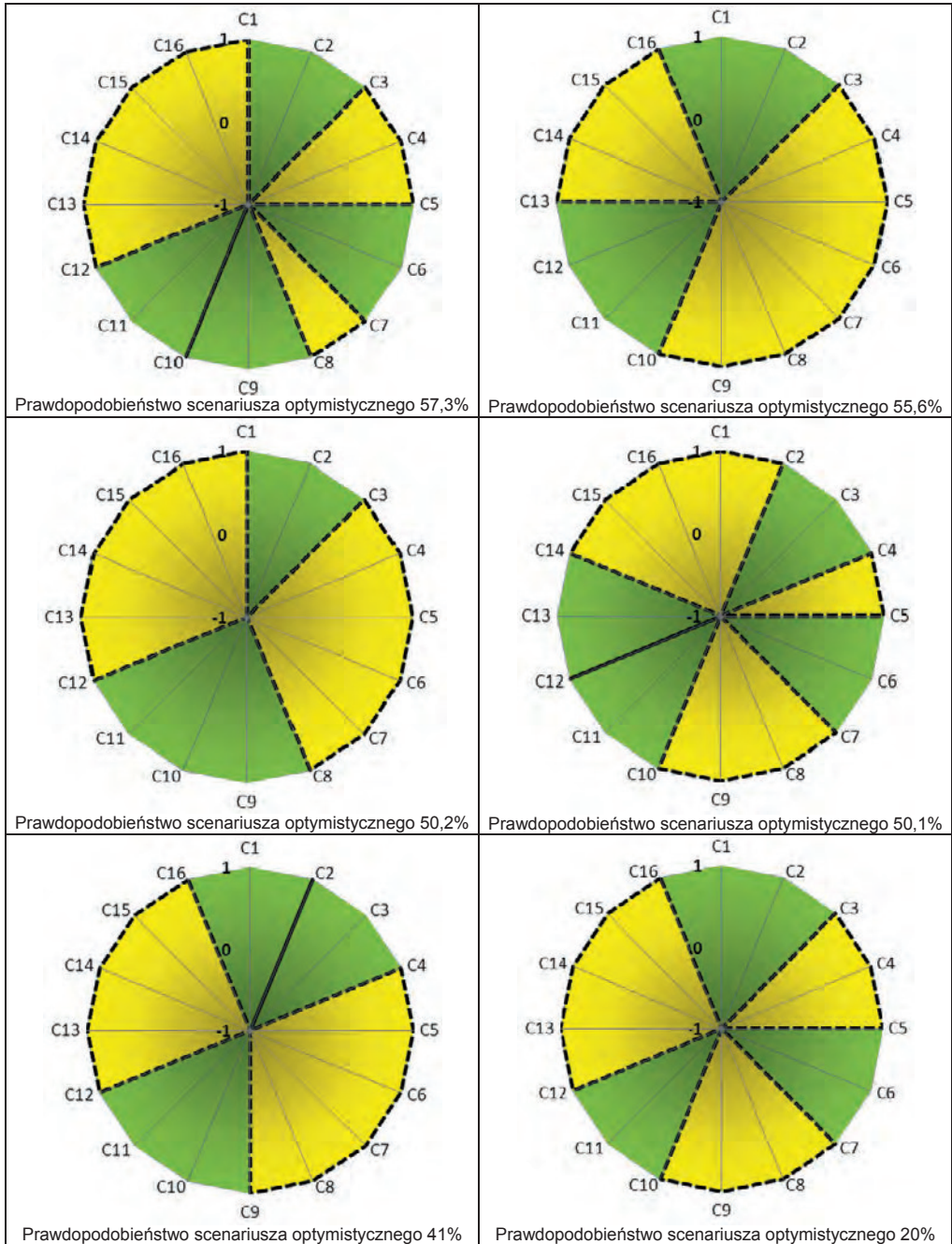


**Rysunek 6.7.** Czteroelementowe kombinacje mezoczynników najsilniej wpływających na zmianę makroscenariusza z neutralnego na optymistyczny z prawdopodobieństwem z przedziału  $\langle 75, 100 \rangle$

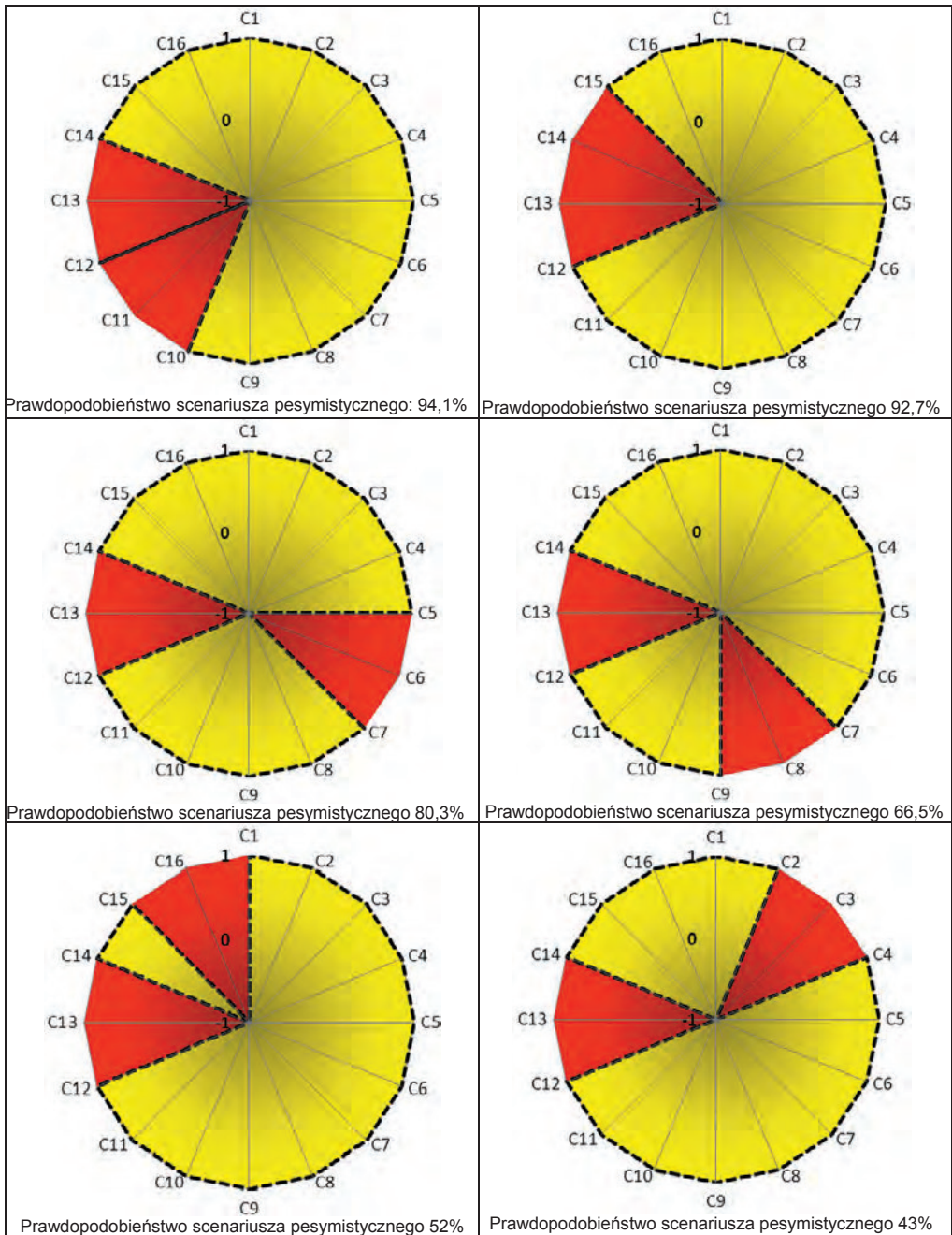


**Rysunek 6.8.** Czteroelementowe kombinacje mezoczynników najsilniej wpływających na zmianę makroszenariusza z neutralnego na optymistyczny z prawdopodobieństwem z przedziału (58, 75)

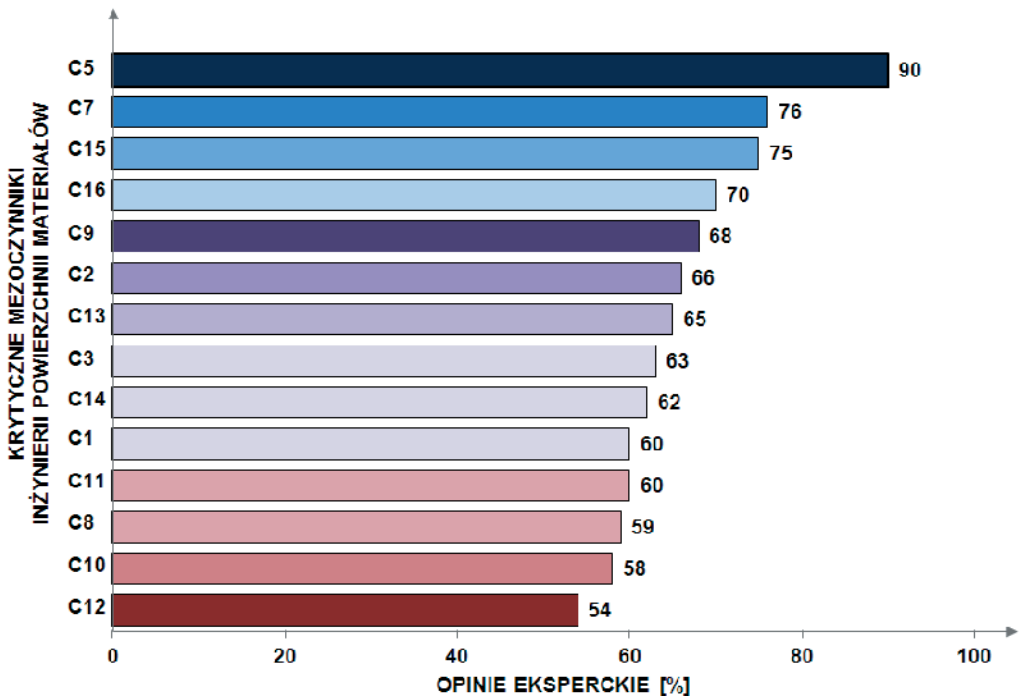




**Rysunek 6.9.** Czteroelementowe kombinacje mezoczynników najsilniej wpływających na zmianę makroscenariusza z neutralnego na optymistyczny z prawdopodobieństwem z przedziału (20; 68)



**Rysunek 6.10.** Dwuelementowe kombinacje mezoczynników najsilniej wpływających na zmianę makroszenariusza z neutralnego na pesymistyczny z prawdopodobieństwem z przedziału (40; 100)



*Rysunek 6.11. Wyrażona procentowo liczba odpowiedzi potwierdzających tezę, że dany mezoczynnik jest kluczowy i jego znaczenie powinno bezwzględnie wzrastać, aby w ciągu najbliższych 20 lat mógł zaistnieć optymistyczny makrosceńariusz rozwoju inżynierii powierzchni materiałów*

**Trzecia grupa eksperymentów** miała na celu wyłonienie mezoczynników, które wpłyną na zmianę makrosceńariusza z neutralnego na pesymistyczny wraz z określeniem wartości prawdopodobieństwa wystąpienia tego zdarzenia. Zmienne niezależne, w przypadku tych eksperymentów, mogą przyjmować wartość ze zbioru  $\{0, -1\}$ , co odpowiada zmianie trendu badanych mezoczynników z neutralnego na spadkowy. Podobnie jak podczas pozostałych eksperymentów przyjęto założenie, że poszukiwana jest minimalna liczba zmieniających się trendów, dotyczących poszczególnych mezoczynników. Wyniki wykonanych eksperymentów doprowadziły do wyznaczenia zbioru dwuelementowych kombinacji mezoczynników, których zmiana z tendencji z ustabilizowanej na spadkową spowoduje z największym prawdopodobieństwem, zawartym z zbiorze  $\langle 40; 100 \rangle$ , zmianę makrosceńariusza z neutralnego na pesymistyczny, co zaprezentowano na rysunku 6.10. Kolorem czerwonym oznaczono pola odpowiadające spadkowym trendom mezoczynników, natomiast kolor żółty oznacza trend danego mezoczynnika ustabilizowany na dotychczasowym poziomie (neutralny). Zgodnie z wynikami eksperymentów symulacyjnych najbardziej prawdopodobna (94,1%) jest zmiana makrosceńariusza

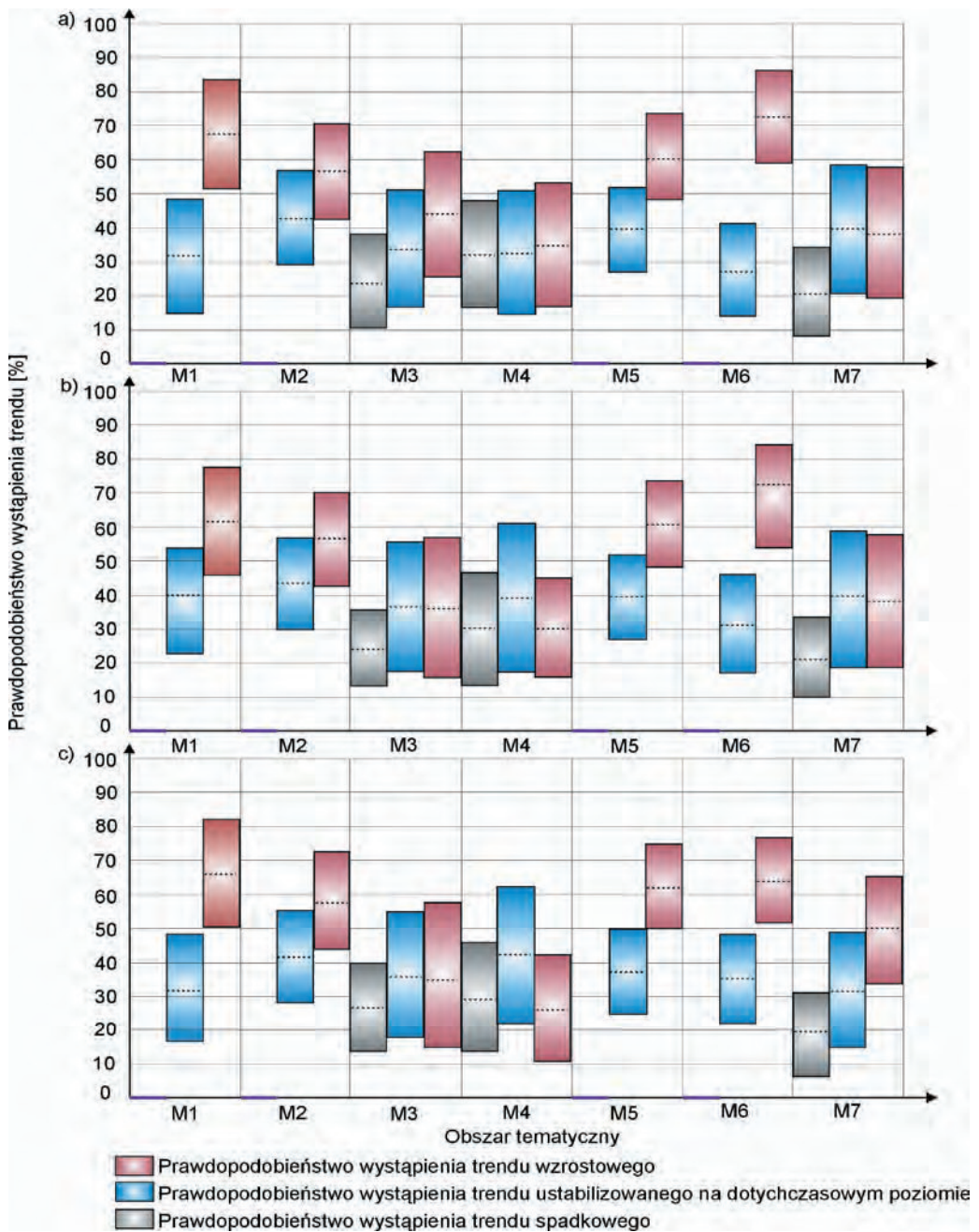
z neutralnego na pesymistyczny przy równoczesnej zmianie trendów z neutralnych na pesymistyczne, dotyczących następujących mezoczynników: (C11) Znaczenie technologii proekologicznych dla poprawy funkcjonalności, wydłużenia żywotności i możliwości recyklingu oraz (C13) Znaczenie technologii podwyższających własności mechaniczne, trybologiczne i antykorozyjne warstw wierzchnich.

Uzupełnieniem i potwierdzeniem badań symulacyjnych są wyniki badań heurystycznych (liczebność próby: 227) (rys. 6.11) wykonanych metodą e-Delphix [3], zgodnie z którymi za najważniejsze mezocynniki, determinujące możliwość zaistnienia w ciągu najbliższych 20 lat optymistycznego scenariusza rozwoju inżynierii powierzchni materiałów, eksperci uznali: poziom współpracy pomiędzy środowiskami naukowymi i przemysłowymi (90%), liczbę specjalistycznych laboratoriów i placówek badawczo-rozwojowych (76%), wzrost znaczenia technologii wytwarzania nanomateriałów (75%) i materiałów gradientowych (70%), a także dążenie do ciągłego doskonalenia poprzez zapewnienie wyższej jakości technologii i liczne wdrożenia priorytetowych innowacyjnych technologii w małych i średnich przedsiębiorstwach (68%). Spośród analizowanych mezoczynników najniżej oceniono wpływ znaczenia technologii alternatywnych, w tym hybrydowych, na zaistnienie w przyszłości optymistycznego scenariusza wydarzeń, natomiast należy zauważyć, że pomimo przyznania oceny najniższej, ponad połowa (54%) respondentów potwierdziła tezę, że czynnik ten jest kluczowy i istotny dla przyszłości inżynierii powierzchni materiałów.

#### 6.4. Wpływ rozwoju obszarów tematycznych na prawdopodobieństwo wystąpienia opcjonalnych makroscenariuszy przyszłych wydarzeń

Na rysunku 6.12. przedstawiono przykładowe wyniki trzech eksperymentów symulacyjnych, wykonanych w odniesieniu do pola badawczego  $M$ , w postaci wykresów wygenerowanych z użyciem programu SCENNET21, dotyczących scenariusza pesymistycznego, dla którego wartość prawdopodobieństwa kolejno określono na poziomie 5% (rys. 6.12a), 15% (rys. 6.12b) i 25% (rys. 6.12c). Na osi rzędnych znajdują się określone w procentach wartości prawdopodobieństwa wystąpienia trendu wzrostowego, ustabilizowanego na dotychczasowym poziomie i spadkowego. Na oś odciętych naniesiono natomiast poszczególne obszary tematyczne poddane analizie, czyli kolejno: ( $M1$ ) Technologie laserowe w inżynierii powierzchni, ( $M2$ ) Technologie PVD, ( $M3$ ) Technologie CVD, ( $M4$ ) Technologie cieplno-chemiczne, ( $M5$ ) Technologie polimerowych warstw wierzchnich, ( $M6$ ) Technologie nanostrukturalnych warstw wierzchnich, ( $M7$ ) Inne technologie inżynierii powierzchni. Wykonane, z użyciem sieci neuronowych, symulacje komputerowe wskazują na przewidywaną wiodącą rolę rozwoju technologii nanostrukturalnych

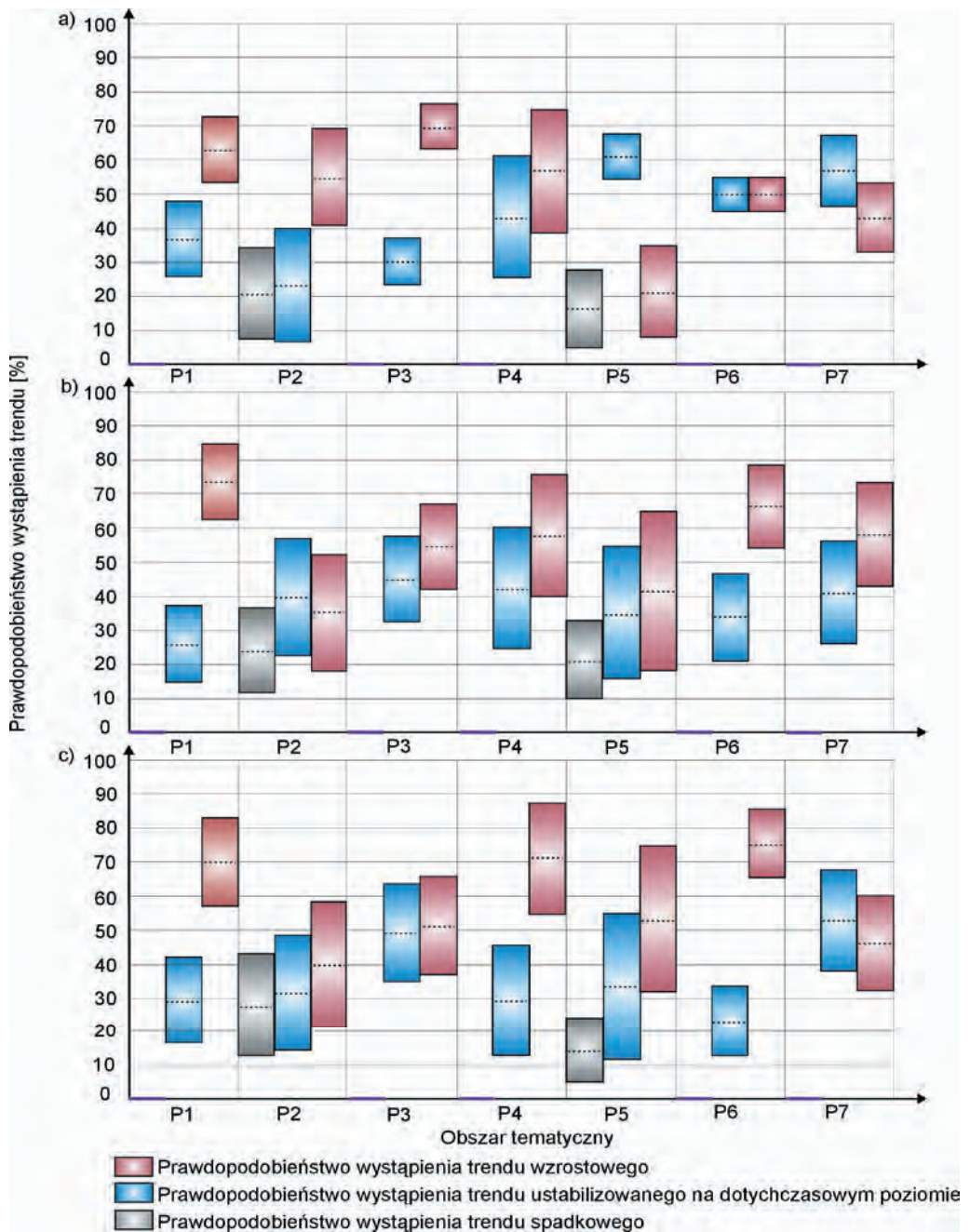




**Rysunek 6.12.** Wyniki symulacji prezentujące wartości prawdopodobieństwa poszczególnych trendów obszarów tematycznych pola badawczego M w przypadku zaistnienia scenariusza pesymistycznego z: a) 5%, b) 15% i c) 25% prawdopodobieństwem

warstw wierzchnich (*M6*) i technologii laserowych (*M1*) na tle całego pola badawczego *M*. We wszystkich analizowanych przypadkach prawdopodobieństwo trendu wzrostowego dla obszarów *M6* i *M1* utrzymuje się na najwyższym, spośród analizowanych przypadków, poziomie i maleje nieznacznie wraz ze wzrostem prawdopodobieństwa zaistnienia pesymistycznego wariantu przyszłych wydarzeń. W przypadku obszarów *M6* i *M1*, zdaniem ekspertów, prawdopodobieństwo wystąpienia trendu spadkowego jest równe zero, z czego wynika brak możliwości degradacji tych obszarów. Wyniki wykonanych symulacji wskazują, że również nie jest możliwa degradacja technologii PVD (*M2*) i technologii polimerowych warstw wierzchnich (*M5*), dla których wartość prawdopodobieństwa wystąpienia trendu wzrostowego we wszystkich trzech analizowanych przypadkach jest zbliżona i wynosi maksymalnie ok. 70-73%. Zależność pomiędzy wartością prawdopodobieństwa wystąpienia trendu wzrostowego w odniesieniu do innych technologii inżynierii powierzchni (*M7*) a wartością prawdopodobieństwa wystąpienia scenariusza pesymistycznego w skali makro jest wprost proporcjonalna. Oznacza to, że im gorsza jest sytuacja ogólna, tym szybciej rozwija się ta grupa technologii na tle pola badawczego, zatem jest wskazany rozwój innych lepiej rokujących technologii. Wartość prawdopodobieństwa wystąpienia trendu wzrostowego dotyczącego technologii CVD (*M3*) kształtuje się na maksymalnym poziomie kolejno 62, 58 i 57% dla pesymistycznego makros scenariusza zachodzącego odpowiednio z 5, 15 i 25 procentowym prawdopodobieństwem. Ta odwrotnie proporcjonalna zależność w połączeniu z wartościami trendu ustabilizowanego i spadkowego wskazuje na utrzymanie się dotychczasowej dynamiki nieznacznego wzrostu znaczenia tego obszaru. Rozwój klasycznych technologii obróbki cieplno-chemicznej jest najbardziej przewidywalny, a wraz ze wzrostem prawdopodobieństwa wystąpienia scenariusza pesymistycznego, znacząco wzrasta od 51 do 62% prawdopodobieństwo wystąpienia trendu *M4* ustabilizowanego na dotychczasowym poziomie. Obróbka cieplno-chemiczna nienależąca do technologii awangardowych, zajmuje i nadal, w ciągu najbliższych 20 lat, będzie zajmować istotne miejsce we współczesnej gospodarce, ze względu na rachunek ekonomiczny i powszechność stosowania.

W odniesieniu do pola badawczego *P* wybrano do prezentacji przykładowe wyniki eksperymentów symulacyjnych, dotyczących zależności pomiędzy trendami rozwojowymi poszczególnych obszarów tematycznych a optymistycznym makros scenariuszem przyszłych wydarzeń, mogącym wystąpić odpowiednio z 5% (rys. 6.13a), 15% (rys. 6.13b) i 25% (rys. 6.13c) prawdopodobieństwem. Na oś rzędnych, podobnie jak w przypadku pola badawczego *M*, naniesiono określone w procentach wartości prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych trendów (wzrostowego, ustabilizowanego i spadkowego) w odniesieniu do badanych obszarów tematycznych. Na osi odciętych znajdują się natomiast poddane badaniom symulacyjnym następujące



**Rysunek 6.13.** Wyniki symulacji prezentujące wartości prawdopodobieństwa poszczególnych trendów obszarów tematycznych pola badawczego P w przypadku zaistnienia scenariusza optymistycznego z: a) 5%, b) 15% i c) 25% prawdopodobieństwem

obszary tematyczne: (P1) Inżynieria powierzchni biomateriałów, (P2) Inżynieria powierzchni materiałów konstrukcyjnych metalowych, (P3) Inżynieria powierzchni materiałów konstrukcyjnych niemetalowych, (P4) Inżynieria powierzchni materiałów narzędziowych, (P5) Inżynieria powierzchni stali dla przemysłu motoryzacyjnego, (P6) Inżynieria powierzchni szkła, elementów mikro- i optoelektronicznych oraz fotowoltaicznych, (P7) Inżynieria powierzchni materiałów polimerowych.

Wyniki wykonanych eksperymentów symulacyjnych wskazują na pewny i szybki rozwój inżynierii powierzchni materiałów narzędziowych (P4), materiałów funkcjonalnych (P6) i biomateriałów (P1), o czym świadczą najwyższe maksymalne wartości trendu wzrostowego dla tych obszarów w przypadku zaistnienia z 25% prawdopodobieństwem optymistycznego scenariusza przyszłych wydarzeń. Prawdopodobieństwo wystąpienia trendu spadkowego w odniesieniu do obszarów P4, P1 i P6 wynosi zero. Podobnie sytuacja kształtuje się w przypadku inżynierii powierzchni materiałów konstrukcyjnych niemetalowych (P3) i materiałów polimerowych (P7). W odniesieniu do inżynierii powierzchni materiałów konstrukcyjnych niemetalowych (P3) obserwowana jest odwrotnie proporcjonalna zależność pomiędzy wartością prawdopodobieństwa wystąpienia trendu wzrostowego tych technologii a wartością prawdopodobieństwa wystąpienia optymistycznego makroscenariusza. Oznacza to, że w najbardziej optymistycznym wariantcie wydarzeń od rozwoju obszaru P3 ważniejszy będzie rozwój najlepiej rokujących obszarów, tj. P1, P6 i P4. Brak możliwości wystąpienia spadku znaczenia obszaru tematycznego P7 oraz brak wyraźnej prawidłowości zmian trendu wzrostowego i ustabilizowanego, w zależności od wartości prawdopodobieństwa wystąpienia optymistycznego makroscenariusza, świadczą o przewidywanej ustabilizowanej na dotychczasowym dobrym poziomie dynamice zmian tego obszaru. Wprost proporcjonalną zależność pomiędzy wartością prawdopodobieństwa trendu wzrostowego a wartością prawdopodobieństwa optymistycznego makroscenariusza przyszłych wydarzeń można zaobserwować w odniesieniu do inżynierii powierzchni stali dla przemysłu motoryzacyjnego (P5). Wynika z tego, że obszar ten będzie się w przyszłości w stałym umiarkowanym tempie rozwijał, co należy wiązać z przewidywanym pewnym rozwojem branży motoryzacyjnej. W odniesieniu do inżynierii powierzchni materiałów konstrukcyjnych metalowych (P2) obserwuje się brak wyraźnej prawidłowości zmian trendu wzrostowego i ustabilizowanego oraz zbliżone wartości prawdopodobieństwa wystąpienia trendu spadkowego dla poszczególnych wartości prawdopodobieństwa wystąpienia optymistycznego makroscenariusza. Świadczy to o przewidywanej ustabilizowanej na dotychczasowym poziomie dynamice zmian tego obszaru, co wynika z powszechności ich występowania w przemyśle i często braku możliwości zastąpienia ich innymi zbliżonymi kosztowo rozwiązaniami.

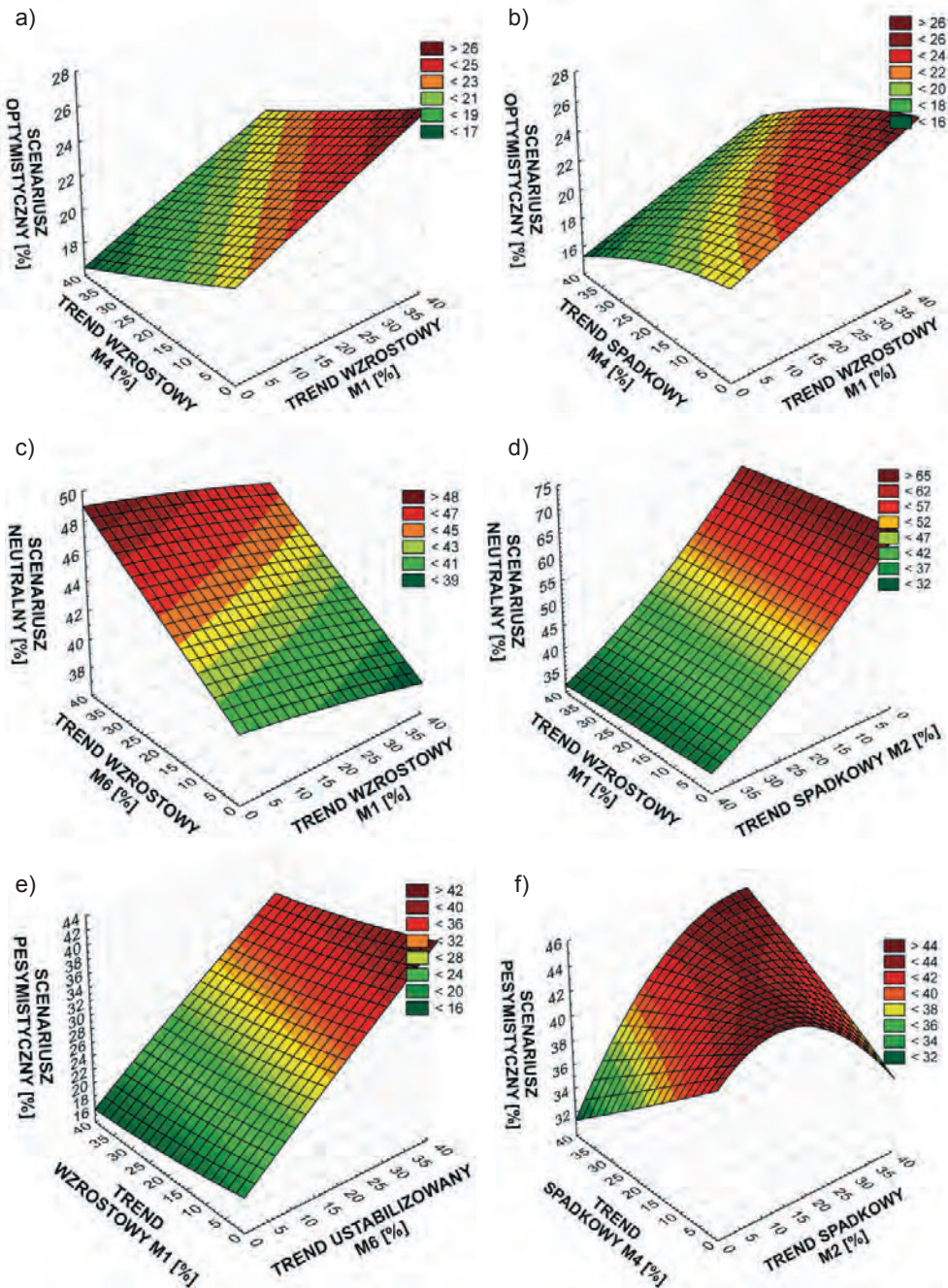


Zaprezentowane wybrane wyniki, dotyczące scenariusza pesymistycznego w odniesieniu do pola badawczego *M* i scenariusza optymistycznego dla pola badawczego *P*, stanowiące jedynie przykład znacznie szerszych badań symulacyjnych, pozwalają odpowiedzieć na pytanie, w jaki sposób wzrost, stabilizacja lub spadek znaczenia analizowanych obszarów tematycznych wpłynie na wystąpienie z określonym prawdopodobieństwem w ciągu najbliższych 20 lat każdego z alternatywnych makroscenariuszy: optymistycznego, neutralnego i pesymistycznego. Należy ponadto podkreślić, że odpowiednio wytrenowane sieci neuronowe są użytecznym narzędziem pozwalającym na szybkie wygenerowanie alternatywnych wariantów prognozy przyszłych wydarzeń.

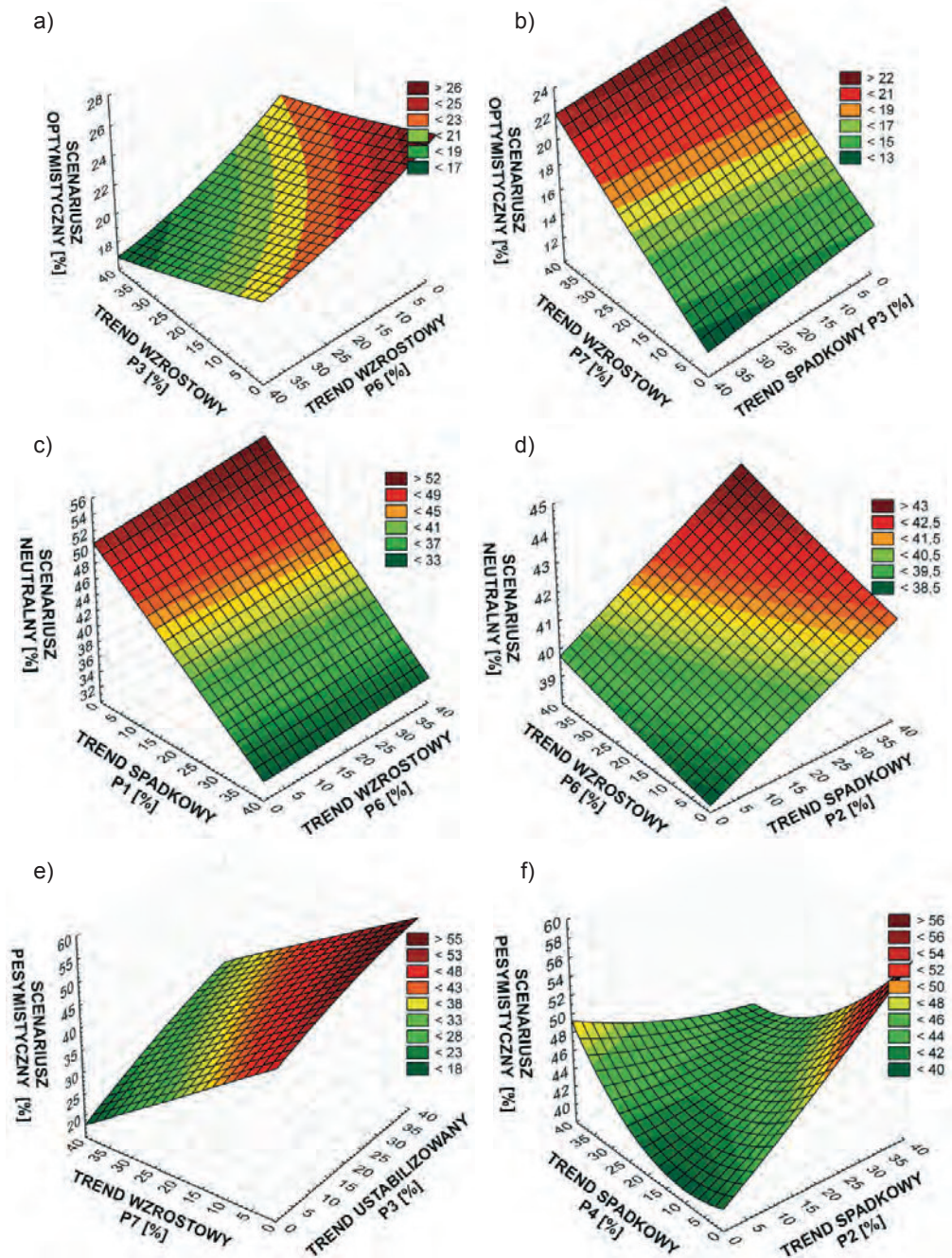
Symulacje komputerowe, wykonywane z użyciem programu SCENNET21, umożliwiają prezentację wyników badań dotyczących analizowanych całościowo pól badawczych, odpowiednio *M* i *P*, natomiast Program *Statistica 4.0.F* pozwala na generowanie trójwymiarowych wykresów. Funkcję tę wykorzystano do przeprowadzenia szczegółowych analiz wzajemnych zależności trzech zmiennych:

- wartości prawdopodobieństwa wystąpienia makroscenariusza przyszłych wydarzeń, wybranego z trójelementowego zbioru, obejmującego następujące scenariusze: optymistyczny, neutralny, pesymistyczny,
- wartości prawdopodobieństwa wystąpienia trendu dotyczącego jednego z siedmiu obszarów tematycznych pola badawczego *M* lub *P*, wybranego z trójelementowego zbioru, obejmującego następujące trendy: wzrostowy, ustabilizowany na dotychczasowym poziomie i spadkowy,
- wartości prawdopodobieństwa wystąpienia trendu dotyczącego drugiego z siedmiu obszarów tematycznych odpowiednio pola badawczego *M* lub *P*, wybranego z trójelementowego zbioru, obejmującego następujące trendy: wzrostowy, ustabilizowany na dotychczasowym poziomie i spadkowy.

Na potrzeby tych eksperymentów symulacyjnych założono, że wartości prawdopodobieństwa pozostałych 19 trendów, dotyczących nierozpatrywanych akurat szczegółowo obszarów tematycznych, wynoszą w odniesieniu do trendu wzrostowego 27%, ustabilizowanego 50%, a spadkowego 23%. Przykładowe wyniki tych symulacji komputerowych, prezentujące zależności pomiędzy wartością prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych alternatywnych makroscenariuszy a wartością prawdopodobieństwa dwóch wybranych trendów dotyczących obszarów tematycznych należących do pola badawczego *M* przedstawiono na rysunkach 6.14a-f. Wybrane do prezentacji zależności pomiędzy wartością prawdopodobieństwa określonego makroscenariusza przyszłych wydarzeń a wartością prawdopodobieństwa dwóch



**Rysunek 6.14.** Wyniki symulacji wpływu prawdopodobieństwa wystąpienia wybranych trendów dotyczących obszarów tematycznych należących do pola badawczego M na wybrane makro-scenariusze przyszłych wydarzeń (Współautorzy: A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, J. Trzaska)

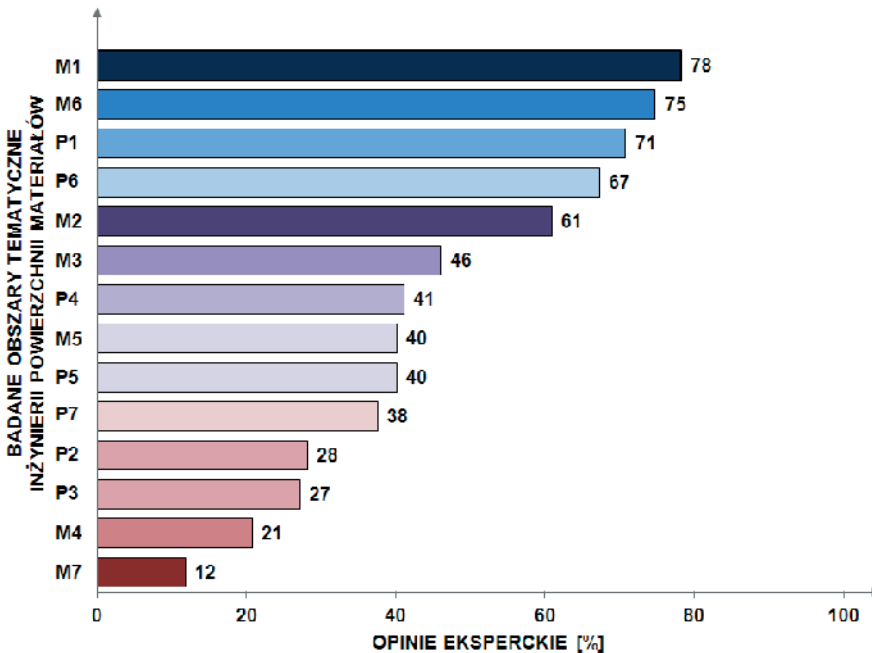


**Rysunek 6.15.** Wyniki symulacji wpływu prawdopodobieństwa wystąpienia wybranych trendów dotyczących obszarów tematycznych należących do pola badawczego P na wybrane makroscenariusze przyszłych wydarzeń (Współautorzy: A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, J. Trzaska)

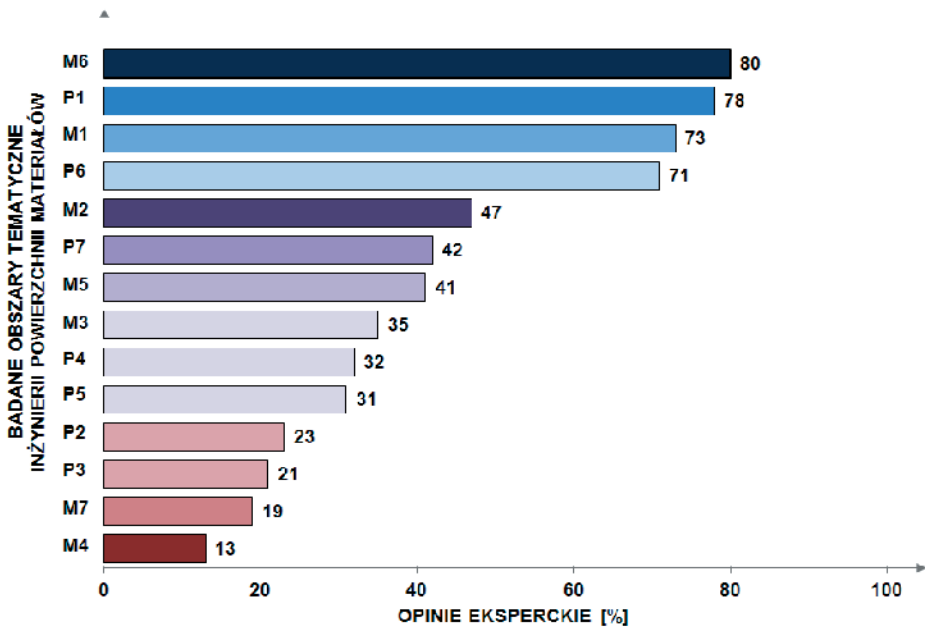


trendów dotyczących rozwoju obszarów tematycznych należących do pola badawczego *P* znalazły się na rysunkach 6.15a-f. Zaprezentowane trójwymiarowe wykresy pozwalają szczegółowo przeanalizować, w jaki sposób wystąpienie trendów dotyczących dwóch obszarów tematycznych należących do pola badawczego *M* (rys. 6.14) lub *P* (rys. 6.15), przy założonych stałych wartościach pozostałych trendów, wpływa na zaistnienie jednego z możliwych makroscenariuszy przyszłych wydarzeń.

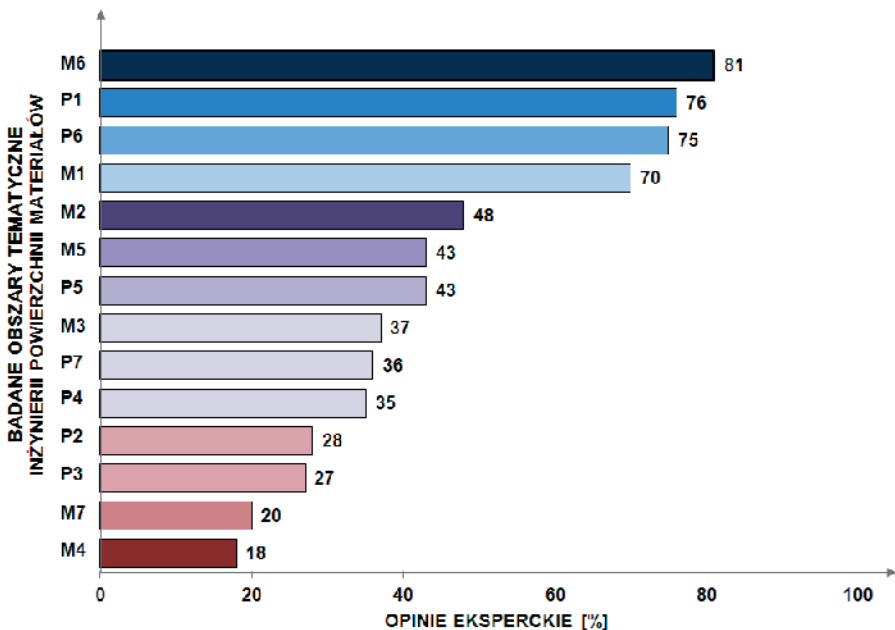
Niezależnie wykonane badania heurystyczne o liczebności próby 202 są zbieżne z wynikami otrzymanymi drogą symulacji komputerowych wykonanych z użyciem autorskiego programu SCENNET21. Ankietowani eksperci oceniali możliwości praktycznej aplikacji rozpatrywanych grup technologii zakwalifikowanych do poszczególnych obszarów tematycznych (rys. 6.16), typowali obszary tematyczne, którym będą najczęściej poświęcone prace naukowo-badawcze przyszłych wydarzeń (rys. 6.17) oraz definiowali, które obszary tematyczne, a ściślej grupy technologii zawarte w tych obszarach, są kluczowe i ich znaczenie powinno bezwzględnie wzrastać, aby miał szansę zaistnieć optymistyczny makroscenariusz przyszłych wydarzeń, zwany *Wygranym wyścigiem* (rys. 6.18). Założono 20-letni horyzont czasowy prowadzonych badań heurystycznych. We wszystkich przypadkach prezentowanych na trzech wykresach



**Rysunek 6.16.** *Możliwość praktycznej aplikacji w przemyśle w ciągu najbliższych 20 lat grup technologii należących do poszczególnych obszarów tematycznych*



Rysunek 6.17. Obszary tematyczne, w ramach których w ciągu najbliższych 20 lat najczęściej będą realizowane prace naukowo-badawcze



Rysunek 6.18. Obszary tematyczne, których znaczenie powinno bezwzględnie wzrastać, aby w ciągu najbliższych 20 lat, miał szansę zaistnieć optymistyczny makrosceńariusz

najlepiej oceniono technologie laserowe w inżynierii powierzchni (*M1*), technologie nanostrukturalnych warstw wierzchnich (*M6*), inżynierię powierzchni biomateriałów (*P1*) oraz inżynierię powierzchni szkła, elementów mikro- i optoelektronicznych oraz fotowoltaicznych (*P6*), w odniesieniu do których każdorazowo otrzymano ok. 80-70% odpowiedzi potwierdzających prawdziwość stawianych tez, dotyczących kolejno: przyszłych licznych aplikacji przemysłowych, licznych prac naukowo-badawczych poświęconych danemu zagadnieniu i bezwzględnej konieczności rozwoju, gwarantującej zaistnienie optymistycznego makroscenariusza przyszłych wydarzeń. Wyniki badań heurystycznych, podobnie jak wyniki badań symulacyjnych, we wszystkich trzech przypadkach wskazują na słabą pozycję klasycznych technologii obróbki powierzchniowej. Interpretując je należy zwrócić uwagę, że znaczenia tych technologii, mimo iż nie należą do awangardowych ani skrajnie rozwojowych, nie sposób przecenić, ponieważ są one powszechnie stosowane w przemyśle i, ze względu na rachunek ekonomiczny, produkcja z ich udziałem nadal będzie realizowana w ciągu najbliższych 20 lat, choć zapewne rozwiązania najmniej ekologiczne i najbardziej przestarzałe zostaną wyparte przez te bardziej nowoczesne i bardziej przyjazne środowisku naturalnemu.

## 6.5. Perspektywy e-foresightu i e-transferu technologii kształtowania struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich

Udana aplikacja, bazującej na koncepcji e-foresightu, metodologii komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju w obszarze inżynierii powierzchni materiałów, zachęca do jej rozwijania i rozszerzenia badań na inne obszary inżynierii materiałowej i nauki o materiałach, jak również na zupełnie inne dziedziny wiedzy szczegółowej, co wymaga jednak uprzedniego zebrania odpowiednio licznych i wartościowych danych źródłowych od szerokiego grona ekspertów. O zasadności realizacji badań, służących prognozowaniu rozwoju w odniesieniu do kolejnych pól badawczych, decydują przesłanki ekonomiczne, bowiem nowo opracowana metodologia, wsparta rozbudowaną technologią informacyjną, jest możliwa do bezpośredniej aplikacji w innym obszarze, a koszt nawet pełnego trzyetapowego cyklu badań heurystycznych, obejmujący jedynie wynagrodzenia wiodących, kluczowych i branżowych ekspertów, jest nieporównywalnie niższy niż koszt klasycznych badań materiałoznawczych pozwalających na osiągnięcie tożsamyh wyników. Nakłady na eksperymenty materiałoznawcze obejmują bowiem, w minimalnym wariantcie, wynagrodzenia pracowników naukowo-badawczyh, materiał do badań i eksploatację aparatury naukowo-badawczej, natomiast często rosną wykładniczo, gdy badania wymagają zakupu nowej lub uzupełnienia o dodatkowe moduły funkcjonalne istniejącej

aparatury, wykonania całości lub części prac w zagranicznych uczelniach, konieczności powtórzenia lub poszerzenia zakresu eksperymentów w celu uzyskania jednoznacznych wyników, jak również testowania wyników badań w warunkach przemysłowych.

Nowo opracowana koncepcja e-transferu technologii jest naturalną kontynuacją badań zapoczątkowanych w ramach prac e-foresightowych. Nowoczesna i unikalna Platforma Internetowa e-Transferu Technologii (PleTT) zapewnia dostęp do bazy wiedzy zawierającej zbiór uprzednio zgromadzonych i uporządkowanych systemowo, według ujednoczonego wzorca, danych o priorytetowych, innowacyjnych technologiach obróbki powierzchniowej i przetwórstwa nowoczesnych materiałów inżynierskich. Utworzeniu obszernej bazy wiedzy o technologiach posłużyły w pierwszej kolejności tradycyjne i elektroniczne archiwa wiedzy zgromadzonej w toku wieloletnich materiałoznawczych i heurystycznych (opartych na wiedzy eksperckiej) prac naukowo-badawczych wykonanych przez pracowników naukowych uczestniczących w przedsięwzięciu. Platforma Internetowa, odgrywająca kluczową rolę w realizacji zadań Centrum e-Transferu Technologii, jest złożona z trzech kompatybilnych modułów funkcjonalnych, obejmujących: e-doradztwo, e-szkolenia i e-informację, sprzężonych z bazą wiedzy o technologiach. E-doradztwo polega na udostępnianiu map drogowych i kart informacyjnych technologii stanowiących kompendium zwartej wiedzy o priorytetowych innowacyjnych technologiach, scharakteryzowanych w ujednoczony sposób, umożliwiającym ich łatwe porównanie między sobą pod względem wybranego kryterium materiałoznawczego, technologicznego lub organizacyjnego. E-szkolenia umożliwiają samokształcenie beneficjentów poprzez dostęp do specjalistycznych materiałów szkoleniowych i system samokontroli w postaci testów możliwych do wielokrotnego wypełniania, aż do osiągnięcia rezultatu satysfakcjonującego użytkownika. Uzupełniające, wysoko specjalistyczne materiały szkoleniowe, dostępne w większości w języku angielskim, stanowią artykuły i monografie zgromadzone w publicznie dostępnej bazie prac naukowych zwanej *otwartym repozytorium*. E-informacja obejmuje natomiast przekazywanie aktualności dotyczących zasobów platformy internetowej, konferencji, warsztatów i innych podejmowanych inicjatyw związanych z bieżącą działalnością Centrum.

Elastyczność działania Platformy Internetowej pozwala na swobodne kształtowanie prezentowanych treści i zagadnień, które mogą być udostępniane przedsiębiorstwom i innym zainteresowanym podmiotom z kręgów Nauki i administracji publicznej. Dostęp do Platformy Internetowej odbywa się poprzez zalogowanie użytkownika po podaniu indywidualnego loginu oraz hasła. W zależności od przyznanych użytkownikowi uprawnień uzyskuje on dostęp do wybranych funkcji systemu PleTT. Niektóre z wymienionych poniżej funkcji występują pojedynczo w systemach e-learningowych lub jako samodzielne narzędzia. Platforma Internetowa łączy

natomiast wszystkie funkcje w jednym programie, co oprócz zasadniczych prac programistycznych, służących utworzeniu platformy od podstaw, wymaga także zakupu specjalistycznego oprogramowania pozwalającego na zastosowanie sprawdzonych już pojedynczych modułów pomocniczych, również funkcjonujących w strukturze PleTT.

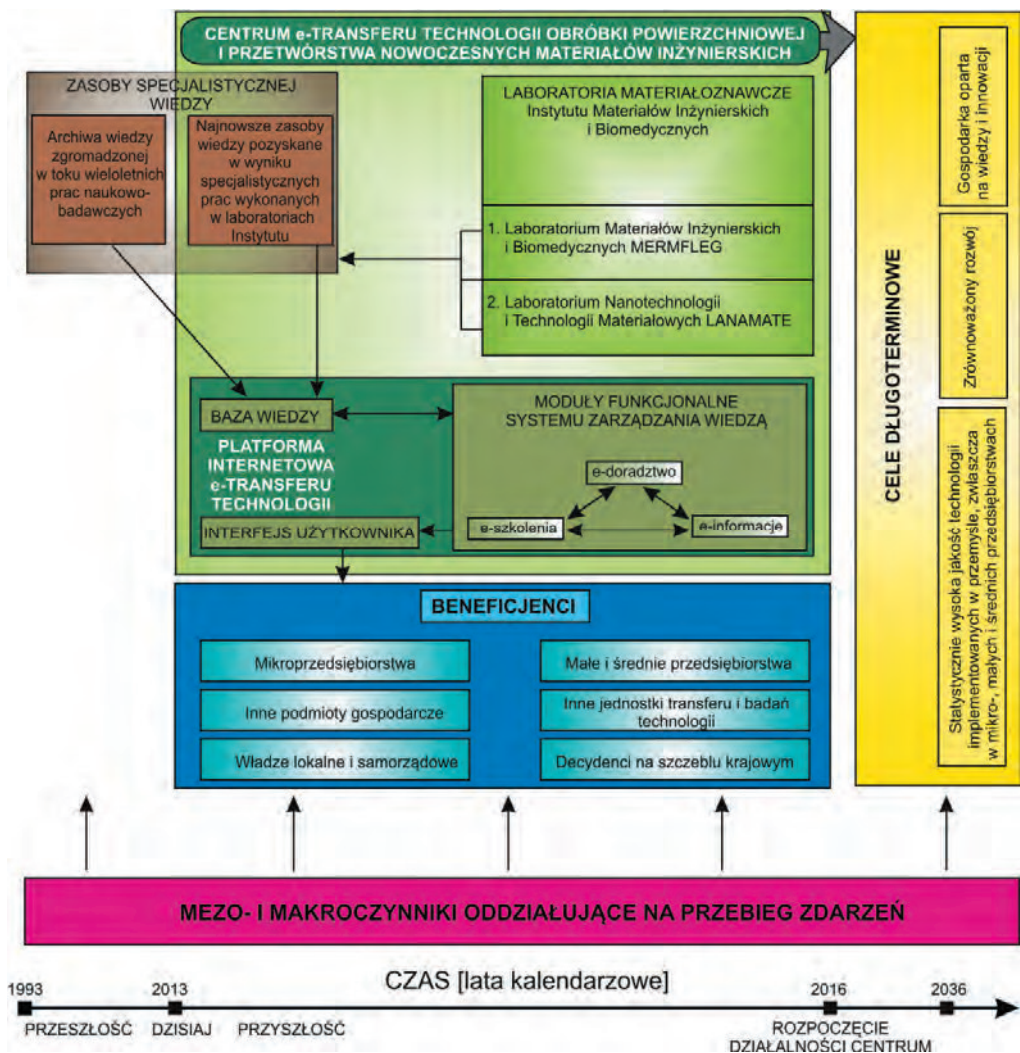
Intensywne prace koncepcyjno-programistyczne służące pełnemu uruchomieniu wszystkich funkcji nowo opracowanej Platformy są planowo i systematycznie prowadzone w ramach projektu strategicznego realizowanego aktualnie w Politechnice Śląskiej. Do całkowicie nowatorskich, aktualnie wdrażanych, zaliczają się następujące funkcje:

- komunikacja i interakcja (forum, czat, e-mail, konferencja głosowa, video-konferencja),
- dedykowane raporty i statystyki dla każdego poziomu zarządzania zasobami zgromadzonymi na PleTT, zarówno danymi dotyczącymi technologii i wyników badań, jak i użytkowników aplikacji,
- brak konieczności instalacji jakiegokolwiek komponentu po stronie użytkownika,
- możliwość konfigurowania opcji dostępnych w wyszukiwarce do bazy danych technologii,
- zgodność ze światowym standardem SCORM, AICC,
- dostęp do poszczególnych modułów funkcjonalnych PleTT dla większej liczby użytkowników w jednym czasie,
- proces rejestracji użytkowników do PleTT umożliwiający między innymi badanie rodzaju podmiotu zapisującego się do bazy danych.

Wyniki interdyscyplinarnych badań dotyczących e-foresightu i e-transferu technologii mogą być bezpośrednio zastosowane praktycznie w rzeczywistości gospodarczej. Nadrzędnym zadaniem nowo utworzonego specjalistycznego Centrum e-transferu technologii obróbki powierzchniowej i przetwórstwa nowoczesnych materiałów inżynierskich (rys. 6.19) jest bowiem zapewnienie zainteresowanym podmiotom elektronicznego dostępu do bazy wiedzy zawierającej zbiór uprzednio zgromadzonych i uporządkowanych systemowo, według ujednoczonego wzorca, danych o priorytetowych innowacyjnych technologiach procesów materiałowych i przetwórstwa materiałów. Istniejąca obszerna baza wiedzy o technologiach jest systematycznie uzupełniana o charakterystyki kolejnych technologii opracowanych w ramach prac naukowo-badawczych prowadzonych w, bardzo dobrze wyposażonych w nowoczesny sprzęt naukowo-badawczy na najwyższym światowym poziomie, laboratoriach Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej. W przypadku szczególnego zainteresowania Beneficjenta wdrożeniem którejs, ze znajdujących się w bazie danych, technologii możliwe jest nawiązanie bezpośredniej współpracy w tym zakresie. Działalność



Centrum e-Transferu Technologii, w odpowiedzi na potrzeby Beneficjentów, może także polegać również na obrocie patentami i licencjami, wspieraniu działań służących ochronie własności intelektualnej, a także tworzeniu spółek odpryskowych, typu *spin-off* i *spin-out*, umożliwiających przemysłowe wdrażanie technologii przy udziale i wsparciu Uczelni. Oferta Centrum e-Transferu Technologii ma pomóc przedsiębiorcom w osiągnięciu przewagi konkurencyjnej i spełnieniu coraz wyższych wymagań klientów.



**Rysunek 6.19.** Centrum e-Transferu Technologii Obróbki Powierzchniowej i Przetwórstwa Nowoczesnych Materiałów Inżynierskich a jego otoczenie i cele długoterminowe na osi czasu

Grupą docelową odbiorców Centrum e-Transferu Technologii są mikro-, małe i średnie przedsiębiorstwa, które nie posiadają wystarczających funduszy na prowadzenie własnych specjalistycznych prac naukowo-badawczych służących poznaniu nowych i udoskonalaniu istniejących technologii obróbki powierzchniowej i przetwórstwa materiałów, dzięki zastosowaniu których ma miejsce poprawa własności użytkowych produktów oczekiwanych przez coraz bardziej wymagających klientów. Wśród głównych kosztów prac naukowo-badawczych należy wyszczególnić konieczność zatrudnienia wysoko wykwalifikowanego personelu dysponującego fachową wiedzą tematyczną oraz konieczność wykorzystania kosztownych maszyn i urządzeń, których wartość niejednokrotnie jest liczona w miliony złotych. Z udostępnionej elektronicznie wiedzy o technologiach mogą korzystać również inne podmioty prowadzące działalność gospodarczą (np. spółdzielnie, stowarzyszenia, fundacje, duże przedsiębiorstwa) oraz władze na szczeblu lokalnym, samorządowym i krajowym, mogące ją zaaplikować w procesach decyzyjnych dotyczących rozdziału środków publicznych lub opracowywania strategii rozwoju. Działalność Centrum e-Transferu Technologii, w długim horyzoncie czasowym obejmującym 20 lat, ma służyć zapewnieniu wysokiej jakości technologii implementowanych w mikro-, małych i średnich przedsiębiorstwach, zrównoważonemu rozwojowi – rozumianemu jako rozwój społeczno-gospodarczy realizowany poprzez integrację działań politycznych, gospodarczych i społecznych, z zachowaniem równowagi przyrodniczej i trwałości podstawowych procesów przyrodniczych, w trosce o dobro przyszłych pokoleń – oraz wzmocnieniu gospodarki opartej na wiedzy i innowacji poprzez ustawiczne kształcenie społeczeństwa informacyjnego.